Электротехнические системы и комплексы

Издается с января 1996 г. № 3(56), Сентябрь 2022

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. Храмшин − 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.

Секция теории и практики автоматизированного электропривода:
А.С. Сарваров − проф., д-р техн. наук,
МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия;
А.Е. Козярук − проф., д-р техн. наук,
Санкт-Петербургский горный университет,
г. Санкт-Петербург, Россия;
О.А. Кравченко – проф., д-р техн. наук,
Тульский государственный университет,
г. Тула, Россия.

Секция электро- и теплоэнергетики:
А.В. Паздерин – проф., д-р техн. наук,
УрФУ им. первого Президента России
Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия;
Е.Г. Нешпоренко – доц., канд. техн. наук,
МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия;
Н.Ф. Джагаров − проф., д-р техн. наук,
Высшее военно-морское училище
им. Николы Вапцарова, г. Варны, Болгария.

Секция энерго- и ресурсосбережения:
Р.Г. Мугалимов − доц., д-р техн. наук,
МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия;
О.И. Осипов − проф., д-р техн. наук,
НИУ «МЭИ», г. Москва, Россия;
В.Н. Мещеряков − проф., д-р техн. наук, ЛГТУ,
г. Липецк, Россия.

Секция электроснабжения:
Г.П. Корнилов − проф., д-р техн. наук,
МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия;
А.Л. Карякин – с.н.с., д-р техн. наук,
УГГУ, г. Екатеринбург, Россия.

Секции промышленной электроники, автоматики и систем управления; информационного, математического и программного обеспечения технических систем:
О.С. Логунова − проф., д-р техн. наук,
МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия;
С.М. Андреев − доц., д-р техн. наук,
МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия;
Е.Н. Ишметьев – д-р техн. наук,
R&D МГТУ, г. Магнитогорск, Россия.

Секция электротехнологий в промышленности:
А.М. Зюзев − доц., д-р техн. наук,
УрФУ им. первого Президента России
Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия;
Б.М. Логинов − канд. техн. наук,
ПАО «ММК», г. Магнитогорск, Россия;
И.В. Бочкарев − проф., д-р техн. наук,
Кыргызский государственный технический
университет им. И. Раззакова, г. Бишкек,
Кыргызстан.

Секция мониторинга, контроля и диагностики электрооборудования:
А.А. Радионов – проф., д-р техн. наук,
Московский Политехнический университет,
г. Москва, Россия;
А.С. Карандаев − проф., д-р техн. наук,
ЮУрГУ (НИУ), г. Челябинск, 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. Храмшина − МГТУ им. Г.И. Носова,
г. Магнитогорск, Россия.

© ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2022

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 28.09.2022. Заказ 231. Тираж 500 экз.
Цена свободная.

ELECTROTECHNICAL SYSTEMS AND COMPLEXES

PUBLISHED SINCE JAN., 1996 NO. 3(56), SEPT, 2022

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.

Section of Theory and Practice of Automated Electric Drive:

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

A.E. Kozyaruk − Professor, D.Sc. (Engineering), St. Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russia;

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

Section of Power Engineering:

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

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

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

Section of Energy- and Resources-Economy:

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

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

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

Section of Electric Power Supply:

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

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

Section of Power Electronics, Automation and Control Systems; Technical Systems Dataware and Software:

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

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

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

Section of Industrial Electro Technology:

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

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

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

Section of Monitoring, Diagnostics and Control of Electric Equipment:

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

A.S. Karandaev − Professor, D.Sc. (Engineering), SUSU (NRU), Chelyabinsk, 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, 2022

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: 28.09.2022. Order 231. Circulation: 500.
Open price.

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРО- И ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА 4

Мухлынин Н.Д., Ерохин П.М., Паздерин А.В.
Направления совершенствования функций релейной защиты за счет использования технологий синхронизированных векторных измерений 4

Тащилин В.А., Губин П.Ю., Шакиров М.М.
Направления применения синхронизированных векторных измерений в задачах противоаварийного управления энергосистемами на основе методов машинного обучения 12

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА 28

Омельченко Е.Я., Танич В.О., Лымарь А.Б.
Процесс боксования четырехосного маневрового электровоза с тяговым электроприводом по системе «преобразователь частоты – асинхронный двигатель».....28

ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА, АВТОМАТИКА И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ.....36

Маклаков А.С., Радионов А.А., Цзин Т.
Алгоритм смены стратегий предварительно запрограммированной широтно-импульсной модуляции трехуровневого преобразователя.....36

Николаев А.А., Гилемов И.Г., Линьков С.А., Светлаков М.С.
Экспериментальные исследования качества электроэнергии в сети 34,5 кВ металлургического завода ЗАО «ММК Metalurji».....44

Верзунов С.Н.
Способ оптимизации конструктивных параметров ячеек-резонаторов микрополосковых антенн на основе интеллектуального анализа данных.....54

ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ.....65

Хазиева Р.Т., Васильев П.И., Афлятунов Р.Р.
Исследование установки для испытания изоляции электрооборудования повышенным напряжением 65

МОНИТОРИНГ, КОНТРОЛЬ И ДИАГНОСТИКА ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ.....70

Храмшин В.Р., Евдокимов С.А., Гасиярова О.А., Карандаев А.С., Логинов Б.М.
Обоснование разработки телеметрической системы мониторинга упругого момента главной линии клети прокатного стана 70

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ.....80

CONTENT

POWER ENGINEERING.....4

Mukhlynin N.D., Erokhin P.M., Pazderin A.V.
Relay Protection Improving by Means of Using PMU Technologies 4

Tashchilin V.A., Gubin P.Yu., Shakirov M.M.
Review of Machine Learning Based on PMU Application in Terms of Power System Emergency Control.....12

THEORY AND PRACTICE OF AUTOMATED ELECTRIC DRIVE.....28

Omelchenko E.Ya., Tanich V.O., Lymar A.B.
Slipping Process of Four-Axle Shunting Electric Locomotive with Inverter Powered Asynchronous Traction Electric Drive.....28

POWER ELECTRONICS, AUTOMATION AND CONTROL SYSTEMS 36

Maklakov A.S., Radionov A.A., Jing T.
Switching Algorithm of Preprogrammed Pulse-Width Modulation Patterns for Three-Level Converter.....36

Nikolaev A.A., Gilemov I.G., Linkov S.A., Svetlakov M.S.
Experimental Studies of Power Quality in the 34.5 kV Network at MMK Metalurji 44

Verzunov S.N.
Method for Optimizing Design Parameters of Microstrip Antenna Cell-resonators on the Basis of Intelligent Data Analysis.....54

INDUSTRIAL ELECTRO TECHNOLOGY 65

Khazieva R.T., Vasilyev P.I., Aflyatunov R.R.
Installation for Testing Insulation of Electrical Equipment with Increased Voltage 65

MONITORING, DIAGNOSTICS AND CONTROL OF ELECTRIC EQUIPMENT 70

Khramshin V.R., Evdokimov S.A., Gasiyarova O.A., Loginov B.M., Karandaev A.S.
Feasibility Study of the Elastic Moment Telemetric Monitoring System at the Main Line Rolling Stand 70

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS 80

ЭЛЕКТРО- И ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.311 https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-3(56)-4-11

Мухлынин Н.Д., Ерохин П.М., Паздерин А.В.

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург

НАПРАВЛЕНИЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ФУНКЦИЙ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ ЗА СЧЕТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ СИНХРОНИЗИРОВАННЫХ ВЕКТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Синхронизированные векторные измерения стоит рассматривать как набор технологий современных «цифровых» электрических сетей, уже сегодня обеспечивающих измерительной информацией системы управления электрическими режимами на качественно новом уровне. От доступности данных технологий зависит количество измерительных устройств в энергосистеме, а также перечень решаемых с их использованием задач. Одной из перспективных областей внедрения синхронизированных векторных измерений является релейная защита, в которой открываются новые возможности по совершенствованию ее функций и пересмотру существующих принципов выявления и локализации повреждений. Обзор включает рассмотрение основных направлений, связанных в первую очередь с обеспечением новыми, дополнительными свойствами существующих алгоритмов защиты элементов энергосистем, с расширением области применения защит с дифференциальным принципом работы для охвата распределенных присоединений, в том числе и разветвлённых участков электрических сетей, с созданием новых пусковых органов, реагирующих на изменение формы одного или нескольких режимных параметров одновременно. Ключевые преимущества связаны с приобретением свойств адаптивности, быстродействием, повышением чувствительности, возможностью создания абсолютно селективных защит без каналов связи. Вместе с обзором направлений в статье приводится их классификация по использованию в составе существующих алгоритмов защит и в составе алгоритмов, основанных на новых принципах детекции повреждений. Уровень программно-аппаратного развития современных интеллектуальных электронных устройств обеспечивает интеграцию векторных измерений с существующими способами получения измерений и сигналов, в частности с алгоритмами их обработки. Несмотря на очевидные преимущества, особенности реализации концепции технологии синхронизированных векторных измерений, основанной на распределенных датчиках и цифровых каналах связи, существенно сужают область использования векторных измерений в релейной защите и других системах управления режимами электроэнергетических систем.

Ключевые слова: синхронизированные векторные измерения, концентратор синхронизированных векторных измерений, релейная защита, короткое замыкание, цифровая подстанция, интеллектуальное электронное устройство, цифровые каналы связи, высокодискретные измерения, адаптивная защита, Wide Area Protection System, Continuous Point-On-Wave

ВВЕДЕНИЕ

В развитии цифровых информационно-измерительных систем можно выделить три основные известные технологии, которые сегодня используются на объектах электроэнергетики. Это технология работы с усредненными на интервале времени действующими значениями режимных параметров (IEC 60870-5, ModBus и др.), векторные измерения (IEEE C37.118), а также высокодискретные мгновенные измерения токов и напряжений (в рамках стандарта IEC 61850). Первая технология предназначена в первую очередь для использования в подсистемах АСУ ТП, тогда как две другие могут использоваться в том числе и в комплексах защит, сетевой и противоаварийной автоматике в качестве альтернативы аналоговому способу передачи измерений.

Преимущества передачи высокодискретных измерений заключаются не только в возможности использования одного потока Sampled Values (SV) для решения нескольких задач, но и в меньшей погрешности расчета модулей действующих значений и углов токов и напряжений в случае ложного измерения или пропажи точек мгновенных измерений, достигаемой за счет их избыточности на расчетном окне. Однако трансляция высокодискретных измерений через локальную коммуникационную сеть цифровой подстанции (ЦПС) приводит к ее значительной загрузке и задержкам при передаче, что особенно важно при реализации дифференциальных защит шин и ошиновок с множеством присоединений. Кроме того, высокодискретные осциллограммы обеспечивают передачу формы кривых токов и напряжений для возможности расчетов гармонического спектра, что используется не во всех защитах. В связи с чем разумной альтернативой использованию SV-потоков может быть передача синхронизированных векторов режимных параметров только основной гармоники, получаемых в полевых датчиках – измерительных устройствах синхронизированных векторных измерений (УСВИ) – один раз за период или даже чаще.

Перенос функций расчета амплитуд и фаз из терминалов защит на полевой уровень потребовал обеспечения УСВИ модулями синхронизации времени, повысил требования к производительности данных устройств, создал необходимость организации протяженных высокоскоростных каналов связи и концентраторов синхронизированных векторных измерений (КСВИ) для обработки измерений, предполагающих установку на разных уровнях управления [1]. Все это привело к увеличению стоимости УСВИ и долгое время ограничивало их установку крупными узловыми энергообъектами и использование в таких важных прикладных системах Филиалов АО «СО ЕЭС», как СМПР, СМЗУ, НЧК, СМСР и др., а также модулях уточнения параметров схем замещения элементов энергосистем.

Постепенное снижение стоимости УСВИ, программно-аппаратное развитие вторичных устройств вместе с тенденцией централизации функций повысили

© Мухлынин Н.Д., Ерохин П.М., Паздерин А.В., 2022

актуальность использования синхронизированных векторных измерений (СВИ) и в области релейной защиты. Причем имеется тенденция по применению СВИ не только в высоковольтных сетях, но и в сетях средних уровней напряжения. Основные ожидаемые перспективы связаны с повышением чувствительности защит, с защитой распределенных присоединений и участков сетей, с приобретением новых свойств.

Особенности использования УСВИ в защите

Принимая во внимание особенности реализации технологии СВИ, важным является вопрос области ее применения в релейной защите. Современные комплексы защит являются автономными системами, обеспечивающими обнаружение и селективную ликвидацию повреждения. Автономность их функционирования достигается получением измерений и принятием решения в точке установки терминалов. К инкапсуляции основных частей комплексов релейной защиты также относятся и каналы связи, обеспечивающие передачу сигналов на большие расстояния, за счет чего достигается требуемое быстродействие. В случае повреждения каналов связи основные защиты выводятся из работы, резервные, как правило, замедляются.

При наличии протяженных каналов связи, интеграция подсистем СВИ в автономные модули релейной защиты должна осуществляться только на уровне улучшения их существующих характеристик, нежели обеспечивать замену измерительных органов защит и основных принципов их функционирования на новые. Распределенные функции, реализованные на основе возможностей УСВИ, больше подходят для автоматизации и медленно действующей противоаварийной автоматики. Однако при этом использование СВИ в функциях релейной защиты в пределах цифровых станций и подстанций (ПС) становится более оправданным. Особенно актуальным является создание защит на СВИ с охватом множества присоединений (дифференциальных) в условиях ограниченности пропускной способности коммуникационной сети связи и обладающих практически в 3-4 раза меньшим объемом передаваемых данных в сравнении с защитами, использующими SV-потоки.

В направлении совершенствования функций защиты вызывает сомнение, что измерительная и логическая части на основе СВИ полностью заменят традиционную релейную защиту в части новых принципов ее функционирования, однако ожидается, что они смогут значительно улучшить ее характеристики. В случае потери связи с подсистемой СВИ защиты не должны выходить из строя и должны надежно выполнять свои функции в соответствии с назначением.

Классификация направлений развития функций защит с векторными измерениями

Согласно требованиям существующей нормативно-технической документации [2], особо производительные решения должны иметь возможность реализовывать в своих алгоритмах работу с мгновенными значениями режимных параметров. Это открывает новые возможности по использованию математических методов обработки дискретизированных сигналов, ранее недоступных для аналоговых измерительных трактов. Возможности использования СВИ токов и напряжений могут быть реализованы в следующих направлениях:

1. Обеспечение существующих защит элементов энергосистем новыми свойствами:
   - Расширение свойств традиционных дифференциальных защит линий, двигателей, генераторов, шин и ошиновок.
   - Повышение чувствительности дистанционных защит при качаниях за счет уточнения зоны срабатывания защиты. Совершенствование функций блокировки от качаний (БЛК).
   - Селективное срабатывание максимальных токовых защит (МТЗ) за счет фиксации направления протекания мощности короткого замыкания и снижение времени срабатывания за счет контроля векторов *U*.
   - Защиты генераторов (от потери возбуждения и др.) с отслеживанием перемещения вектора режима его работы по P-Q-диаграмме. Адаптивные свойства.
2. Адаптивные защиты, подстраивающиеся к условиям изменения режима, и схемы сети. В основном это ступенчатые защиты с относительной селективностью, уставка или характеристика которых зависит от схемно-режимных изменений в энергосистеме.
3. Защиты с широким охватом защищаемой зоны (за счет охвата каналами связи и УСВИ) – WAMPAC (Wide Area Monitoring Protection and Control).
4. Централизация функций защит и автоматики в одном устройстве принятия решения с действием на исполнительные механизмы объектов энергосистемы через цифровые каналы связи.
5. Защиты, основанные на анализе трендов изменения векторов на комплексной плоскости или формы кривых тока и напряжения (технологии Continuous Point-On-Wave, или CPOW). Математический аппарат:
   - применение вейвлет-преобразования DWT;
   - применение методов машинного обучения AI.

Достаточно высокий темп измерения и передачи данных СВИ в КСВД, вплоть до 4 раз за период, позволяют применять современные методы оценки изменения трендов значений токов и напряжений и выполнять защиты, имеющие новые пусковые органы. Существующие алгоритмы цифровой обработки сигналов позволят реализовывать быстрые и надежные функции защит на аппаратной базе с небольшой производительностью. Также интересным является возможность выявления момента развития аварии до ее наступления.

Стоит упомянуть, что при реализации новых принципов выявления повреждений возникают вопросы обеспечения расчета уставок таких защит, оценки коэффициента чувствительности, вопросы, связанные с согласованием таких защит между собой и с традиционными решениями в области защиты и автоматики.

Решения в области интеграции векторных измерений в традиционные алгоритмы защиты

Согласно проанализированным отчетам IEEE и публикациям компании North American SynchroPhasor Initiative за пять лет, с 2015 года по 2020 год, доля исследований в области применения УСВИ только в релейной защите выросла с 4 до 15%. В первую очередь это защиты линий, на которые приходятся 11%

публикаций, и защиты станционного оборудования, на которые приходятся около 4% публикаций. Это связано с повышением числа установленных на объектах УСВИ, развитием технологий и цифровых сетей передачи данных. Из совокупности научных работ можно выделить два актуальных направления, определяющих интеграцию СВИ в функции релейной защиты:

- Использование СВИ в составе существующих, традиционных алгоритмов защит.
- Использование СВИ в составе алгоритмов, основанных на новых принципах выявления повреждений, отличных от традиционных.

В вопросах актуальности использования СВИ в составе существующих алгоритмов защит очевидной областью их применения являются защиты, основанные на дифференциальном принципе. Преимуществом СВИ в таких защитах является не столько скорость срабатывания, сколько возможности обеспечения широкого охвата присоединений и значительного расширения защищаемой зоны за счет цифровых каналов связи [3]. В перспективе это позволит обеспечить защитой не только отдельные протяженные линии электропередачи, но и разветвленные участки распределительных электрических сетей напряжением от 6 до 35 кВ [4]. Последнее отчасти становится возможным в связи с появлением относительно недорогих датчиков СВИ (микроPMU класса P) [5], стоимость которых в ближайшее время прогнозируется на уровне 250-300 $.

Новым в **дифференциальных защитах** является контроль векторов напряжения [6], применение которых ранее было невозможно из-за используемого в дифференциальных защитах принципа суммирования векторов токов. При повреждениях в зоне работы защиты между векторами напряжения по концам реактированной кабельной линии появляется разница по модулю и углу, что позволяет дополнительно фиксировать факт повреждения и повысить чувствительность дифференциальной защиты (**рис. 1**).

В случае реализации дифференциальной токовой защиты силового трансформатора с контролем векторов напряжения появляется возможность выполнять блокировку от бросков тока намагничивания по углу *U* [7].

Согласно источникам [8-10] для **резервных ступенчатых защит**, токовых и дистанционных, вычисление параметров прямой, обратной и нулевой последовательностей по векторам СВИ производится за счет применения метода симметричных составляющих в традиционных алгоритмах защит. Для **максимальных токовых защит** применение СВИ, полученных в точке установки защиты, актуально прежде всего при выполнении органов фиксации направления протекания мощности, основанных на анализе углов токов и напряжений одноименных фаз. Использование СВИ в пусковых органах МТЗ увеличивает быстродействие цифровой защиты, однако при этом ухудшает отстройку от высших гармонических составляющих в токе нормального режима.

В [11] приводятся результаты, демонстрирующие эффект от контроля в МТЗ векторов напряжения шин противоположных подстанций. Помимо выдержек времени селективность обеспечивается за счет определения поврежденных и неповрежденных элементов электрической сети для выдачи разрешающих или блокирующих сигналов на выходные реле защиты (**рис. 2**).

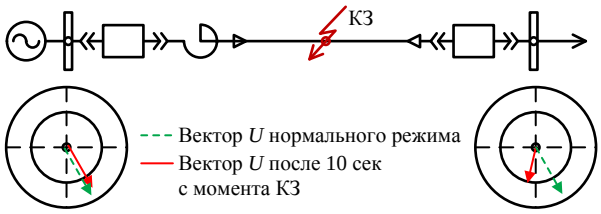


Рис. 1. Качественно показанное изменение векторов напряжения при коротком замыкании на линии

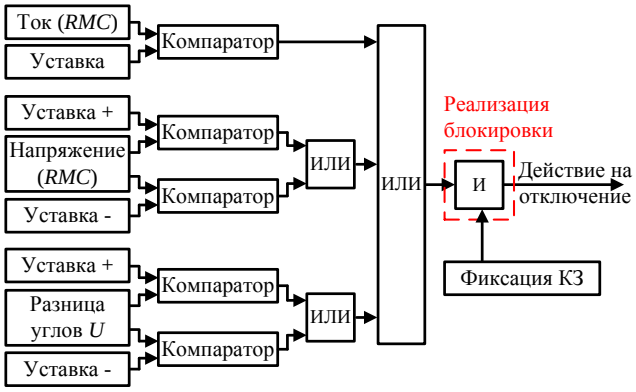


Рис. 2. Блок-схема использования векторов напряжения для реализации функции блокировки токовой защиты

Алгоритмы **дистанционных защит** функционируют по принципу одностороннего замера и обязательно оснащаются БЛК. При этом заблокированная защита может не сработать при коротком замыкании (КЗ) с малой долей несимметрии, возникшем при качаниях. Для решения данной проблемы в [12] предлагается использование алгоритма БЛК, основанного на дифференциальном принципе и использующего СВИ для расчета дифференциального тока. Превышение дифференциального тока выше значения уставки разрешает действие защиты. Однако все это требует установленных на противоположных подстанциях комплектов УСВИ и цифровых каналов связи.

В общем смысле ускорение действия первых и вторых ступеней резервных защит может не иметь большого смысла в случаях локализации токов КЗ с большой и медленно затухающей апериодической составляющей, задерживающей переход тока через ноль на несколько периодов.

Помимо технологий, обеспечивающих улучшение характеристик существующих алгоритмов защит на основе функциональной связки УСВИ и КСВД, большое теоретическое развитие получил класс так называемых **адаптивных защит** (Adaptive Protection), особенно в областях дистанционных защит и защит генераторов. В условиях наличия управляемых элементов электрической сети существующие алгоритмы микропроцессорных защит позволяют обеспечить отстройку от регулировочного диапазона устройств гибкой компенсации, как правило, путем компромиссной настройки статичной формы характеристики срабатывания, что приводит к снижению коэффициента чувствительности защиты. Для обеспечения точной отстройки от регулировочного диапазона устройств гибкой компенсации реактивной мощности без существенного снижения чувствительности защиты требуется динамическое изменение ее уставок. Этот процесс небыстрый. Суммарное время цикла смены настроек оценивается в 2,2 секунды [13]. Этого должно оказаться достаточно в условиях работы устройств компенсации,

корректирующих параметры сети и режима ее работы, а также при возникающих схемно-режимных изменениях, вызванных работой оперативного персонала или работой сетевой автоматики. В то же время при потере сигналов от системы, обеспечивающей дополнительную информацию по данным СВИ, защита не будет выведена из работы и будет работать с традиционными статичными уставками.

Также разработка алгоритмов адаптивных защит актуальна и для активных распределительных сетей [14], содержащих возобновляемые источники энергии (ВИЭ), оснащенные устройствами компенсации.

В публикациях рассматриваются совершенствование характеристик срабатывания дистанционной защиты непосредственно по зонам, это вторая [15] и третья [16] зоны, а также коррекция по времени срабатывания ступеней, предназначенных для дальнего резервирования в сторону его уменьшения [8]. На **рис. 3** показаны характеристики срабатывания при степени продольной компенсации линии, равной 20 и 60%.

Для решения проблемы непопадания вектора сопротивления в зону работы второй ступени защиты предлагается алгоритм оценки степени компенсации по данным СВИ [8], а также использование комбинированных дистанционно-дифференциальных защит [17, 18]. Корректное действие третьих ступеней дистанционных защит при схемно-режимных изменениях в сети в [16] предлагается обеспечить за счет оценки сопротивления прямой последовательности в центре принятия решения (КСВД), вычисляемые и передаваемые по каналам связи от устройств – источников СВИ, установленных на разных шинах ПС.

Это обеспечивает сравнение характеристик срабатывания первых ступеней и ступеней дальнего резервирования для блокирования последних при срабатывании первых. Технологии СВИ в резервных защитах линий различных классов напряжения имеют высокую применимость. Даже с учетом достаточно большого времени передачи информации в КСВИ и обратного сигнала управляющего воздействия, позволяя сокращать время работы ступеней до 5 раз.

Помимо защит линий всех классов напряжения, адаптивные принципы могут быть использованы в **защитах генераторов**, например в защитах от потери поля, от потери возбуждения [19]. На их долю приходится около 60% всех срабатываний. Основная проблема традиционных защит, основанных на критерии предельного значения сопротивления, соответствующего границе статической устойчивости, заключается в сложности, а иногда и невозможности детекции повреждений в системе возбуждения во время колебаний. В [19], а также в публикациях [20, 21] измерения векторов используются в алгоритмах определения эквивалентного сопротивления системы в режиме on-line.

На **рис. 4** показано изменение формы характеристики при изменении сопротивления эквивалента системы. При увеличении эквивалентного сопротивления адаптивная характеристика пересчитывается (на **рис. 4** переход от синей к красной). При возникновении повреждения в системе возбуждения генератора, сопровождающегося полной или частичной потерей возбуждения, время реакции неадаптивной системы защиты на вхождение режима в зону срабатывания пускового органа может достигать от 140 до 150 мс.

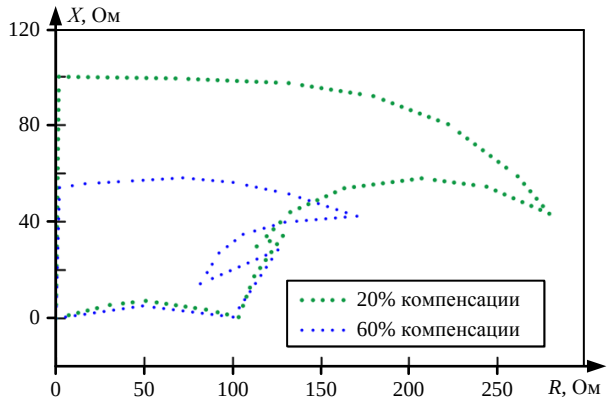


Рис. 3. Характеристика изменения сопротивления линии

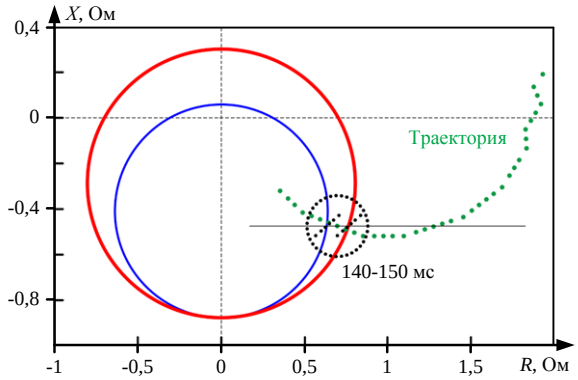


Рис. 4. Оценка времени определения повреждения

Если при этом реальная характеристика окажется меньше, использование защиты со статичными уставами может привести к ложной работе, вызванной преждевременным срабатыванием защиты.

Другим перспективным направлением использования СВИ для совершенствования защит генераторов является динамическое отслеживание перемещения вектора работы генератора по координатам P-Q-диаграммы с контролем пересечения ее границы, а также предела по статической устойчивости для реализации «мягкой» разгрузки генератора в случае потери возбуждения [20]. Предлагаемый алгоритм защиты обеспечивает не мгновенное отключение генератора, как в традиционных защитах, а предполагает оценку его возможностей по длительности работы без потери устойчивости, а также в случае необходимости его разгрузку в границах P-Q-диаграммы и предела по статической устойчивости, чем и достигается его адаптивность.

Отдельно стоить упомянуть про функции автоматики – синхронизации для генерации и выявления изолированной работы для микрогрид. Уже сегодня имеются функционирующие программно-технические комплексы автоматизации, построенные на СВИ и обеспечивающие синхронизацию микрогрид с внешней сетью общего пользования. Примером тому может служить система управления электроснабжением жилмассива «Березовое» в г. Новосибирске [22]. В распределительных электрических сетях, особенно в сетях крупных предприятий с собственной генерацией, работающей параллельно с сетью, востребованной является автоматика, обеспечивающая определение возникновения изолированного режима работы. В России это особенно актуально при подключении такого потреби-

теля к сети с наличием силовых выключателей только на стороне питающей подстанции электросетевой компании, без возможности контроля состояния линии по дискретным сигналам коммутационного аппарата. В зарубежных источниках данная автоматика входит в комплекс защит распределительных сетей и называется RAS (Remedial Action Scheme, или схема корректирующих действий), выполняющая функцию выявления изолированной работы по векторам напряжений [23]. Измерение векторов осуществляется как со стороны микрогрид, так и со стороны питающей подстанции.

Особым ключевым направлением развития СВИ в задачах управления является интеграция всех подсистем в единую централизованную программно-аппаратную платформу, обеспечивающую работу различных функций, в частности защиты и автоматики. Логика данного подхода, описанного во множестве публикаций и технических отчетах, близка к концепции создания IV архитектуры ЦПС. Она заключается в использовании возможностей общего коммуникационного и вычислительного пространства, без необходимости организации отдельных каналов связи со смежным оборудованием и для различных подсистем. Однако создание системы координации релейной защиты и автоматики на основе СВИ возможно только при достаточном числе УСВИ.

В [24] отмечается, что для распределительных сетей может быть создана система, обеспечивающая локализацию повреждений и контроль связности сети на основе алгоритмов обработки измерений и сигналов в едином центре принятия решения с использованием традиционных измерений действующих значений режимных параметров и дискретных сигналов без СВИ.

Решения в области новых принципов выявления повреждений

В связи с развитием устройств высокодискретных измерений и повышением вычислительных ресурсов микропроцессорных терминалов становится возможным разработка новых алгоритмов защит, основанных на иных принципах детекции повреждений.

В рамках концепции ЦПС переход на использование высокодискретных измерений (POW – Point of Wave) с дискретизацией токов и напряжений в диапазоне от 1 кГц до 10 МГц [25] дает возможность создавать новые пусковые органы, работа которых основана на анализе изменения формы кривых режимных параметров. Сегодня одними из важнейших и перспективных инструментов для работы с такими временными рядами являются искусственные нейронные сети (ИНС), а также механизмы дискретного вейвлет-преобразования (DWT). Первые, как универсальные аппроксиматоры и классификаторы, на основе обучения обеспечивают анализ формы кривых и позволяют устойчиво детектировать повреждения при различных схемно-режимных изменениях в сети без коррекции уставки. Вторые, использующие вейвлет-преобразования, обладают возможностью на разных уровнях разложения анализировать изменения кривых тока и напряжения каждой из фаз одновременно в частотной и временной областях, тем самым обеспечивая последовательное решение задач детекции повреждения, определения его вида, а также определения точного места повреждения, реализуя функцию определения места повреждения [26]. Ожидается, что алгоритмы таких защит смогу надежно выполнять свои задачи на четверти периода, что в 5 раз быстрее требований, предъявляемых к основным защитам. А создание многопараметрических защит, реагирующих на изменение форм сразу нескольких параметров, обеспечит приближение резервных защит по своим свойствам к защитам с абсолютной селективностью, без использования каналов связи.

Благодаря УСВИ с производительными аналого-цифровыми преобразователями становится возможным превентивная детекция аварий за время не более 33 мс до наступления момента их развития [27]. В частности, обнаружения факта обрыва проводника с отключением поврежденного участка до того, как провод коснется земли. Основная идея заключается в мониторинге таких динамически изменяющихся параметров, как приращение вектора напряжения, углов и модулей напряжения обратной и нулевой последовательностей.

Заключение

Рассмотренные направления совершенствования функций защиты опираются в первую очередь на возможности современных УСВИ и устройств обработки этих измерений – КСВД. Технологии СВИ развиваются каскадным образом, при котором расширение области их применения приводит к росту числа устройств, что, в свою очередь, расширяет спектр решаемых задач.

Наиболее востребованными преимуществами использования СВИ в защите и автоматике являются возможности существенного расширения области их применения в традиционных алгоритмах, а также качественного улучшения их характеристик. В частности, комплексного введения в работу ступеней дальнего резервирования ступенчатых защит со снижением выдержек времени, возможности организации защит с широким охватом присоединений, основанных на дифференциальном принципе, что актуально прежде всего для распределительных сетей. Кроме того, инвестиционно-привлекательным направлением является разработка новых пусковых органов для защит элементов сети (особенно линий электропередачи), анализирующих форму изменения режимных параметров, что позволяет отказаться от использования каналов связи. Однако данное направление пока является концептуальным.

С другой стороны, существует ряд ограничений для применения СВИ не только в релейной защите, но и в других системах управления. Наиболее значимые из них связаны с кибербезопасностью, с разработкой стандартов в области измерений. К средней степени значимости можно отнести вопросы передачи данных по каналам связи и хранения и обработки больших объемов измерений.

Представленные результаты являются итогом работ по теме «Разработка интеллектуальных алгоритмов управления энергосистемой на основе синхронизированных векторных измерений» в рамках комплексного проекта «Разработка систем управления энергосистемой с применением интеллектуальных алгоритмов и СМПР».

Список источников

1. Analysis of IEEE C37.118 and IEC 61850-90-5 synchrophasor communication frameworks / R. Khan, K. McLaughlin, D. Laverty, S. Sezer // IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM). 2016. Pp. 1-5. doi: 10.1109/PESGM.2016.7741343
2. СТО 56947007-29.120.70.241-2017. Технические требования к микропроцессорным устройствам РЗА. Стандарт ПАО «ФСК ЕЭС». Дата введения изменений 11.12.2019. 357 с.
3. Ramesh L., Chowdhury S.P., Chowdhury S. Wide area monitoring protection and control - A comprehensive application review // 10th International Conference on Developments in Power System Protection (DPSP). IET, 2010. Pp. 1-4. doi: 10.1049/cp.2010.0325
4. Khederzadeh M. Wide-area protection in smart grids // 11th IET International Conference on Developments in Power Systems Protection (DPSP). IET, 2012. Pp. 1-4. doi: 10.1049/cp.2012.0078.
5. Leibovich P., Issouribehere F., Barbero J. Design and Implementation of a low-cost PMU: validation by tests and performance during 2019 Argentinean blackout // IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM). IEEE, 2021. Pp. 1-5. doi: 10.1109/PESGM46819.2021.9638242
6. PMU-voltage drop based fault locator for transmission backup protection / J.J. Chavez, N.V. Kumar, S. Azizi, J.L. Guardado, J. Rueda, P. Palensky, V. Terzija, M. Popov // Electric Power Systems Research. 2021. Vol. 196. Pp. 1-8. doi: 10.1016/j.epsr.2021.107188
7. Системы управления, мониторинга и защиты на основе синхронизированных векторных измерений / С.А. Пискунов, А.В. Мокеев, Д.Н. Ульянов, А.И. Попов, А.В. Родионов // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики: материалы 93-го заседания семинара. Волжский, 13-17 сентября 2021 года. В 2-х кн. Иркутск: Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения РАН, 2021. С. 133-142.
8. Motavalian A.R., Moadabi N., Gharehpetian G.B. Reliability Assessment of Power System Backup Protection in Smart Grid Control Center Using Phasor Measurement Units (PMU) // Renewable Energy and Power Quality Journal. 2013. No. 11. Pp. 404-410. doi: 10.24084/repqj11.324
9. Karthick S., Lakshmi K. Wide area backup protection scheme for power transmission lines using PMU // International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET). 2015. Vol. 2(9). Pp. 273-281.
10. Jena M.K., Samantaray S.R., Panigrahi B.K. Supervisory control based wide area back-up protection scheme for power transmission network // National Power Systems Conference (NPSC). IEEE, 2016. Pp. 1-5. doi: 10.1109/NPSC.2016.7858869
11. Saran A. Comparison between overcurrent relay and developed PMU based protection // North American Power Symposium (NAPS). IEEE, 2013. Pp. 1-6. doi: 10.1109/NAPS.2013.6666919
12. Rao J.G., Pradhan A.K. Application of synchrophasor data for fault detection during power swing // International Conference on Energy, Automation and Signal. IEEE, 2011. Pp. 1-5. doi: 10.1109/ICEAS.2011.6147180
13. Ariff M.A M., Pal B.C. Adaptive Protection and Control in the Power System for Wide-Area Blackout Prevention // IEEE Transactions on Power Delivery. 2016. Vol. 31(4). Pp. 1815-1825. doi: 10.1109/TPWRD.2016.2518080
14. Keramat M.M., Fazaeli M.H. The New Adaptive Protection Method for the Compensated Transmission Lines with the Series Capacitor in a High Share of Wind Energy Resources by Using PMU Data // 7th Iran Wind Energy Conference (IWEC). IEEE, 2021. Pp. 1-6. doi: 10.1109/IWEC52400.2021.9466998
15. Sarangi S., Pradhan A.K. Apply PMU data for Zone-2 setting of series compensated line // International Conference on Energy, Automation and Signal. IEEE, 2011. Pp. 1-6. doi: 10.1109/ICEAS.2011.6147184
16. Synchrophasor Assisted Adaptive Relaying Methodology to Prevent Zone-3 Mal-Operation During Load Encroachment / D. Pal, B. Mallikarjuna, R.J. Reddy, M.J.B. Reddy, D.K. Mohanta // IEEE Sensors Journal. 2017. Vol. 17(23). Pp. 7713-7722. doi: 10.1109/JSEN.2017.2728862
17. Ehsan N., Behrouz V., Mehdi M. Modified Transmission Line Protection Scheme in the Presence of SCC // Journal of Electrical Engineering and Technology. 2017. Vol. 12. Pp. 533-540. doi: 10.5370/JEET.2017.12.2.533.
18. Study on adaptive relay protection scheme based on phase measurement unit (PMU) / F. Chunju, L. Shengfang, Y. Weiyong, K.K. Li // Eighth IEE International Conference on Developments in Power System Protectio. IET, 2004. Pp. 36-39. doi: 10.1049/cp:20040057
19. Adaptive loss of field protection based on phasor measurements / T. Bi, J. Sui, H. Yu, Q. Yang // IEEE Power and Energy Society General Meeting. IEEE, 2011. Pp. 1-4. doi: 10.1109/PES.2011.6039170
20. Senapati S., Bhattacharya K.D., Das J.K. Application of phasor measurement unit in adaptive protection for loss of excitation in a generator // 6th IEEE Power India International Conference (PIICON). IEEE, 2014. Pp. 1-5. doi: 10.1109/POWERI.2014.7117655
21. Desai J.P., Makwana V.H. Phasor Measurement Unit Incorporated Adaptive Out-of-step Protection of Synchronous Generator // Journal of Modern Power Systems and Clean Energy. 2021. Vol. 9(5). Pp. 1032-1042. doi: 10.35833/MPCE.2020.000277
22. Синхронизация Microgrid с внешней электрической сетью и между собой в нормальных и послеаварийных режимах при разных схемах объединения / А.Г. Фишов, А.Х. Гуломзоде, Е.С. Ивкин, Р.Ю. Семендяев // Релейная защита и автоматизация. 2021. №2. С. 32-42.
23. Skok S., Frlan K., Ugarkovic K. Detection and Protection of Distributed Generation From Island Operation by Using PMUs // Energy Procedia. 2017. Vol. 141. Pp. 438-442. doi: 10.1016/j.egypro.2017.11.057
24. A centralized protection and control scheme for microgrid / M. Xu, T. Meng, G. Zou, J. Zhang, X. Lin, J. Yang // IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC). IEEE, 2015. Pp. 1-5. doi: 10.1109/APPEEC.2015.7380867
25. Phasor or Waveforms: Considerations for Choosing Measurements to Match Your Application / J. Follum, L. Miller, P. Etingov, H. Kirkham, A. Riepnieks, X. Fan, E. Ellwein // Pacific Northwest report. 2021. 43 p.
26. Galvez C., Abur A. Fault Location in Meshed and Active Power Distribution Networks // IEEE Madrid PowerTech. IEEE, 2021. Pp. 1-6. doi: 10.1109/PowerTech46648.2021.9494755
27. Dase K., Harmukh S. Detecting and Locating Broken Conductor Faults on High-Voltage Lines to Prevent Autoreclosing Onto Permanent Faults. URL: https://api.semanticscholar.org/CorpusID:208508639 (дата обращения 23.05.2022).

Поступила в редакцию 14 июня 2022 г.

INFORMATION IN ENGLISH

RELAY PROTECTION IMPROVING BY MEANS OF USING PMU TECHNOLOGIES

Nikita D. Mukhlynin

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Department of Automated Electric Systems, Ural Power Engineering Institute, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia, nd.mukhlynin@urfu.ru, https://orcid.org/0000-0002-2065-3231

Petr M. Erokhin

D.Sc. (Engineering), Professor, Research Professor, Department of Automated Electric Systems, Ural Power Engineering Institute, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia, petr_erohin@bk.ru

Andrey V. Pazderin

D.Sc. (Engineering), Professor, Head of the Automated Electric Systems Department, Department of Automated Electric Systems, Ural Power Engineering Institute, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia, a.v.pazderin@urfu.ru, https://orcid.org/0000-0003-4826-2387

A PMU should be considered as a set of modern digital electrical grid technologies, which provide measuring information for control systems of electrical modes at a high new level. The number of measuring devices in the power system, as well as the list of tasks solved with their use, depends on the technology availability. One of the promising areas for PMU introduction is relay protection, which opens up new opportunities for improving its functions and revising the existing principles for detecting and tripping faults. The article includes a review of the main areas related to providing new additional properties of the existing algorithms for protecting power system elements, expanding the protection area with a differential operation principle to protect feeders and sections of electrical grids, creating new fault detectors that react to a change in the shape of one or several mode parameters at the same time. The key advantages are associated with the acquisition of adaptability properties, speed, increased sensitivity, the ability to create absolutely selective protection without communication channels. Along with the overview of trends, the article provides their classification according to their use as a part of existing protection algorithms and as part of algorithms based on new fault detection principles. The level of software and hardware development in modern intelligent electronic devices provides the PMU integration to the existing methods of obtaining measurements and signals, and, in particular, with their processing algorithms. Despite the obvious advantages, the features of the PMU implementation based on distributed sensors and digital communication channels significantly narrow the application area for modern relay protection with PMU and other control systems in electric power grids.

Keywords: Phasor Measurement Unit, Phasor Data Concentrator, relay protection, fault, digital substation, Intelligent Electronic Device, digital communication channel, highly discrete measurements, adaptive protection, Wide Area Protection System, Continuous Point-On-Wave

REFERENCES

1. Khan R., McLaughlin K., Laverty D., Sezer S. Analysis of IEEE C37.118 and IEC 61850-90-5 synchrophasor communication frameworks. IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM 2016). IEEE, 2016, pp. 1-5. doi: 10.1109/PESGM.2016.7741343
2. Standart 56947007-29.120.70.241-2017. Technical requirements for microprocessor-based relay protection. FGC UES, PJSC standard. Date of changes introduction: 11.12.2019. 357 p. (In Russian)
3. Ramesh L., Chowdhury S.P., Chowdhury S. Wide area monitoring protection and control – A comprehensive application review. 10th International Conference on Developments in Power System Protection (DPSP 2010). Managing the Change. IET, 2010, pp. 1-4. doi: 10.1049/cp.2010.0325
4. Khederzadeh M. Wide-area protection in smart grids. 11th IET International Conference on Developments in Power Systems Protection (DPSP 2012). IET, 2012, pp. 1-4. doi: 10.1049/cp.2012.0078
5. Leibovich P., Issouribehere F., Barbero J. Design and Implementation of a low-cost PMU: validation by tests and performance during 2019 Argentinean blackout. IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM 2021). IEEE, 2021, pp. 1-5. doi: 10.1109/PESGM46819.2021.9638242
6. Chavez J.J., Kumar N.V., Azizi S., Guardado J.L., Rueda J., Palensky P., Terzija V., Popov M. PMU-voltage drop based fault locator for transmission backup protection. Electric Power Systems Research. 2021, pp 1-8. doi: 10.1016/j.epsr.2021.107188
7. Piskunov S.A., Mokeev A.V., Ulyanov D.N., Popov A.I., Rodionov A.V. Control, monitoring and protection systems based on PMU. *Metodicheskie voprosy issledovaniya nadezhnosti bolshikh sistem energetiki: Materialy 93-ego zasedaniya seminara* [Methodological Issues of Researching the Reliability of Large Energy Systems. Materials of the 93rd meeting of the seminar]. Irkutsk, Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences Publ., 2021., pp. 133-142. (In Russian)
8. Motavalian A.R., Moadabi N., Gharehpetian G.B. Reliability Assessment of Power System Backup Protection in Smart Grid Control Center Using Phasor Measurement Units (PMU). Renewable Energy and Power Quality Journal, pp. 404-410. doi: 10.24084/repqj11.324
9. Karthick S., Lakshmi K. Wide area backup protection scheme for power transmission lines using PMU. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), 2015, vol. 2(9), pp. 273-281.
10. Jena M.K., Samantaray S.R., Panigrahi B.K. Supervisory control based wide area back-up protection scheme for power transmission network. National Power Systems Conference (NPSC 2016). IEEE, 2016, pp. 1-5. doi: 10.1109/NPSC.2016.7858869
11. Saran A. Comparison between overcurrent relay and developed PMU based protection. North American Power Symposium (NAPS 2013). IEEE, 2013, pp. 1-6. doi: 10.1109/NAPS.2013.6666919
12. Rao J.G., Pradhan A.K. Application of synchrophasor data for fault detection during power swing. International Conference on Energy, Automation and Signal. IEEE, 2011, Pp. 1-5. doi: 10.1109/ICEAS.2011.6147180

13. Ariff M.A.M., Pal B.C. Adaptive Protection and Control in the Power System for Wide-Area Blackout Prevention. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, vol. 31(4), pp. 1815-1825. doi: 10.1109/TPWRD.2016.2518080
14. Keramat M.M., Fazaeli M.H. The New Adaptive Protection Method for the Compensated Transmission Lines with the Series Capacitor in a High Share of Wind Energy Resources by Using PMU Data. 7th Iran Wind Energy Conference (IWEC 2021). IEEE, 2021, pp. 1-6. doi: 10.1109/IWEC52400.2021.9466998
15. Sarangi S., Pradhan A.K. Apply PMU data for Zone-2 setting of series compensated line. International Conference on Energy, Automation and Signal. IEEE, 2011, pp. 1-6. doi: 10.1109/ICEAS.2011.6147184
16. Pal D., Mallikarjuna B., Reddy R.J., Reddy M.J.B., Mohanta D.K. Synchrophasor Assisted Adaptive Relaying Methodology to Prevent Zone-3 Mal-Operation During Load Encroachment. IEEE Sensors Journal, 2017, vol. 17(23), pp. 7713-7722. doi: 10.1109/JSEN.2017.2728862
17. Ehsan N., Behrouz V., Mehdi M. Modified Transmission Line Protection Scheme in the Presence of SCC. Journal of Electrical Engineering and Technology. 2017, vol. 12, pp. 533-540. doi: 10.5370/JEET.2017.12.2.533
18. Chunju F., Shengfang L., Weiyong Y., Li K.K. Study on adaptive relay protection scheme based on phase measurement unit (PMU). Eighth IEE International Conference on Developments in Power System Protection. IET, 2004, pp. 36-39. doi: 10.1049/cp:20040057
19. Bi T., Sui J., Yu H., Yang Q. Adaptive loss of field protection based on phasor measurements. IEEE Power and Energy Society General Meeting. IEEE, 2011, pp. 1-4. doi: 10.1109/PES.2011.6039170
20. Senapati S., Bhattacharya K.D., Das J.K. Application of phasor measurement unit in adaptive protection for loss of excitation in a generator. 6th IEEE Power India International Conference (PIICON 2014). IEEE, 2014, pp. 1-5. doi: 10.1109/POWERI.2014.7117655
21. Desai J.P., Makwana V.H. Phasor Measurement Unit Incorporated Adaptive Out-of-step Protection of Synchronous Generator. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2021, vol. 9 (5), pp. 1032-1042. doi: 10.35833/MPCE.2020.000277
22. Fishov A.G., Gulomzode A.Kh., Ivkin E.S., Semendyaev R.Yu. Synchronization of the Microgrid with the external electrical grid and between each other in normal and post-emergency modes with different combination grid schemes. *Releynaya zashchita i avtomatizatsiya* [Relay protection and automation], 2021. no. 2, pp. 32-42. (In Russian)
23. Srdjan Skok, Kristijan Frlan, Kresimir Ugarkovic. Detection and Protection of Distributed Generation From Island Operation by Using PMUs. Energy Procedia, 2017, vol. 141, pp. 438-442. doi: 10.1016/j.egypro.2017.11.057
24. Xu M., Meng T., Zou G., Zhang J., Lin X., Yang J. A centralized protection and control scheme for microgrid. 2015 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC 2015). IEEE, 2015, pp. 1-5. doi: 10.1109/APPEEC.2015.7380867
25. Follum J., Miller L., Etingov P., Kirkham H., Riepnieks A., Fan X., Ellwein E. Phasor or Waveforms: Considerations for Choosing Measurements to Match Your Application. Pacific Northwest report. 2021. 43 p.
26. Galvez C., Abur A. Fault Location in Meshed and Active Power Distribution Networks. IEEE Madrid PowerTech. IEEE, 2021, pp. 1-6. doi: 10.1109/PowerTech46648. 2021.9494755
27. Kanchanrao Dase, Sajal Harmukh, Arunabha Chatterjee. Detecting and Locating Broken Conductor Faults on High-Voltage Lines to Prevent Autoreclosing Onto Permanent Faults // 2019. Semantic Scholar. Available at: https://api.semanticscholar.org/CorpusID:208508639 (accessed 23 May 2022).

Мухлынин Н.Д., Ерохин П.М., Паздерин А.В. Направления совершенствования функций релейной защиты за счет использования технологий синхронизированных векторных измерений // Электротехнические системы и комплексы. 2022. № 3(56). С. 4-11. https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-3(56)-4-11

Mukhlynin N.D., Erokhin P.M., Pazderin A.V. Relay Protection Improving by Means of Using PMU Technologies. *Elektrotekhnicheskie sistemy i kompleksy* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2022, no. 3(56), pp. 4-11. (In Russian). https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-3(56)-4-11

УДК 621.3.087.4+621.316.9 https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-3(56)-12-27

Тащилин В.А., Губин П.Ю., Шакиров М.М.

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург

НАПРАВЛЕНИЯ ПРИМЕНЕНИЯ СИНХРОНИЗИРОВАННЫХ ВЕКТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ В ЗАДАЧАХ ПРОТИВОАВАРИЙНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГОСИСТЕМАМИ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Распространение синхронизированных векторных измерений (СВИ) расширяет возможности в управлении режимом как на уровне объединенных энергосистем, так и в распределительных сетях и сетях микрогрид. Спектр задач, решаемых с помощью этих устройств, не ограничивается оценкой состояния сети и распространяется на анализ параметров режимов в переходных процессах. Это дает новый импульс развитию систем противоаварийной автоматики, задействующих не локальные измерения в точке установки, но и глобальные: в масштабе района сети или энергосистемы в целом. В представленной работе сделан обзор существующих подходов к интеграции систем векторных измерений в следующие задачи противоаварийного управления и виды автоматики: автоматическая частотная разгрузка, автоматика ликвидации асинхронного режима, контроль параллельной работы с внешней сетью, автоматика деления сети, управления режимом системы и автоматика предотвращения нарушения устойчивости, идентификация и демпфирование электромеханических колебаний, идентификация и классификация аварийных ситуаций в энергосистеме. Показано, что широкое распространение при решении перечисленных задач сегодня получают различные алгоритмы машинного обучения. Главных препятствий для развития противоаварийной автоматики на базе СВИ можно выделить два: в большинстве работ предполагается избыточность измерений в системе, что не в полной мере соответствует действительности, поскольку число действующих устройств СВИ пока невелико; предлагаемые алгоритмы машинного обучения пока не получили широкого распространения в электроэнергетике в силу субъективных причин, а также трудностей в обучении и тестировании подходов в отсутствии реальных данных от СВИ. Как показано в этой работе, данные с реальных устройств использовались только для решения задачи идентификации и классификации аварийных событий.

Ключевые слова: синхронизированные векторные измерения, противоаварийная автоматика, автоматическая частотная разгрузка, автоматика ликвидации асинхронного режима, автоматика предотвращения нарушения устойчивости, машинное обучение, искусственные нейронные сети

ВВЕДЕНИЕ

Наблюдаемость сети в квазиустановившихся режимах необходима для предотвращения развития аварийных ситуаций и в целом повышения эффективности управления энергосистемами. Особенностью задачи обеспечения наблюдаемости в условиях единства режима и взаимного влияния объектов электроэнергетики оказывается крупномасштабность современных энергообъединений, охватывающих регионы и государства. В этих условиях главной сложностью оказывается обеспечение синхронности измерений, анализ режима должен выполняться на основе данных, полученных для одного и того же момента времени. Развитие глобальных навигационных систем позволило внедрить в электроэнергетике устройства синхронизированных векторных измерений, которые за счет спутниковой связи определяют метки времени для измерений в разных точках системы с точностью не ниже 1 мкс и собирают данные о параметрах режима в векторной форме с заданной дискретизацией.

Постепенное внедрение таких устройств согласно работам [1–3], помимо оценки состояния сети, позволяет решать следующие задачи: верификация динамических моделей энергосистем, мониторинг межсистемных колебаний мощности и поиск их источников, мониторинг максимально допустимых перетоков мощности по контролируемым сечениям и оценка запасов устойчивости, идентификация аварийных ситуаций и локализация повреждений, мониторинг несимметричных режимов, верификация параметров схем замещения элементов систем, развитие систем автоматического регулирования нового поколения и др. Как можно видеть, значительное внимание уделяется задачам анализа именно переходных процессов. Возможность контроля режимных параметров с помощью СВИ в ходе таких процессов позволяет по-новому подойти к исполнению систем противоаварийной автоматики. Характерно, что с целью решения тех же задач векторные измерения внедряются и в распределительных сетях, и в сетях микрогрид, как это отмечено в работах [4, 5]. В таких системах использование измерений фаз токов и напряжений позволяет при условии высокой дискретизации по-новому организовывать системы регулирования, мониторинга устойчивости нагрузки, синхронизации с внешней сетью.

Целью данной работы является обзор существующих направлений применения СВИ при противоаварийном управлении в электроэнергетике, подходов к интерпретации данных и математических методов для выбора управляющих воздействий, а также определение факторов, сдерживающих развитие таких систем.

В первом разделе представлены существующие предложения по развитию автоматической частотной разгрузки на базе СВИ. Во второй части показано, как векторные измерения могут быть использованы при ликвидации асинхронных режимов. В третьем разделе рассматриваются работы, посвященные идентификации изолированной работы сети микрогрид и реализации опережающего деления системы. В четвертой части обзора описаны результаты применения СВИ при идентификации и демпфировании электромеханических колебаний. В пятом разделе внимание уделено организации режимной автоматики и автоматики

© Тащилин В.А., Губин П.Ю., Шакиров М.М., 2022

предотвращения нарушения устойчивости на базе СВИ. Шестая часть обзора посвящена решению задачи идентификации и классификации аварийных событий на базе векторных измерений.

1. Синхронизированные векторные измерения и АЧР

Система автоматической частотной разгрузки (АЧР) является локальной распределенной системой: пусковые и исполнительные органы автоматики распределены по множеству энергообъектов, но каждое устройство принимает решение об отключении на основе местного измерения частоты. Основным направлением, в котором ведутся исследования, является оптимизация отключаемой нагрузки за счет получения большего количества информации о текущем режиме работы энергосистемы.

В [6] приводится обзор нескольких крупных аварий, связанных с недопустимым снижением частоты и повлекших за собой серьезное ограничение потребления. Итогом такого анализа является предложение по применению специальной автоматики отключения нагрузки, которая больше соответствует дополнительной частотной разгрузке в терминах нормативной документации АО «СО ЕЭС». Предложенная в работе система ориентирована на решение задачи стабилизации после отделения одной части энергосистемы от другой. В частности, предлагается использовать данные СВИ для анализа скорости изменения режима за счет контроля величины расчетного сопротивления относительно третьей зоны срабатывания и на основе этой информации корректировать объем отключаемой нагрузки. Происходит своего рода ускорение АЧР за счет оценки скорости изменения режима. При этом также оценивается баланс в каждом из районов, в результате чего предполагается добиться адаптивного действия нового алгоритма.

С другой стороны, в [7] данные СВИ используются для оптимизации отключаемой нагрузки с точки зрения объема и локализации с помощью модели решающих деревьев. Отдельно в работе рассматривается отключение агрегатов, связанных с системами кондиционирования и отвода тепла. Одна из задач работы заключается в минимизации отключения именно такого рода нагрузки, хотя, по данным авторов, она составляет до 32% для бизнеса и домохозяйств. Подход к оптимизации отключаемой нагрузки на основе полных данных об энергорайоне развивается в работе [8], где на основе СВИ предлагается выполнять комплексный анализ режима работы энергосистемы и заранее определять потенциальные для момента времени аварийные дефициты и рассчитывать для них оптимальные ответные действия с точки зрения отключаемых потребителей.

Помимо традиционных крупных электрических сетей, данные СВИ можно использовать для повышения качества управления установками распределенной генерации. В [9] предложен подход по улучшению работы системы ограничения нагрузки именно в сетях с большой долей источников распределённой генерации, для которых характерно применение алгоритмов искусственной инерции. Основная идея аналогична предыдущим работам: анализируется текущий режим работы с точки зрения систем искусственной инерции, оцениваются потенциальные небалансы мощности и затем определяются соответствующие им объемы ограничения потребителей с учетом поведения генераторов.

Также данные СВИ в купе с методами машинного обучения могут использоваться для улучшения работы систем ограничения потребителей при снижении напряжения. Пример такой работы можно найти в [10].

2. Синхронизированные векторные измерения и АЛАР

Автоматика ликвидации асинхронного режима (АЛАР) является важнейшей частью систем противоаварийного управления. Основной ее задачей является выявление асинхронного хода с электрическим центром качаний внутри защищаемой связи. Таким образом, устройство АЛАР должно быть способно не только выявить наличие асинхронного хода, но и локализовать местоположение электрического центра качаний. В отечественной практике последнее достигается за счет выбора соответствующих параметров реле сопротивления, используемых для выявления факта асинхронного хода, либо путем передачи необходимой информации с противоположного конца защищаемой связи.

Также отдельно выделяют АЛАР, устанавливаемый на генераторе, задачей которого является определение наличия асинхронного хода внутри блока, что эквивалентно потере синхронизма этим генератором.

Так как заранее нельзя предсказать, в каком именно сечении случится асинхронный ход, то применение СВИ именно для АЛАР представляется перспективным. Базовым подходом является решение задачи классификации в терминах наличие/отсутствие асинхронного хода внутри исследуемого участка сети и решение задачи классификации по локализации электрического центра качаний (ЭЦК), для чего могут применяться как расчетные методы, так и методы машинного обучения.

Так в [11, 12] предлагается новый подход к аналитическому определению ЭЦК на основе преобразования топологической диаграммы напряжений, в которой напряжения углов остаются неподвижными, а движется нулевая точка, соответствующая ЭЦК при наличии асинхронного хода. Также описывается иерархическая система определения наличия асинхронного хода и локализации ЭЦК с последующим определением оптимального сечения для отделения в зависимости от балансов мощности. Поиск оптимума выполняется с помощью дерева поиска.

В [13, 14] функция АЛАР рассматривается с точки зрения классической задачи классификации. В первом случае для определения наличия асинхронного хода используется модель решающего дерева. Во втором случае функции АЛАР включены в состав представленной в работе многокритериальной защиты линии, основанной на данных СВИ по ее концам.

В [15], напротив, данные СВИ используются для уточнения замеров сопротивлений, что приводит к повышению качества работы автоматики. В [16] и [17] предлагаются подходы к совершенствованию АЛАР, устанавливаемой на генераторе. В первом случае данные СВИ используются для повышения качества работы относительно традиционного подхода к определению асинхронного хода, напоминающего алгоритмы

ЭЦК. Во втором случае для определения асинхронного хода используется наивный байесовский классификатор, обученный на синтезированных данных.

В [18] отмечаются недостатки применения АЛАР на базе устройств СВИ, установленных только по концам защищаемого участка. В частности, работа автоматики станет невозможна при нарушении связи между устройствами или при отказе одного из измерительных комплексов. Для того чтобы использовать преимущества такой схемы АЛАР, в работе предложено повысить безотказность автоматики за счет добавления резервной ступени в виде традиционной АЛАР, работающей по локальным измерениям. При этом наличие векторных измерений позволит актуализировать уставки второй ступени в зависимости от схемы и режима сети.

3. Синхронизированные векторные измерения в задаче идентификации и опережающего деления сети

Идентификация деления и адаптивные виды автоматики опережающего деления сети – два направления развития систем противоаварийного управления, которые получили импульс к развитию от распространения СВИ в системообразующих и распределительных сетях. Идентификация деления – задача, решаемая преимущественно для сетей микрогрид, в которых в зависимости от режима (изолированная или параллельная работа с внешней сетью) должен меняться режим управления распределенной генерацией, либо ступенчато ограничиваться внутреннее потребление. В случае, когда изолированная работа распределенной генерации невозможна, при обнаружении отделения от основной сети генераторы отключаются во избежание асинхронного хода. В свою очередь для системы высоких и сверхвысоких классов напряжения анализ данных от распределенных СВИ позволяет в темпе переходного процесса выбрать районы, которые должны быть отделены от основной сети для сохранения в работе генерирующего оборудования электростанций.

Хоть направление и перспективно, публикаций, посвященных применению СВИ для реализации указанных видов управления, не так много. Во многом это связано с тем, что для микрогрид применение векторных измерений не обязательно: связей с системой немного и их режим работы контролируется более простыми способами. Тем не менее в рамках обзора следует обратить внимание на ряд интересных работ.

В исследовании [19] предлагается алгоритм адаптивного опережающего деления сети на основе данных СВИ. Для оценки необходимости деления сети используется показатель тяжести режима по частоте *FbSI*. Фактически эта величина характеризует ускорение роторов генераторов системы относительно центра инерции сети, но за период от возникновения до устранения возмущения (например, за время до устранения КЗ). На основании подготовленной базы данных *FbSI* о предшествующих режимах по результатам кластеризации выбирается пороговое значение показателя $FbSI_{sev}$, при котором сеть должна быть разделена для сохранения в работе генерирующего оборудования. На **рис. 1** показаны траектории изменения *FbSI* во времени и группировка сценариев по тяжести возмущения в системе.

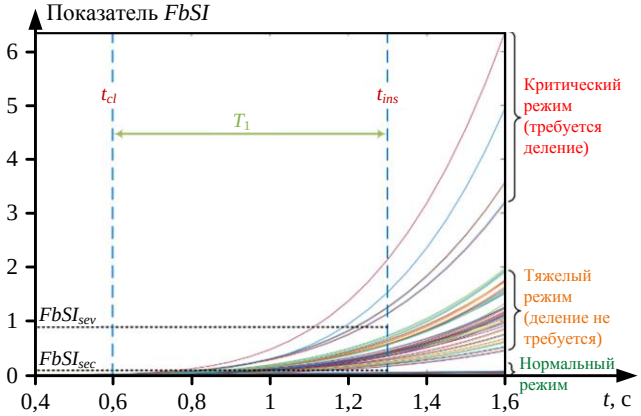


Рис. 1. Траектории изменения *FbSI* для различных сценариев в тестовой энергосистеме и пороговое значение показателя для деления сети

Выбор схем деления сети производится двумя путями: с помощью динамической модели энергосистемы и анализа предаварийных параметров режима, с одной стороны, и с помощью кластеризации измерений углов напряжений узлов для выделения взаимно ускоряющихся групп генераторов – с другой. После проверки предлагаемых схем выбирается та из них, которая, с одной стороны, сохраняет устойчивость оборудования сети, с другой – имеет потенциально наименьший небаланс мощности. Проверка решения проводилась на тестовой модели WSCC и на действующей динамической модели энергосистемы Турции. Во всех случаях предложенный вариант деления сети позволил сохранить в работе оборудование системы. В зависимости от метода кластеризации измерений генераторов время вычислений варьировалось в диапазоне от 0,001 до 0,068 секунд. Такое быстродействие достигается в том числе за счет параллельных вычислений.

Авторы [20] выдвигают гипотезу о том, что отделение сети можно фиксировать по изменению угла между векторами напряжения прямой и обратной последовательности. Таким образом, предлагается установить устройство только в одном узле – на станции отделяемой сети, генераторы которой будут догружаться или разгружаться по результатам оценки режима изолированной части сети. Основным преимуществом такого решения является отсутствие каналов связи и исключение возможности внешних злонамеренных действий для нарушения работы системы. Время, необходимое для идентификации отделения от внешней сети, не превышает 10 мс. При этом для отстройки от коротких замыканий, изменений нагрузки и режима работы компенсации реактивной мощности определяется диапазон углов между векторами, составляющих напряжения, в котором находится угол при отделении сети. Система подаст сигнал на изменение режима работы генераторов только в случае попадания измеренного угла в найденный диапазон.

В работе [21] идентифицируется отделение сети микрогрид, для генераторов которой не предусматривается изолированная работа. Предполагается, что при выявлении режима, в котором система оказывается отделена от внешней сети, её генераторы должны быть отключены во избежание развития аварийной ситуации и возникновения асинхронного хода. Для этого предлагается использовать алгоритм бутстрэп-

агрегирования, который обучается на измерениях, полученных с СВИ, установленных на связях с внешней сетью. Обучающая выборка подобрана таким образом, чтобы все входящие в нее сценарии соответствовали 6-ти условиям работы устройства контроля изолированной работы сети в соответствии со стандартом IEEE 1547–2003: измерение реактивной мощности генерации, короткие замыкания вблизи точки деления сети, наброcы нагрузки, сбросы нагрузки, изменения мощности солнечной генерации, низкое качество измерений. По результатам проверки в 100 тестовых сценариях авторы заявляют 100% точность срабатывания при нулевой зоне нечувствительности алгоритма, что, однако, вызывает сомнения. Тем не менее общий подход к решению задачи перспективен и может быть адаптирован для функции изменения режима работы генерирующих устройств, а не их отключения.

Исследование [22] посвящено разработке алгоритма противоаварийной автоматики опережающего деления сети. Центральной частью алгоритма являются две нейронные сети, каждая из которых решает свою задачу. Первая оценивает динамическую устойчивость системы после возмущения по скорости изменения относительных углов каждого из генераторов системы для двух последовательных измерений в течение 5-ти циклов. Вторая, в свою очередь, осуществляет прогнозирование траекторий изменения углов генераторов системы в течение 15–20-ти циклов. Эта сеть сравнивает траектории с подготовленной заранее библиотекой сценариев, решает задачу классификации и указывает, выйдет ли из синхронизма тот или иной генератор за установленный отрезок времени. Для того чтобы определить, какие нужно произвести переключения, используется алгоритм поиска оптимального деления сети. Согласно данному подходу, на первом шаге выполняется группировка узлов по удаленности от генераторов, которые могут выйти из синхронизма; на втором шаге определяются связи между узлами, которые требуется отключить, чтобы минимизировать небаланс и сумму прерываемых потоков мощности. Алгоритм был протестирован на модели New England-39. Точность его работы составила около 98%.

В работах [23] и [24] предлагается использовать данные от СВИ для идентификации отключений элементов системы и изменения её топологии с помощью нейронных сетей. В частности, в первой статье проводится сопоставление двух методик, позволяющих уменьшить размерность пространства признаков от СВИ на входе нейронной сети, а именно – по дивергенции и с помощью нелинейного анализа главных компонент на базе автоассоциативной нейронной сети. Проверка работы алгоритмов проводилась на 14-узловой тестовой модели IEEE. При этом в ходе тестирования рассматривались только единичные отключения линий в системе. Дивергентный подход к сжатию данных обеспечил меньшую ошибку идентификации режимов – 1,7% против 9,5%. Риск ошибки распознавания возрастает в режимах минимальной нагрузки, когда переток по некоторым линиям снижается до околонулевых значений. Предложенная методика сокращения набора входных данных позволила в работе [24] использовать нейронную сеть для анализа топологии системы, но уже по данным переходного режима от устройств СВИ. Тем не менее и в этой работе авторы не отказываются от исследования только единичных отключений, что ограничивает область применения решения, а также не избавляются от проблемы распознавания отключений слабозагруженных линий и тех, разница фаз напряжений по концам которых минимальна.

В работе [25] предлагается алгоритм оптимального выбора точек размыкания распределительной сети, а также автоматизированного послеаварийного восстановления после нарушения электроснабжения на основе данных от СВИ. Для решения этой задачи анализируется граф сети, выделяются его остовные деревья, выполняется анализ режимов для каждой конфигурации. При аварийном отключении элемента системы выбирается наилучшая схема сети из подготовленного набора с точки зрения режима, исходными данными для которого являются измерения от СВИ.

В сетях микрогрид сдерживающим фактором для развития систем автоматики идентификации деления сети на основе СВИ является их малый масштаб. В большинстве приведенных в обзоре работ предлагаемый алгоритм противоаварийной автоматики реализован для одного выключателя, связывающего малую систему с внешней сетью. Обоснованием для применения СВИ при этом становится не синхронизация измерений, а возможность использования в алгоритмах контроля параллельной работы дополнительных сигналов, таких как, например, фазы напряжений. При этом существует и обратный тренд на развитие систем идентификации изолированной работы строго без СВИ с целью обеспечения кибербезопасности и упрощения принципов работы автоматики.

Применение СВИ для опережающего деления сети может быть более перспективным для случая больших систем и реализации адаптивной делительной автоматики. В таком случае, как это было показано выше, целесообразным становится применение алгоритмов машинного обучения с целью снижения времени принятия решения в условиях развития аварийного сценария. Тем не менее следует отметить специфику данного вида автоматики. Так, реализация именно адаптивного алгоритма деления системы, вероятно, необходима в тех случаях, когда затруднительно выделить потенциально сбалансированные районы заранее. Это возможно, например, при значительной доле ВИЭ в составе генераторов. Кроме того, делительная автоматика действует в ситуациях, когда другие меры по сдерживанию развития аварии исчерпаны. В этих условиях важно протестировать потенциальный алгоритм на реальном сценарии, что в рассмотренных работах не осуществлялось.

Таким образом, целесообразность идентификации деления сети с применением СВИ спорна. Для сетей микрогрид масштаб решаемой задачи зачастую слишком мал. Для объединенных энергосистем, в свою очередь, требуются дополнительные исследования, направленные на проверку алгоритмов ПА в реальных условиях с учетом низкого качества данных, а также оценка последствий ошибочной работы таких систем.

4. Синхронизированные векторные измерения в задаче идентификации и демпфирования электромеханических колебаний

Выявление и демпфирование электромеханических колебаний, вероятно, одно из самых подходящих направлений применения СВИ, поскольку собираемые данные позволяют контролировать динамику в районе энергосистемы в целом, наблюдать и выявлять различные колебательные моды, относящиеся как к собственным, так и межсистемным колебаниям.

В [26] предложен подход, решающий задачу определения источника незатухающих низкочастотных колебаний. В отечественной практике аналогичную задачу решает система СМПР, но в отношении только синхронных генераторов. Определение источника колебаний выполняется с помощью обученного классификатора по методу *k*-ближайших соседей. Обучающая выборка была сформирована на основе моделирования различных процессов в тестовых системах путем искусственного провоцирования колебаний разными устройствами. Для работы системы предполагается, что каждый генератор оснащен устройством передачи данных СВИ. В работе рассматривалось окно наблюдения продолжительностью 5 секунд при частоте семплирования измерений 25 Гц. Алгоритм показал точность определения источника колебаний выше 96% для случая схемы IEEE-179 узлов, содержащей 29 генераторов. В ситуациях неверного определения источника выявляемый агрегат все равно был электрически близок к реальному источнику, что так или иначе сокращает область поиска.

Логичным продолжением исследований в данном направлении является разработка методов демпфирования электромеханических колебаний, основанных на данных СВИ. В [27] предложен подход к адаптивному выбору параметров PSS, основанный на методах машинного обучения и данных СВИ. В частности, предлагается использовать обученную модель случайного леса для идентификации двух основных колебательных мод. Параметры регулятора в дальнейшем выбираются таким образом, чтобы наиболее эффективно демпфировать именно эти колебательные моды. Выбор модели случайного леса авторы обосновывают тем, что традиционные методы, например Прони или дискретное преобразование Фурье, часто требуют большое окно наблюдения, что увеличивает время реакции, кроме того, они обеспечивают достаточно хорошую точность путем оценивания моделей высокого порядка, что может приводить к нежелательным артефактам в данных. Проверка работы предложенного алгоритма на стандартной четырехмашинной модели Кундура показала хорошие результаты с точки зрения демпфирования. В рамках данного подхода данные СВИ должны обеспечивать наблюдаемость сети и используются для обучения модели идентификации колебательных мод методом обучения с учителем.

Безусловно, данные СВИ являются инструментом не только для выявления источников низкочастотных колебания, но и для их демпфирования. Так, в [28] предложен подход для демпфирования колебаний, основанный на применении агента, обученного методами обучения с подкреплением. При этом предлагается использовать небольшой по амплитуде сигнал для исследования динамики энергосистемы, а обучение автоматического регулятора возбуждения (АРВ) генератора происходит на основе выявленной динамики.

Наряду с регуляторами возбуждения для демпфирования колебаний могут использоваться и статические компенсаторы реактивной мощности. В [29] рассматривается как раз такой подход. В работе в качестве средства управления рассматривается модель нейронной сети с применением нечеткой логики. А в [30] для демпфирования колебаний и управления режимом работы распределительной сети предлагается использовать не только средства компенсации, но и зарядные станции для электромобилей: опять же в качестве дополнительных источников именно реактивной мощности. В работе также рассматриваются различные сценарии использования предложенного алгоритма, в том числе при разных сценариях оснащения сети устройствами СВИ.

В [31], напротив, показано, что простая синхронизация устройств АРВ позволяет повысить качество демпфирования электромеханических колебаний просто за счет того, что управляющие воздействия и измерения поступают в устройства синхронно в одни и те же моменты времени, то есть устройства АРВ реагируют на систему, находящуюся в одном и том же состоянии. В работе показано, что в отдельных случаях эффект от такой синхронизации может оказаться существенным и сохранить устойчивую работу энергосистемы.

В работе [32] нейронные сети используются для выбора коэффициентов АРВ с целью снижения вычислительных затрат по сравнению с применением методов оптимизации. Параметры определяются для регулятора АРВ-МТ и системного стабилизатора PSS2B. Результаты исследования показывают, что для АРВ-МТ погрешность расчета коэффициентов не превышает 8%. Наличие шума в данных измерений приводит к увеличению погрешности вплоть до 35%. При этом для принятых к рассмотрению схем нейронных сетей включение в обучающую выборку зашумленных данных не приводит к существенному улучшению результатов. Тем не менее следует отметить перспективность данной разработки – нейронная сеть позволяет определять коэффициенты АРВ практически мгновенно и предоставляет возможность корректировать их в темпе переходного процесса.

Наконец, в исследовании [33] предложено три метода оценки участия синхронного генератора в демпфировании низкочастотных колебаний. Все три метода на основании различных наборов данных от СВИ предполагают оценку удельной синхронизирующей мощности генератора – частной производной мощности синхронной машины по её углу нагрузки. В первом случае эта величина оценивается непосредственно для каждого момента времени. По второму методу угол нагрузки рассчитывается по проектным параметрам и заводским характеристикам генератора. В последнем случае при наименьшем разнообразии данных от СВИ используются выражения для второго метода, но параметры считаются постоянными и не зависящими от нагрузки и тока возбуждения. Анализ траектории удельной синхронизирующей мощности позволяет

выполнить оценку качества работы регуляторов. Тем не менее авторы отмечают, что погрешность, вносимая в результат расчета принятыми допущениями, может быть оценена только по результатам натурных экспериментов.

5. Синхронизированные векторные измерения в задаче управления режимом и автоматике предотвращения нарушения устойчивости

Одним из следствий применения СВИ для демпфирования электромеханических колебаний является создание локальных и централизованных систем управления режимом работы энергосистемы и предотвращения нарушения устойчивости. В [34] предложен метод регулирования напряжения в сети с помощью устройств FACTS. Управление основано на идентификации динамической модели энергосистемы по данным СВИ и расчете необходимых управляющих воздействий для поддержания напряжения. В результате удается гораздо эффективнее бороться с просадкой напряжения в случае различных возмущений. А в [35] для управления режимом энергосистемы используются методы обучения с подкреплением.

В работе [36] предложена схема оптимального размещения СВИ и оценки состояния сети, обеспечивающая минимальное время расчета режима при меньшем количестве исходных измерений по сравнению с зарубежными методиками. Ускорение обеспечивается за счет перестановки строк в матрице проводимостей сети для формирования в ней треугольных подматриц. Это позволяет вместо процедуры обращения матрицы выполнять последовательное решение уравнений системы, поскольку в них содержится только одно неизвестное. Проверка алгоритма проводилась на тестовых моделях IEEE14 и IEEE118, а также на схемах польской энергосистемы. В случае IEEE118 для выполнения расчета вместо 32-х, как это показано в прочих работах, требуется установка 28-ми СВИ. Предложенная схема за счет своего быстродействия может быть применена для расчета необходимого объема управляющих воздействий противоаварийной автоматики. В исследовании [37] также предлагается подход к выбору дозировки управляющих воздействий автоматики и мониторингу устойчивости энергосистемы, но на основе динамического эквивалента. Данный эквивалент идентифицируется по данным от СВИ с помощью модели пространства состояний, вследствие чего получаемая модель эквивалентна линеаризованной по отношению к реальной динамической модели энергосистемы. Методика проверялась на модели трехузловой сети, входными данными для эквиваленты были механические мощности турбин, выходными – напряжения в узлах системы.

В работе [38] исследуются результаты работы алгоритма оценки состояния для выбора дозировки управляющих воздействий АПНУ при различных наборах данных измерений. В частности, рассматриваются три случая: оценка состояния по данным телеизмерений, по модулям и фазам напряжений от СВИ, по модулям и фазам напряжений и токов от СВИ. На базе моделей IEEE14 и схеме ОЭС Урала 500–220 кВ показано, что, несмотря на большее быстродействие, оценка режима по телеизмерениям приводит к ошибке в оценке объема необходимых управляющих воздействий. Тем не менее в рассматриваемых случаях расчетные коэффициенты напряженности режима сети практически одинаковы, что позволяет проводить оценку состояния по телеизмерениям и только при превышении коэффициента напряженности режима порогового значения проводить повторный расчет по данным от СВИ.

Отдельно следует выделить работы, посвященные определению на основе СВИ объема разгрузки генерации для предотвращения нарушения динамической устойчивости [39–42] в темпе переходного процесса. Иными словами, предлагается использовать данные СВИ для построения автоматики, которая определяет необходимое изменение мощности генерации в узле в период от момента возникновения аварийного режима до возникновения асинхронного режима. Так, в работе [39] предложен алгоритм прогнозирования траекторий угла и скольжения по отдельной передаче, по которым определяется минимально возможная разгрузка в примыкающем узле генерации или нагрузки. Исследование [40] также предлагает метод экспресс-оценки параметров электрического режима для последующего использования полученных значений при решении задачи разгрузки турбин генераторов с целью предотвращения нарушения устойчивости. Данный подход основан на аппроксимации сигнала первыми членами ряда Фурье на скользящих окнах с помощью многопараметрической модели. В работе на примере одномашинной модели ЭЭС показано, что предложенная методика позволяет оценивать параметры динамического процесса с задержками от 3 до 5 мс при ошибке в оценке параметра, не превышающей 1%. Полученные результаты используются в работах [41, 42] соответственно для одномашинной и многомашинной систем для реализации противоаварийного управления режимами синхронного генератора. В частности, по результатам оценки параметров режима, идентификации возмущения и послеаварийного режима оценивается добавочная кинетическая энергия ротора генератора, прогнозируется его режим работы и определяется необходимость противоаварийных воздействий: либо импульсная разгрузка турбины, либо в случае неизбежной потери синхронизма – отключение генератора.

6. Синхронизированные векторные измерения в задаче идентификации и классификации аварийных событий

В задаче идентификации и классификации событий исходным является набор измерений от СВИ, установленный в разных точках сети, по которому следует определить возникновение в системе аварийной ситуации, место аварии и её источник, тип возмущения. Ответы на эти вопросы позволяют принять своевременные меры для предотвращения развития локальных происшествий в системные аварии. При этом алгоритмы машинного обучения, которые в этом направлении противоаварийного управления играют ключевую роль, позволяют решать поставленную задачу в темпе реального времени. Следует понимать, что быстрые предварительные идентификация и локализация событий необходимы для реализации любого вида адаптивной автоматики.

В отличие от других решаемых с помощью СВИ задач противоаварийного управления, разрабатываемые для классификации событий методики проверяются на реальных измерениях.

В первом исследовании [43] разрабатывается модель для распознавания и классификации событий, которую можно обучить на реальных данных, и выполняется проверка точности её работы в зависимости от подхода, примененного для разметки данных обучающей выборки, а именно быстрой, средней и полной разметки. Анализировались измерения напряжений, токов и частоты в точках западного энергообъединения США за 2016 и 2017 годы с частотой 30 и 60 измерений в секунду. События разделяются на три категории: нормальный режим, КЗ на линии и системное отклонение частоты. Эти три группы, как можно видеть, охватывают большое число видов событий. Такой нестрогой типизации авторы придерживаются, поскольку одной из целей считают проверку возможности детектирования и разделения локальных и системных аварийных событий на основе ограниченного набора данных от СВИ. В работе рассматриваются различные подходы к разметке данных и сравниваются инструменты для классификации: дерево решений (DT), мультиномиальная логистическая регрессия (MLR), нейронная сеть с прямым распространением сигналов (FFNN), одноканальные свёрточные нейронные сети (SC-CNN), многоканальные свёрточные нейронные сети (MC-CNN). Все решения, кроме последних двух, авторы относят к традиционным. Как показали результаты, наибольшая точность оценки – 91,1% – достигается при использовании многоканальной нейронной сети с параллельной фильтрацией в случае полного анализа обучающей выборки на этапе разметки измерений от СВИ. По мере снижения качества обучения снижается и точность работы – 88,4 и 83,3% для быстрой и средней разметки соответственно. Важно отметить, что из традиционных методов лучше всего себя показывает метод опорных векторов, точность результатов которого приемлема и оценивается в 83,7, 79,8 и 77,0% соответственно. При этом данное решение значительно проще в реализации.

В работе [44] того же коллектива авторов реализовано обучение с переносом (LocIT) для идентификации аварийных событий в условиях, когда обучающая выборка невелика, а СВИ распределены по системе. Для построения модели также использовались реальные данные за 2016 и 2017 годы для западной части энергосистемы США. Для проверки результативности реализации предлагаемого метода его эффективность также сравнивалась с другими решениями, в том числе алгоритмами, не требующими обучения, такими как методы *k*-ближайших соседей (kNN) и ближайших изолированных групп (iNNE). Работа помимо демонстрации высокой точности идентификации событий с помощью обучения с переносом (порядка 93%) описывает, как влияют на результаты обучения и идентификации размер окна наблюдения за переходным процессом и объем обучающей выборки. На **рис. 2–4** показана ошибка при идентификации событий в зависимости от ширины окна и доли обучающей выборки в общем массиве данных. Здесь помимо результатов для LocIT показаны значения для kNN, метода kNN с подкреплением (SKNNO) и многослойного перцептрона (MLP).

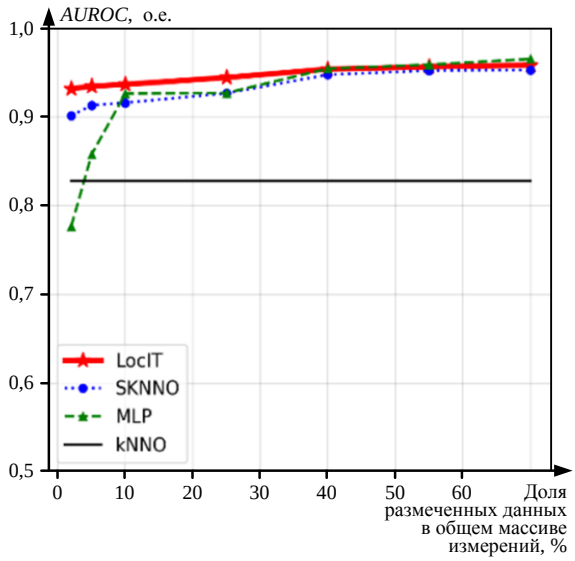


Рис. 2. Ошибка идентификации событий AUROC в зависимости от доли размеченных данных в общей выборке при ширине окна 2 секунды

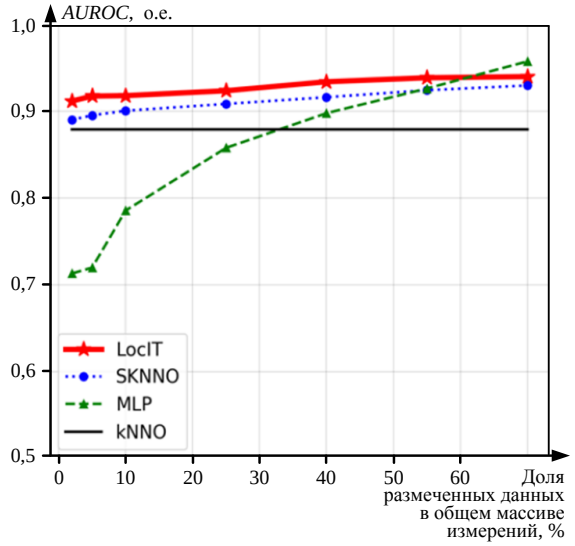


Рис. 3. Ошибка идентификации событий AUROC в зависимости от доли размеченных данных в общей выборке при ширине окна 30 секунд

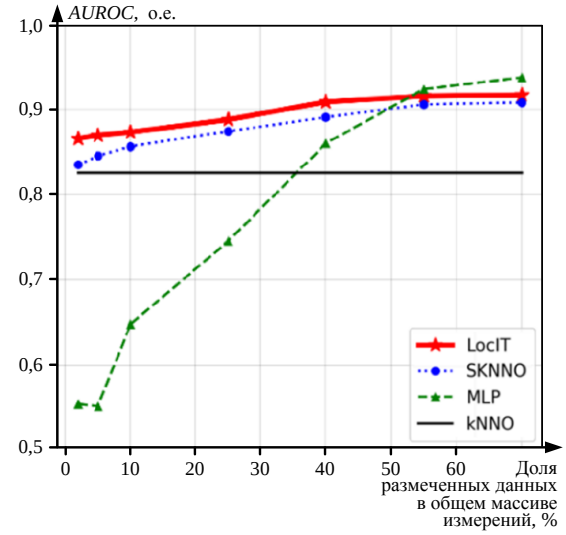


Рис. 4. Ошибка идентификации событий AUROC в зависимости от доли размеченных данных в общей выборке при ширине окна 1 минута

Результаты исследования позволяют сделать вывод о том, что при ограниченном объеме обучающей выборки лучше ограничить ширину окна наблюдения. Также очевидна и эффективность применения в таком случае обучения с переносом.

В работе [45] предлагаются методики выявления и классификации событий в распределительной сети по данным СВИ. В частности, был применен алгоритм машинного обучения SVM, который далее сравнивался с методами kNN и DT. Для разметки данных использовалась реальная информация от электроснабжающих организаций и их экспертные оценки событий: классификатор обучался на данных за 15 дней от двух устройств по концам фидера распределительной сети области Риверсайд. Для обучения использовались измерения тока, напряжения, а также перетоков активной и реактивной мощности. Много внимания в исследовании уделено использованию скользящего окна переменной величины для лучшего улавливания событий в сети. Методика предполагает локализацию области источника возмущения с питающей стороны, со стороны потребителя и между точками установки СВИ. При этом типизация событий производится только для третьего случая и выделяются следующие сценарии: резкие изменения потребления, переключения БСК, и прочие события, к которым относят, например, КЗ. Расчеты показывают, что точность детектирования, локализации и классификации событий для всех алгоритмов оказывается высокой – на уровне 95%, но для метода SVM достигает 100%.

В исследовании [46] предлагается реализация нейронной сети глубокого обучения для идентификации и классификации событий в режиме реального времени. Авторы предлагают методику обработки данных для повышения результативности обучения свёрточных нейронных сетей, а также описывают алгоритм регуляризации для реализации глубокого обучения. Обученная сеть выявляет события и разделяет их на категории: отсутствие возмущений, переключения линий, переключения генераторов и качания генераторов. Работа помимо сложной и эффективной модели машинного обучения представляет интерес экспериментальной частью, в которой тестирование модели производится на двухлетних измерениях частот, мощностей, токов и напряжений от 187 СВИ, установленных в сети восточного энергообъединения США. С учетом низкого качества ряда измерений предложенная методика даёт точность идентификации не меньше 93%. При этом, хотя обучение нейронной сети занимает более трех часов, для выполнения классификации в реальном времени требуется всего 0,085 секунды.

В исследовании [47] предлагается метод классификации событий, связанных с отклонениями частоты с помощью данных СВИ. Авторы рассматривают данную проблему с позиции оператора распределительных сетей, которому для принятия решений в условиях аварийных событий требуется быстро устанавливать источник возмущения. В частности, вопрос состоит в том, вызвано ли изменение частоты внешним возмущением в сети высокого напряжения или его причина – изменение режима работы электроприемников и источников фидеров контролируемой распределительной сети. В первом случае, как отмечают авторы, возмущение носит широкомасштабный характер и отражается сразу на всех измерениях СВИ, что и служит критерием для разделения событий. Для выявления источника в исследовании используют причинность по Грэйнджеру и фильтр Ходрика-Прескотта. Проверка предложенного решения проводится на базе данных, предоставленных Национальной лабораторией Беркли и Энергоснабжающей компанией Риверсайда, об измерениях с трех фидеров в период с июля по сентябрь 2015 года. Для обработки данных используется методика разряженного кодирования с обучением, а для кластеризации событий применяется метод *k*-средних.

Значительное число работ также рассматривает возможность идентификации и классификации событий, но не проверяет работоспособность предлагаемых методик на реальных данных. Результаты в таком случае зависят от способа генерации искусственных измерений и учета низкого качества данных от фактических СВИ, поскольку тестовой моделью служат стандартные энергосистемы.

Исследование [48] посвящено решению задачи классификации коротких замыканий в распределительной сети. Работа отличается большим количеством типов в классификации. В частности, выделяется 34 разновидности событий, среди которых 11 типов замыканий, обрывы с питающей стороны и со стороны нагрузки. В качестве классификаторов событий используются алгоритмы машинного обучения k-NN, SVM, NN и LDA. Их обучение проводится на измерениях СВИ до, после и во время возмущения: токи и их фазы, а также параметры прямой, обратной и нулевой последовательностей. Для формирования обучающей выборки было смоделировано более 26 тысяч различных возмущений в тестовой модели IEEE-123 на классе напряжения 4 кВ. При этом было рассмотрено всего два случая – установка одного или пяти устройств СВИ, а возмущения моделировались только в 8-ми точках сети. В отличие от прочих исследований, использование обученных алгоритмов в среднем дало невысокую точность классификации – на уровне 50%, хотя для отдельных видов КЗ эта характеристика достигает 90%. Наилучшие результаты при этом дали малые нейронные сети и SVM.

В работе [49] предложена сложная структурная модель нейронной сети глубокого обучения, задача которой заключается в поиске и локализации возмущений в электрической сети с последующей их классификацией. Для выявления событий или, как они именуются в работе – аномалий, авторами предлагается использовать автокодировщик. В качестве тестовых данных используется непрерывный поток СВИ. При изменении условий работы модель способна со временем переобучаться и адаптироваться к новым режимам. Проверка модели производилась на тестовых системах IEEE-14, IEEE-68, а также на 9-узловом фрагменте реальной системы с действительными измерениями за 6 часов с частотой 60 точек в секунду. Для синтетических моделей точность детектирования и распознавания событий составила в среднем 97%.

В статье [50] предлагается алгоритм классификации событий для мониторинга в реальном времени

динамической устойчивости системы с помощью СВИ. Авторы предлагают по результатам измерения частоты в отдельных узлах рассчитывать показатель динамической устойчивости генераторных узлов системы CRAS. Данный коэффициент фактически отражает ускорение углов генераторного узла относительно центра инерции системы и для генераторного узла k рассчитывается по формуле

$$CRAS_k = \sum_{s=1}^{S} \left| \frac{\omega_k^s - \omega_k^{s-1}}{\Delta t} - \frac{\omega_{COI}^s - \omega_{COI}^{s-1}}{\Delta t} \right|, \quad (1)$$

где ω_k^s и ω_k^{s-1} – угловые скорости генератора в узле k соответственно для последовательных измерений s и s-1, рад/с; Δt – разница во времени измерений s и s-1 от СВИ, с; ω_{COI}^s и ω_{COI}^{s-1} – угловые скорости центра инерции системы соответственно для последовательных измерений s и s-1 , которые для системы с N генераторами определяются как

$$\omega_{COI}^s = \frac{\sum_{i=1}^{N} H_i \omega_i}{\sum_{i=1}^{N} H_i}, \quad (2)$$

где H_i – постоянная инерции генератора i, с; ω_i – угловая скорость генератора i, рад/с.

Соответственно, если CRAS оказывается больше нуля, то в системе фиксируется событие, и, чем это отклонение больше, тем существеннее возмущение в сети. Для распознавания событий и их классификации используется алгоритм случайного леса. Размер скользящего окна для оценки переходного процесса – 18 циклов, а время, необходимое для распознавания события, – 0,35 с. Измеряемыми величинами являются напряжения узлов и их частота. Распознаются при этом 4 вида событий: двойное КЗ с отключением узла, однократное КЗ с отключением линии, отключение нагрузки, отключение генерации. В ходе вычислительного эксперимента в качестве обучающей выборки используются 1456 сценариев для IEEE-39 и 4256 – для IEEE-118. Точность распознавания и классификации событий с помощью предложенной методики достигает 97,95%, что выше, чем для других подходов машинного обучения, с которыми в работе производится сравнение: SVC – 76,71%, MLP – 67,47%, kNN – 77,05%, DT – 93,49%. Следует, тем не менее, отметить, что авторы не выполняют проверку робастности описываемого алгоритма и не рассматривают случаи работы с данными низкого качества или со скользящим окном меньшего размера. По этой причине результаты моделирования можно считать чрезмерно оптимистичными для реальных сценариев.

В работе [51] авторы рассматривают проблему локализации вынужденных колебаний и обработки СВИ для их выявления. Как известно, такие колебания могут быть спровоцированы крупными резкопеременными нагрузками, некорректной настройкой регуляторов возбуждения и PSS, сбоями в работе тепловой части станций и преобразователей возобновляемых источников энергии. Авторы указывают на проблему, связанную с тем, что источник колебаний может быть сильно удален от места установки СВИ, и в этой связи предлагают методику его локализации в условиях, когда число установленных СВИ в системе ограничено. Для этого предлагается использовать робастный метод главных компонент и с его помощью выполнить декомпозицию матрицы измерений. Предложенная методика использует только данные измерений, не требует наличия динамической модели и может выявлять источники колебаний даже в условиях резонанса. Реализация в реальном времени возможна методом скользящего окна. Проверка работы алгоритма проводилась для тестовых моделей IEEE-68 и WECC-179 и соответственно в 97 и 93% случаев он дал корректный результат. Точность идентификации зависит от ширины скользящего окна T_0, как это показано на **рис. 5**. Также на неё оказывает сильное влияние качество данных и вид измеряемого параметра. Так, при попытке выявить колебания только по модулю напряжения результативность применения методики снизится на 10%, при использовании только его фазы – на 50%.

В статье [52] также предлагается двухэтапная методика оценки в реальном времени участия генераторов в колебательных режимах. На первом этапе выполняется распознавание данного вида режимов, на втором – решается задача их кластеризации. В частности, выделяются группы генераторов, колебания которых не затухают либо, наоборот, усиливаются. Для скользящего окна, длину которого авторы предлагают принять равной 0,3 секундам, с помощью метода пучка матриц оценивается преобладающий вид колебаний для каждого генератора. Исходными данными являются измерения относительных углов роторов генераторов от СВИ на станции. На этом же шаге выполняется фильтрация несуществующих режимов, шума и т.д. Далее выполняется кластеризация генераторов по методу k-средних. При этом категории для генераторов две – самораскачивание/устойчивые колебания и затухающие колебания. Применение кластеризации в данном случае является спорным, поскольку на первом шаге процедуры оценивания качества колебаний роторов генераторов системы относительно друг друга уже дается количественная оценка этой характеристики.

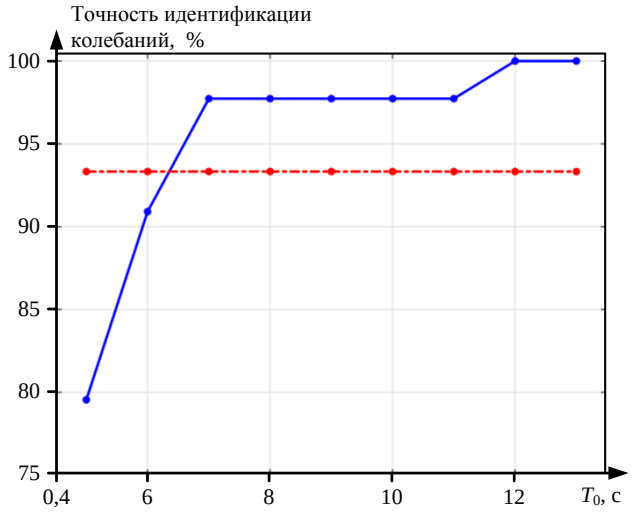


Рис. 5. Точность идентификации колебаний для тестовых систем IEEE-68 (синяя линия) и WECC-179 (красная линия)

В работе [53] предлагается решение по идентификации событий на основе регионального деления системы. Идея заключается в том, чтобы сгруппировать данные от отдельных СВИ по областям энергосистемы и выполнять обучение нейронной сети и кластеризацию не для отдельных точек сети, а по каждой её области отдельно, что должно привести к меньшим вычислительным затратам и позволить использовать методику для принятия решений в реальном времени. Для кластеризации СВИ между зонами энергосистемы используется метод *k*-средних. Фактически критерием кластеризации является удаленность точек измерения друг от друга, которую авторы оценивают по разнице измеряемых модулей напряжений между различными точками сети. В качестве измеряемых величин рассматриваются напряжение и частоты, а для выявления признаков событий используется вейвлет-преобразование, метод характеристического эллипса и анализ изображений. Результаты применения первых двух подходов используются в качестве обучающей выборки для SVM, kNN и DT. В последнем случае для анализа изображений обучается свёрточная нейронная сеть. Тестирование методики выявления признаков событий с помощью вейвлет-преобразования при разбиении сети по регионам выполнялось на 68-узловой тестовой модели New England. Выделялось при этом 6 категорий событий: отключение линии, провал напряжения, отключение генерации, отключение нагрузки, короткое замыкание и изменение режима работы средств компенсации реактивной мощности. Точность классификации событий всеми методами оказалась высокой (больше 93%), а для предлагаемого подхода достигла 99,77%. Иными словами, практически во всех сценариях метод дал верный результат и это подчеркивает недостаточное внимание авторов к проверке работоспособности решения при некачественных данных, изменении размера скользящего окна и т.д. и ставит под сомнение полученные результаты.

Если говорить об эффективности группового анализа СВИ, то по данным, представленным в работе, он дает кратное преимущество по времени расчета, хотя и обуславливает дополнительную погрешность. На **рис. 6** представлены зависимости времени и погрешности расчета от числа выделенных регионов энергосистемы.

В свою очередь, в статье [54] рассматривается проблема применения алгоритмов машинного обучения для решения задач противоаварийного управления для реальных энергосистем при недостаточности данных для формирования обучающей выборки. Авторы предлагают использовать механизм обучения с переносом и проводить расчеты для двух моделей сети: базовой модели, по которой имеются избыточные данные для обучения, и целевой, имеющей возможно иное число точек установки СВИ. Таким образом, проверяется гипотеза о том, что алгоритм, обученный на тестовой модели, может быть применен для классификации событий в других сетях. При обучении на тестовых моделях рассматриваются события отключения линий и генераторов, короткие замыкания, отключения нагрузки и отказы трансформаторов. В ходе проверки вычислительные эксперименты проводились для моделей IEEE-14, Illinois-200, South Carolina-500. Для этих моделей попарно выполняется обучение с переносом при случайных местах установки СВИ и соотношении их числа для базовой и целевой систем соответственно 8 к 1.

В этих условиях средняя точность классификации событий при использовании предлагаемой методики достигает 81,7%.

В работе [55] выделен набор признаков, по которым на основании данных от СВИ, может быть определен вид события, произошедшего в энергосистеме. В качестве таких событий рассматриваются все разновидности коротких замыканий в зависимости от режима работы нейтрали сети, а также событие изменения уставки регулятора возбуждения генераторов. Тестирование алгоритма на реальных данных от СВИ дало хорошие результаты, но следует обратить внимание на то, что как представляется предложенный алгоритм, построенный на выделенных особенностях отдельных видов аварийных ситуаций. Не позволяет, во-первых, локализовать источник аварийного события, а во-вторых, становится менее эффективен при увеличении масштабов системы. Также не все виды событий могут быть однозначно и безошибочно типизированы. Например, описать с помощью четкой логики разницу между увеличением уставки генератора и вводом в работу системы компенсации реактивной мощности в такой схеме может оказаться затруднительно.

Исследование [56] развивает предложения, изложенные в предшествующей работе и, в частности, предлагает решение по типизации видов коротких замыканий и обрывов в сети. Описан также подход к их локализации по принципу: чем ближе устройство СВИ к точке возмущения, тем в большей мере проявятся признаки этого возмущения и тем больше будет изменение производной частоты по времени. Тем не менее, даже используя такой подход, однозначно локализовать место повреждения затруднительно. Особенно в условиях, когда устройства СВИ установлены не в каждом узле, что более чем типично для данного вида измерений.

Главным трендом в развитии идентификации и классификации событий является применение методов машинного обучения. При этом, несмотря на то, что методы глубокого обучения нейронных сетей в среднем дают лучшие результаты, в ряде работ была показана и эффективность более простых решений, в частности метода SVM. Это важно, поскольку, как отмечалось выше, любая система ПА должна распознать событие прежде, чем реализовывать управляющие воздействия. Интегрирование более простого и надежного вспомогательного алгоритма дает возможность дополнительно снизить трудозатраты и упростить систему в целом без потерь в качестве.

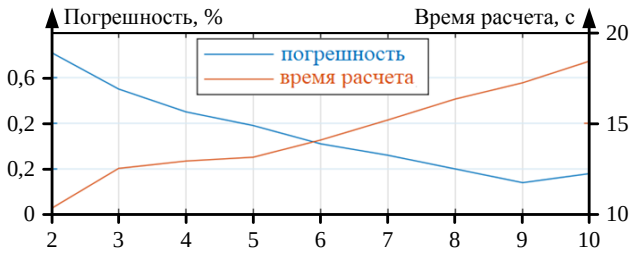


Рис. 6. Точность классификации событий в зависимости от числа групп СВИ или зон энергосистемы

Следует обратить внимание на существенное влияние на результаты происхождения обучающей и тестовой выборки при проверке работоспособности алгоритмов. Обзор статьей показал, что в среднем работа с синтетическими данными приводит к более высокой точности работы средств идентификации и классификации. Соответственно, можно говорить о завышении оценок и необходимости верификации на реальных данных.

Среди методов машинного обучения следует выделить обучение с переносом. Этот инструмент позволяет при ограниченной величине обучающей выборки обеспечить высокую точность распознавания.

Таким образом, при разработке решений, направленных на идентификацию и классификацию событий в реальном времени, следует: учитывать фактор некачественных измерений, из-за чего точность работы систем может резко снижаться; проверять работу алгоритмов на реальных измерениях; не усложнять алгоритмы и обращаться в первую очередь к простым и отработанным решениям – таким, как метод SVM; при малой обучающей выборке применять обучение с переносом и уменьшать ширину скользящего окна при оценке переходного процесса в энергосистеме.

Применение данных СВИ для улучшения алгоритмов противоаварийного управления является одним из наиболее перспективных и активно исследуемых направлений. В первую очередь это связано с тем, что данные СВИ предоставляют более комплексное понимание о протекающих в энергосистеме процессах, в результате чего становится возможным принимать более взвешенные и в определенном смысле оптимальные решения с точки зрения преодоления аварийных событий.

В то же время собранные или синтезированные данные СВИ являются прекрасным полем для экспериментов по применению методов машинного обучения для управления энергосистемой. С одной стороны, такие методы имеют теоретическую возможность к выделению неочевидных зависимостей в имеющихся данных, соответственно, такие системы теоретически способны работать более эффективно, чем существующие, основанные на традиционных строгих подходах. С другой стороны, СВИ позволяют собирать данные о состоянии энергорайона в целом, где выделить какие-то объективные характеристики может оказаться не так просто, а методы машинного обучения в силу своей природы смогут это сделать.

Заключение

Несмотря на то, что во многих статьях получен положительный результат, подавляющее большинство работ основано на синтетических данных СВИ, полученных в ходе математического моделирования. В целом внутри теории машинного обучения задача переноса обучения является одной из наиболее актуальных на сегодняшний день. Вследствие чего нельзя однозначно предсказать качество работы предлагаемых систем при их применении на практике с использованием реальных данных. Единственное направление, для которого опубликованы результаты, основанные на реальных данных, – задача классификации событий.

Соответственно, дальнейшее развитие систем противоаварийного управления должно быть направлено на применение методов на реальных или приближенным к ним данных. При этом интерес к разного рода системам управления отвечает особенностям работы магистральных и распределительных сетей. Перенося собранную на основе обзора информацию в отечественные реалии, можно сделать вывод, что задача анализа и демпфирования колебаний представляет наибольший интерес. Такой вывод можно сделать на основе активной деятельности Системного Оператора по развитию и внедрению систем мониторинга переходных процессов и работы системных регуляторов.

На основе представленного обзора литературы и информации о деятельности АО «СО ЕЭС» можно выделить два основных ограничения для активного внедрения технологий СВИ в функции противоаварийной автоматики. Первое ограничение заключается в малом количестве существующих устройств СВИ, установленных на объектах ЕЭС России. Многие работы предполагают наличие избыточности измерений для выполнения анализа и решения заявленных задач.

В работах, посвященных анализу переходных процессов, предполагается, что устройства СВИ размещены на всех генерирующих узлах внутри рассматриваемого энергорайона. Соответственно, активное внедрение алгоритмов управления на основе СВИ станет возможным лишь после более широкого распространения данных устройств.

Второе ограничение в большей степени относится к методам, основанным на технологиях машинного обучения, и связано с субъективным недоверием к такого рода подходам. В самом деле, поскольку зачастую обученные модели оказываются трудноинтерпретируемыми, то нельзя однозначно предсказать, какое решение будет принято в той или иной ситуации и по какой именно причине. Это обуславливает существующий скепсис, что может быть разрешено применением более жёстких требований и критериев на этапе внедрения.

Представленные результаты являются итогом работ по теме «Разработка интеллектуальных алгоритмов управления энергосистемой на основе синхронизированных векторных измерений» в рамках комплексного проекта «Разработка систем управления энергосистемой с применением интеллектуальных алгоритмов и СМПР».

Список источников

1. Мокеев А.В. Повышение надежности и эффективности работы энергосистем на основе технологии синхронизированных векторных измерений // Электричество. 2018. №3. С. 4-10. doi: 10.24160/0013-5380-2018-3-4-10.
2. Применение технологии синхронизированных векторных измерений для управления, защиты и автоматики / А.В. Мокеев, В.Н. Бовыкин, Е.И. Хромцов, А.В. Миклашевич, А.И. Попов, А.В. Родионов, Д.Н. Ульянов // Релейщик. 2019. № 3(35). С. 32-37.
3. Климова Т.Г., Максимов Б.К. Устройства синхронизированных векторных измерений: характеристики, тестирование и использование // Релейщик. 2018. № 2(32). С. 32-39.
4. Климова Т.Г., Ревякин В.А. Возможности применения устройств синхронизированных векторных измерителей в распределительных сетях // Электроэнергия. Передача и распределение. 2020. № 6(63). С. 110-115.

5. Dusabimana E., Yoon S-G. A Survey on the Micro-Phasor Measurement Unit in Distribution Networks // Electronics. 2020. 9(2). 305. doi: 10.3390/electronics9020305
6. Boussadia F., Belkhiat S. A new adaptive underfrequency load shedding scheme to improve frequency stability in electric power system // Journal Européen des Systèmes Automatisés. 2021. Vol. 54(2). Pp. 263-271. doi: 10.18280/jesa.540208
7. A frequency control technique based on decision tree concept by managing thermostatically controllable loads at smart grids / M.M. Eissa, A.A. Ali, K. Abdel-Latif, A.F. Al-Kady // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2019. Vol. 108. Pp. 40-51. doi: 10.1016/j.ijepes.2018.12.037
8. An Adaptive Wide-Area Load Shedding Incorporating Power System Real-Time Limitations / T. Shekari, A. Gholami, F. Aminifar, M. Sanaye-Pasand // IEEE Systems Journal. 2018. Vol. 12(1). Pp. 759-767. doi: 10.1109/JSYST.2016.2535170
9. Hong Q. A New Load Shedding Scheme with Consideration of Distributed Energy Resources' Active Power Ramping Capability // IEEE Transactions on Power Systems. 2022. Vol. 37(1). Pp. 81-93. doi: 10.1109/TPWRS.2021.3090268
10. Zhu Q. A Deep End-to-End Model for Transient Stability Assessment with PMU Data // IEEE Access. 2018. Vol. 6. Pp. 65474-65487. doi: 10.1109/ACCESS.2018.2872796
11. Zhang Y., Zhang S., Wang J. A power system out-of-step splitting control system based on wide area information and an on-line searching scheme of optimal splitting section // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2021. Vol. 126. 106587. doi: 10.1016/j.ijepes.2020.106587
12. Zhang S., Zhang Y. A Novel Out-of-Step Splitting Protection Based on the Wide Area Information // IEEE Transactions on Smart Grid. 2017. 8(1). Pp. 41-51. doi: 10.1109/TSG.2016.2593908
13. Aghamohammadi M., Abedi M. DT based intelligent predictor for out of step condition of generator by using PMU data // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2018. Vol. 99. Pp. 95-106. doi: 10.1016/j.ijepes.2018.01.001
14. Ivankovi I., Kuzle I., Holjevac N. Wide Area Information-Based Transmission System Centralized Out-of-Step Protection Scheme // Energies. 2017. 10(5). 633. doi: 10.3390/en10050633
15. Online Detection of Out-of-Step Condition Using PMU-Determined System Impedances / M. Tealane, J. Kilter, M. Popov, O. Bagleybter, D. Klaar // IEEE Access. 2022. Vol. 10. Pp. 14807-14818. doi: 10.1109/ACCESS.2022.3149103
16. Desai J.P., Makwana V.H. Phasor Measurement Unit Incorporated Adaptive Out-of-step Protection of Synchronous Generator // Journal of Modern Power Systems and Clean Energy. 2021. Vol. 9(5). Pp. 1032-1042. doi: 10.35833/MPCE.2020.000277
17. Zare H., Alinejad-Beromi Y., Yaghobi H. Intelligent prediction of out-of-step condition on synchronous generators because of transient instability crisis // International Transactions on Electrical Energy Systems. 2018. Vol. 29(1). 2686. doi: 10.1002/etep.2686
18. Елкин С.В., Колобородов Е.Н., Климова Т.Г. Применение СВИ для определение параметров АЛАР // Релейная защита и автоматизация. 2019. № 2 (35). С. 28-31.
19. Mahdi M., Genc V.M.I. A Real-Time Self-Healing Methodology Using Model- and Measurement-Based Islanding Algorithms // IEEE Transactions on Smart Grid. 2019. Vol. 10(2). Pp. 1195-1204. doi: 10.1109/TSG.2017.2760698
20. Shukla A., Dutta S., Sadhu P.K. An island detection approach by μ-PMU with reduced chances of cyber-attack // International Journal of Electrical Power and Energy Systems. 2021. Vol. 126(A). 106599. doi: 10.1016/j.ijepes.2020.106599
21. Chatterjee S., Roy B. Bagged tree based anti-islanding scheme for multi-DG microgrids // Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing. 2021. Vol. 12. Pp. 2273-2284. doi: 10.1007/s12652-020-02324-0
22. PMU Measurement-Based Intelligent Strategy for Power System Controlled Islanding / Y. Tang, F. Li, C. Zheng, Q. Wang, Y. Wu // Energies. 2018. 11(1). 143. doi: 10.3390/en11010143
23. Готман Н.Э., Шумилова Г.П., Старцева Т.Б. Идентификация топологии электрической сети на основе искусственных нейронных сетей с использованием векторных измерений // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики: актуальные проблемы надежности систем энергетики: сб. докл. Междунар. науч. семинара им. Ю.Н. Руденко. Минск: Белорусский национальный технический университет, 2015. С. 251-257.
24. Готман Н.Э., Шумилова Г.П. Нейросетевой метод определения топологии электрической сети в переходных режимах // Известия РАН. Энергетика. 2021. №1. С. 92-100. doi: 10.31857/S0002331021010076
25. Разработка алгоритмов системы управления конфигурацией распределительных электрических сетей сельскохозяйственного назначения / В.Ю. Вуколов, А.Л. Куликов, И.Ф. Трапезников, М.В. Шарыгин // Вестник НГИЭИ. 2017. № 12(79). С. 64-77.
26. Time Series Classification for Locating Forced Oscillation Sources / Y. Meng, Z. Yu, N. Lu, D. Shi // IEEE Transactions on Smart Grid. 2021. Vol. 12(2). Pp. 1712-1721. doi: 10.1109/TSG.2020.3028188
27. AI-Based Damping of Electromechanical Oscillations by Using Grid-Connected Converter / G. Baltas, N.-B. Lai, A. Tarraso, L. Marin, F. Blaabjerg, P. Rodriguez // Frontiers in Energy Research. 2021. Vol. 9. 598436. doi: 10.3389/fenrg.2021.598436
28. Scalable Designs for Reinforcement Learning-Based Wide-Area Damping Control / S. Mukherjee, A. Chakrabortty, H. Bai, A. Darvishi, B. Fardanesh // IEEE Transactions on Smart Grid. 2021. Vol. 12(3). Pp. 2389-2401. doi: 10.1109/TSG.2021.3050419
29. Abdulrahman I., Radman G. Wide-Area-Based Adaptive Neuro-Fuzzy SVC Controller for Damping Interarea Oscillations // Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering. 2018. Vol. 41(3). Pp. 133-144. doi: 10.1109/CJECE.2018.2868754
30. Coordinated Optimal Volt/Var Control for Distribution Networks via D-PMUs and EV Chargers by Exploiting the Eigensystem Realization / G.E. Mejia-Ruiz, R. Cárdenas-Javier, M.R.A. Paternina, J.R. Rodríguez-Rodríguez, J.M. Ramirez, A. Zamora-Mendez // IEEE Transactions on Smart Grid. 2021. Vol. 12(3). Pp. 2425-2438. doi: 10.1109/TSG.2021.3050443
31. Compatible Decentralized Control of AVR and PSS for Improving Power System Stability / H. Liu, J. Su, Y. Yang, Z. Qin, C. Li // IEEE Systems Journal. 2021. Vol. 15(2). Pp 2410-2419. doi: 10.1109/JSYST.2020.3001429.
32. Николаева О.О., Климова Т.Г. Применение нейронных сетей и алгоритмов оптимизации для определения параметров АРВ синхронного генератора // Релейщик. 2020. № 2(37). С. 16-23.
33. Оценка участия синхронного генератора в демпфировании низкочастотных колебаний по данным синхронизированных векторных измерений / А.С. Бердин, А.С. Герасимов, Ю.П. Захаров, П.Ю. Коваленко, А.Н. Мойсейченков // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Энергетика. 2013. № 2(13). С. 62-68.
34. Pierrou G., Wang X. An Online Network Model-Free Wide-Area Voltage Control Method Using PMUs // IEEE Transactions on Power Systems. 2021. Vol. 36(5). Pp. 4672-4682. doi: 10.1109/TPWRS.2021.3058642
35. Adaptive Power System Emergency Control Using Deep Reinforcement Learning / Q. Huang, R. Huang, W. Hao, J. Tan,

R. Fan, Z. Huang // IEEE Transactions on Smart Grid. 2020. Vol. 11(2). Pp. 1171-1182. doi: 10.1109/TSG.2019.2933191
36. Бартоломей П.И., Семененко С.И. Совершенствования алгоритма противоаварийной автоматики ЭЭС на основе векторных измерений // Эффективное и качественное снабжение и использование электроэнергии: сб. докл. 4-й междунар. науч.-практ. конфер. в рамках выставки «Энергосбережение. Отопление. Вентиляция. Водоснабжение». Екатеринбург: Изд-во УМЦ УПИ, 2015. С. 38-41.
37. Чусовитин П.В., Паздерин А.В. Мониторинг устойчивости энергосистемы на основе динамического эквивалента, определенного по векторным измерениям // Электричество. 2013. № 2. С. 2-10.
38. Бацева Н.Л., Фоос Ю.А. Повышение точности расчета объемов управляющих воздействий в централизованной системе противоаварийной автоматики при оценивании состояния энергосистем // Вестник Чувашского университета. 2021. № 3. С. 5-20. doi: 10.47026/1810-1909-2021-3-5-20
39. Апросин К.И., Хохрин А.А., Иванов Ю.В. Оценка дозировки управляющих воздействий автоматики предотвращения нарушения устойчивости на базе синхронизированных векторных измерений // Релейщик. 2021. № 3(41). С. 26-31. doi: 10.18503/2311-8318-2021-4(53)-4-12
40. Сенюк М.Д., Дмитриева А.А., Дмитриев С.А. Исследование характеристик метода экспресс-оценки параметров электрического режима в стационарных и динамических процессах // Электротехнические системы и комплексы. 2021. №4(53). С. 4-12. doi: 10.18503/2311-8318-2022-2(55)-4-9
41. Сенюк М.Д., Дмитриева А.А. Апробация алгоритма анализа динамической устойчивости и противоаварийного управления режимом синхронного генератора на многомашинной модели энергосистемы // Электротехнические системы и комплексы. 2022. № 1(54). С. 46-53. doi: 10.18503/2311-8318-2022-1(54)-46-53
42. Развитие алгоритма автоматической разгрузки энергоблока при близких коротких замыканиях на основе синхронизированных векторных измерений / А.С. Бердин, А.А. Лисицын, А.Н. Мойсейченков, М.Д. Сенюк // Известия НТЦ единой энергетической системы. 2021. №2(85). С. 76-89.
43. Hierarchical Convolutional Neural Networks for Event Classification on PMU Measurements / M. Pavlovski, M. Alqudah, T. Dokic, A.A. Hai, M. Kezunovic, Z. Obradovic // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2021. Vol. 70. 2514813. doi: 10.1109/TIM.2021.3115583
44. Transfer Learning for Event Detection From PMU Measurements With Scarce Labels / A.A. Hai, T. Dokic, M. Pavlovski, T. Mohamed, D. Saranovic, M. Alqudah, M. Kezunovic, Z. Obradovic // IEEE Access. 2021. Vol. 9. Pp. 127420-127432. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3111727
45. Situational Awareness in Distribution Grid Using Micro-PMU Data: A Machine Learning Approach / A. Shahsavari, M. Farajollahi, E.M. Stewart, E. Cortez, H. Mohsenian-Rad // IEEE Transactions on Smart Grid. 2019. Vol. 10(6). Pp. 6167-6177. doi: 10.1109/TSG.2019.2898676
46. Shi J., Foggo B., Yu N. Power System Event Identification Based on Deep Neural Network with Information Loading // IEEE Transactions on Power Systems. 2021. Vol. 36(6). Pp. 5622-5632. doi: 10.1109/TPWRS.2021.3080279
47. Duan N., Stewart E.M. Frequency Event Categorization in Power Distribution Systems Using Micro PMU Measurements // IEEE Transactions on Smart Grid. 2020. Vol. 11(4). Pp. 3043-3053. doi: 10.1109/TSG.2020.2967641
48. Fault Classification in Power Distribution Systems using PMU Data and Machine Learning / F.L. Grando, A.E. Lazzaretti, M. Moreto, H.S. Lopes // 20th International Conference on Intelligent System Application to Power Systems (ISAP). 2019. 19532831. doi: 10.1109/ISAP48318.2019.9065966
49. Anomaly Detection, Localization and Classification Using Drifting Synchrophasor Data Streams / A. Ahmed, K.S. Sajan, A. Srivastava, Y. Wu // IEEE Transactions on Smart Grid. 2021. Vol. 12(4). Pp. 3570-3580. doi: 10.1109/TSG.2021.3054375
50. Shrivastava D., Siddiqui S., Verma K. A new synchronized data-driven-based comprehensive approach to enhance real-time situational awareness of power system // International Transactions on Electrical Energy Systems. 2021. Vol. 31(5). 12887. doi: 10.1002/2050-7038.12887
51. A Synchrophasor Data-Driven Method for Forced Oscillation Localization Under Resonance Conditions / T. Huang, N.M. Freris, P.R. Kumar, L. Xie // IEEE Transactions on Power Systems. 2020. Vol. 35(5). Pp. 3927-3939. doi: 10.1109/TPWRS.2020.2982267
52. Measurement Based Method for Online Characterization of Generator Dynamic Behaviour in Systems With Renewable Generation / P.N. Papadopoulos, T.A. Papadopoulos, A.I. Chrysochos, J.V. Milanović // IEEE Transactions on Power Systems. 2018. Vol. 33(6). Pp. 6466-6475. doi: 10.1109/TPWRS.2018.2830817
53. Kim D.-I., Wang L., Shin Y.-J. Data Driven Method for Event Classification via Regional Segmentation of Power Systems // IEEE Access. 2020. Vol. 8. Pp. 48195-48204. doi: 10.1109/ACCESS.2020.2978518
54. Li H., Ma Z., Weng Y. A Transfer Learning Framework for Power System Event Identification // IEEE Trans. on Power Systems. 2022. 9721668. doi: 10.1109/TPWRS.2022.3153445
55. Лебедев А.А., Климова Т.Г., Дубинин Д.М. Идентификация аварийных ситуаций в электроэнергетической системе по данным УСВИ // Релейщик. 2019. № 1(33). С. 10-16.
56. Елизарова А.С., Запасова И.С., Климова Т.Г. Идентификация аварийных ситуаций и ненормальных режимов по данным устройств синхронизированных векторных измерений // Релейщик. 2019. № 3(35). С. 44-51.

Поступила в редакцию 16 мая 2022 г.

INFORMATION IN ENGLISH

REVIEW OF MACHINE LEARNING BASED ON PMU APPLICATION IN TERMS OF POWER SYSTEM EMERGENCY CONTROL

Valeriy A. Tashchilin

Ph.D. (Engineering), Leading Engineer, Associate Professor, Department of Automated Electrical Systems, Ural Power Engineering Institute, Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia, v.a.tashchilin@urfu.ru, https://orcid.org/0000-0001-8763-3705

Pavel Yu. Gubin

Postgraduate Student, Teaching Assistant, Department of Automated Electrical Systems, Ural Power Engineering Institute, Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia, my@gubinpy.ru, https://orcid.org/0000-0002-3736-652X

Mikhail M. Shakirov

Master's Degree Student, Department of Automated Electrical Systems, Ural Power Engineering Institute, Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia, m.m.shakirov@inbox.ru, https://orcid.org/0000-0002-8192-8112

Wide penetration of phasor measurement systems in electrical power industry provides new opportunities in terms of bulk power systems control as well as distribution and microgrids. Possible applications of PMU are not limited to the state estimation problem and cover problems of transient conditions analysis. This fact lays the basis for further development of remedial action schemes, which use not only local measurements from an installation point, but also global ones, covering a part of a system or even the system totally. This review observes the existing approaches to integration of PMU to the following emergency control schemes and problems: automatic frequency load shedding, out-of-step conditions liquidation automation, islanding control, controlled emergency islanding automation, state and stability control schemes, identification and damping of electromechanical oscillations, identification, failure state classification and system conditions. It is shown that significant attention is being paid to different machine learning algorithms. There are two primary barriers to further development of remedial action schemes based on PMU. Firstly, it is assumed that there is information redundancy from measurement units. This does not completely correspond to the existing situation, because the number of installed units is still relatively small. Secondly, widely proposed machine learning algorithms still find very limited or almost no application in power system control because of general subjective attitude and difficulties connected with training process and lack of real PMU data for testing algorithms proposed. In particular, as it is shown in this work, real PMU data was used to implement and analyze the effectiveness of identification and classification of failure states procedure only.

Keywords: phasor measurement system, emergency control, automatic frequency load shedding, out-of-step conditions, liquidation automation, stability control scheme, machine learning, artificial neural networks.

REFERENCES

1. Mokeev A.V. PMU-based improvement of the reliability and efficiency of power systems. *Elektrichestvo* [Electricity], 2018, no. 4, pp. 4–10. doi: 10.24160/0013-5380-2018-3-4-10 (In Russian)
2. Mokeev A.V., Bovykin V.N., Khromtsov E.I., Miklashevich A.V., Popov A.I., Rodionov A.V., Ulyanov D.N. Application of synchronized vector measurement technology for control, protection and automation. *Releyshchik* [Protection engineer], 2019, no. 3, pp. 32–37. (In Russian)
3. Klimova T.G., Maksimov B.K. PMU devices: characteristics, testing and application. *Releyshchik* [Protection engineer], 2018, no. 2, pp. 32–39. (In Russian)
4. Klimova T.G., Revyakin V.A. Possible directions for application of PMU devices in distribution grids. *Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie* [Electric power. Transmission and distribution], 2020, no. 6, pp. 110–115. (In Russian)
5. Dusabimana E, Yoon S-G. A Survey on the Micro-Phasor Measurement Unit in Distribution Networks. Electronics. 2020. No. 9(2). 305. doi: 10.3390/electronics9020305
6. Boussadia, F., Belkhiat, S. A new adaptive underfrequency load shedding scheme to improve frequency stability in electric power system. Journal Européen des Systèmes Automatisés. 2021, vol. 54(2), pp. 263-271. doi: 10.18280/jesa.540208
7. Eissa M.M., Ali A.A., Abdel-Latif K., Al-Kady A.F. A frequency control technique based on decision tree concept by managing thermostatically controllable loads at smart grids. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2019, vol. 108, pp. 40–51. doi: 10.1016/j.ijepes.2018.12.037
8. Shekari T., Gholami A., Aminifar F., Sanaye-Pasand M. An Adaptive Wide-Area Load Shedding Incorporating Power System Real-Time Limitations. IEEE Systems Journal. 2018, vol. 12(1), pp. 759–767. doi: 10.1109/JSYST.2016.2535170
9. Hong Q. A New Load Shedding Scheme with Consideration of Distributed Energy Resources' Active Power Ramping Capability. IEEE Transactions on Power Systems. 2022, vol. 37(1), pp. 81–93. doi: 10.1109/TPWRS.2021.3090268
10. Zhu Q. A Deep End-to-End Model for Transient Stability Assessment with PMU Data. IEEE Access, 2018, vol. 6, pp. 65474–65487. doi: 10.1109/ACCESS.2018.2872796
11. ZhangY., ZhangS., WangJ.A power system out-of-step splitting control system based on wide area information and an online searching scheme of optimal splitting section // International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021, vol. 126, pp. 106587. doi:10.1016/j.ijepes.2020.106587
12. Zhang S., Zhang Y. A Novel Out-of-Step Splitting Protection Based on the Wide Area Information. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, vol. 8, iss. 1, pp. 41–51. doi: 10.1109/TSG.2016.2593908
13. Aghamohammadi M., Abedi M. DT based intelligent predictor for out of step condition of generator by using PMU data. International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2018. Vol. 99. Pp. 95–106. doi: 10.1016/j.ijepes.2018.01.001
14. Ivankovi I., Kuzle I., Holjevac N. Wide Area Information-Based Transmission System Centralized Out-of-Step Protection Scheme. Energies, 2017, vol. 10(5), pp. 1-28. doi: 10.3390/en10050633
15. Tealane M., Kilter J., Popov M., Bagleybter O., Klaar D. Online Detection of Out-of-Step Condition Using PMU-Determined System Impedances. IEEE Access, 2022, vol. 10, pp. 14807–14818. doi: 10.1109/ACCESS.2022.3149103
16. Desai J.P., Makwana V.H. Phasor Measurement Unit Incorporated Adaptive Out-of-step Protection of Synchronous Generator. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2021, vol. 9(5), pp. 1032–1042. doi: 10.35833/MPCE.2020.000277
17. Zare H., Alinejad-Beromi Y., Yaghobi H. Intelligent prediction of out-of-step condition on synchronous generators because of transient instability crisis. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2018, vol. 29, p. 2686. doi: 10.1002/etep.2686
18. Elkin S.V., Koloborodov E.N., Klimova T.G. PMU data application to choose out-of-step control system settings. *Releynaya zashchita i avtomatizatsiya* [Relay protection and automation], 2019, no. 2(35), pp. 28-31. (In Russian)
19. Mahdi M., Genc V.M.I.A Real-Time Self-Healing Methodology Using Model- and Measurement-Based Islanding Algorithms. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, vol. 10(2), pp. 1195-1204. doi: 10.1109/TSG.2017.2760698
20. Shukla A., Dutta S., Sadhu P.K. An island detection approach by μ-PMU with reduced chances of cyber-attack. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2021, vol. 126(A), p. 106599. doi: 10.1016/j.ijepes.2020.106599
21. Chatterjee S., Roy B. Bagged tree based anti-islanding scheme for multi-DG microgrids. Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, 2021, vol. 12, pp. 2273-2284. doi: 10.1007/s12652-020-02324-0
22. Tang Y., Li F., Zheng C., Wang Q., Wu Y. PMU Measurement-Based Intelligent Strategy for Power System Controlled Islanding. Energies, 2018, vol. 11, p. 143. doi: 10.1007/s12652-020-02324-0. doi: 10.3390/en11010143
23. Gotman N.E., Shumilova G.P., Startseva T.B. PMU-based identification of the topology of an electrical network based on artificial neural networks using vector measurements. *Metodicheskie voprosy issledovaniya nadezhnosti bolshikh*

sistem energetiki: aktualnye problemy nadezhnosti sistem energetiki: sbornik dokladov Mezhdunarodnyy nauchnyy seminar im. Yu.N. Rudenko [Methodological Issues of Researching the Reliability of Large Energy Systems: Actual Problems of Reliability of Energy Systems. Collection of Papers International Scientific Seminar named after V.I. Yu.N. Rudenko]. Minsk, Belarusian National Technical University Publ., 2015, pp. 251–257. (In Russian)

24. Gotman N.E., Shumilova G.P. Neural network method for determining the topology of an electrical network in transient conditions. *Izvestiya RAN. Energetika* [Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Energy], 2021, no. 1, pp. 92–100. doi: 10.31857/S0002331021010076 (In Russian)
25. Vukolov V.Yu., Kulikov A.L., Trapeznikov I.F., Sharygin M.V. Development of algorithms for the configuration management system of distribution electrical networks for agricultural purposes. *Vestnik NGIEI* [Bulletin of NGIEI], 2017, no. 12, pp. 64–77. (In Russian)
26. Meng Y., Yu Z., Lu N., Shi D. Time Series Classification for Locating Forced Oscillation Sources. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, vol. 12(2), pp. 1712–1721. doi: 10.1109/TSG.2020.3028188
27. Baltas G., Lai N.-B., Tarraso A., Marin L., Blaabjerg F., Rodriguez P. AI-Based Damping of Electromechanical Oscillations by Using Grid-Connected Converter. Frontiers in Energy Research, 2021, vol. 9, p. 598436. doi: 10.3389/fenrg.2021.598436
28. Mukherjee S., Chakrabortty A., Bai H., Darvishi A., Fardanesh B. Scalable Designs for Reinforcement Learning-Based Wide-Area Damping Control. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, vol. 12(3), pp. 2389–2401. doi: 10.1109/TSG.2021.3050419
29. Abdulrahman I., Radman G. Wide-Area-Based Adaptive Neuro-Fuzzy SVC Controller for Damping Interarea Oscillations. Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering, 2018, vol. 41(3), pp. 133–144. doi: 10.1109/CJECE.2018.2868754
30. Mejia-Ruiz G.E., Cárdenas-Javier R., Paternina M.R.A., Rodríguez-Rodríguez J.R., Ramirez J.M., Zamora-Mendez A. Coordinated Optimal Volt/Var Control for Distribution Networks via D-PMUs and EV Chargers by Exploiting the Eigensystem Realization. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, vol. 12(3), pp. 2425–2438. doi: 10.1109/TSG.2021.3050443
31. Liu H., Su J., Yang Y., Qin Z., Li C. Compatible Decentralized Control of AVR and PSS for Improving Power System Stability. IEEE Systems Journal, 2021, vol. 15(2), pp. 2410–2419. doi: 10.1109/JSYST.2020.3001429
32. Nikolaeva O.O., Klimova T.G. Identification of synchronous generator AVR parameters using neural networks and optimization algorithms. *Releyshchik* [Protection engineer], 2020, no. 2, pp. 16–23. (In Russian)
33. Berdin A.S., Gerasimov A.S., Zakharov Yu.P., Kovalenko P.Yu., Moyseychenkov A.N. PMU-based evaluation of the participation of a synchronous generator in the damping of low-frequency oscillations. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Energetik*a [Bulletin of the South Ural State University. Series “Power Engineering”], 2013, no. 2, pp. 62–68. (In Russian)
34. Pierrou G., Wang X. An Online Network Model-Free Wide-Area Voltage Control Method Using PMUs. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, vol. 36(5), pp. 4672–4682. doi: 10.1109/TPWRS.2021.3058642
35. Huang Q., Huang R., Hao W., Tan J., Fan R., Huang Z. Adaptive Power System Emergency Control Using Deep Reinforcement Learning. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, vol. 11, iss. 2, pp. 1171–1182. doi: 10.1109/TSG.2019.2933191
36. Bartolomey P.I., Semenenko S.I. Development of remedial action schemes algorithms based on PMU data. *Effektivnoe i kachestvennoe snabzhenie i ispolzovanie elektroenergii: sbornik dokladov 4-y mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii v ramkakh vystavki «Energosberezhenie. Otoplenie. Ventilyatsiya. Vodosnabzhenie»* [Materials of the 4th international conference "Effective high-quality electrical energy supply and distribution "]. Yekaterinburg, UMTs UPI Publ., 2015, pp. 38–41. (In Russian)
37. Chusovitin P.V., Pazderin A.V. Power system stability monitoring based on dynamic equivalent determined from PMU data. *Elektrichestvo* [Electricity], 2013, no. 2, pp. 2–10. (In Russian)
38. Batseva N.L., Foos Y.A. Increasing the accuracy of state estimation control actions determination in a centralized system of emergency automation. *Vestnik Chuvashskogo Universiteta* [Bulletin of the Chuvash University], 2021, no. 3, pp. 5–20. doi: 10.47026/1810-1909-2021-3-5-20 (In Russian)
39. Aprosin K.I., Khokhrin A.A., Ivanov Y.V. PMU based estimation of control actions needed to avoid loss of stability in power system. *Releyshchik* [Protection engineer], 2021, no. 3, pp. 26–31. doi: 10.18503/2311-8318-2021-4(53)-4-12 (In Russian)
40. Senyuk M.D., Dmitrieva A.A., Dmitriev S.A. Investigation of the characteristics of the method for express assessment of the parameters of the power system state in stationary and dynamic processes. *Elektrotekhnicheskie sistemy i kompleksy* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2021, no. 4, pp. 4–12. doi: 10.18503/2311-8318-2022-2(55)-4-9 (In Russian)
41. Senyuk M.D., Dmitrieva A.A. Approbation of the algorithm for transient stability analysis and emergency control of the mode of a synchronous generator on a multi-machine model of a power system. *Elektrotekhnicheskie sistemy i kompleksy* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2022, no. 1, pp. 46–53. doi: 10.18503/2311-8318-2022-1(54)-46-53 (In Russian)
42. Berdin A.S., Lisitsyn A.A., Moyseychenkov A.N., Senyuk M.D. Development of an PMU-based algorithm for automatic unloading of a power unit in case of close short circuits. *Izvestiya NTTs edinoy energeticheskoy sistemy* [Proceedings of the Scientific and Technical Center of the Unified Energy System], 2021, no. 2, pp. 76–89. (In Russian)
43. Pavlovski M., Alqudah M., Dokic T., Hai A.A., Kezunovic M., Obradovic Z. Hierarchical Convolutional Neural Networks for Event Classification on PMU Measurements. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, vol. 70, Pp. 1–13. doi: 10.1109/TIM.2021.3115583
44. Hai A.A., Dokic T., Pavlovski M., Mohamed T., Saranovic D., Alqudah M., Kezunovic M., Obradovic Z. Transfer Learning for Event Detection From PMU Measurements With Scarce Labels. IEEE Access, 2021, vol. 9, pp. 127420–127432. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3111727
45. Shahsavari A., Farajollahi M., Stewart E.M., Cortez E., Mohsenian-Rad H. Situational Awareness in Distribution Grid Using Micro-PMU Data: A Machine Learning Approach. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, vol. 10(6), pp. 6167-6177. doi: 10.1109/TSG.2019.2898676
46. Shi J., Foggo B., Yu N. Power System Event Identification Based on Deep Neural Network with Information Loading. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, vol. 36(6), pp. 5622-5632. doi: 10.1109/TPWRS.2021.3080279
47. Duan N., Stewart E.M. Frequency Event Categorization in Power Distribution Systems Using Micro PMU Measurements// IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, vol. 11(4), pp. 3043-3053. doi: 10.1109/TSG.2020.2967641
48. Grando F.L., Lazzaretti A.E., Moreto M., Lopes H.S. Fault Classification in Power Distribution Systems using PMU Data and Machine Learning. 20th International Conference on Intelligent System Application to Power Systems (ISAP). IEEE, 2019, pp. 1–6. doi: 10.1109/ISAP48318.2019.9065966
49. Ahmed A., Sajan K.S., Srivastava A., Wu Y. Anomaly Detection, Localization and Classification Using Drifting Synchrophasor Data Streams. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, vol. 12(4), pp. 3570-3580. doi: 10.1109/TSG.2021.3054375
50. Shrivastava D., Siddiqui S., Verma K. A new synchronized

data-driven-based comprehensive approach to enhance real-time situational awareness of power system. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2021, vol. 31. p. 12887. doi: 10.1002/2050-7038.12887

51. Huang T., Freris N.M., Kumar P.R., Xie L. A Synchrophasor Data-Driven Method for Forced Oscillation Localization Under Resonance Conditions. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, vol. 35(5), pp. 3927-3939. doi: 10.1109/TPWRS.2020.2982267
52. Papadopoulos P. N., Papadopoulos T.A., Chrysochos A.I., Milanović J.V. Measurement Based Method for Online Characterization of Generator Dynamic Behaviour in Systems with Renewable Generation. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, vol. 33(6), pp. 6466-6475. doi: 10.1109/TPWRS.2018.2830817
53. Kim D.-I., Wang L., Shin Y.-J. Data Driven Method for Event Classification via Regional Segmentation of Power Systems. IEEE Access, 2020, vol. 8, pp. 48195–48204. doi: 10.1109/ACCESS.2020.2978518
54. Li H., Ma Z., Weng Y. A Transfer Learning Framework for Power System Event Identification. IEEE Trans. on Power Systems, 2022, p. 9721668. doi: 10.1109/TPWRS.2022.3153445
55. Lebedev A.A., Klimova T.G., Dubinin D.M. PMU-based identification of emergency situations in the electric power system according to the PMU data. *Releyshchik* [Protection engineer], 2019, no.1, pp. 10–16. (In Russian)
56. Elizarova A.S., Zapasova I.S., Klimova T.G. PMU-based identification of emergency situations and abnormal modes. *Releyshchik* [Protection engineer], 2019, no. 3, pp. 44–51. (In Russian)

Тащилин В.А., Губин П.Ю., Шакиров М.М. Направления применения синхронизированных векторных измерений в задачах противоаварийного управления энергосистемами на основе методов машинного обучения // Электротехнические системы и комплексы. 2022. № 3(56). С. 12-27. https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-3(56)-12-27

Tashchilin V.A., Gubin P.Yu., Shakirov M.M. Review of Machine Learning Based on PMU Application in Terms of Power System Emergency Control. *Elektrotekhnicheskie sistemy i kompleksy* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2022, no. 3(56), pp. 12-27. (In Russian). https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-3(56)-12-27

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

УДК 621.333.1.001.57 https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-3(56)-28-35

Омельченко Е.Я., Танич В.О., Лымарь А.Б.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

ПРОЦЕСС БОКСОВАНИЯ ЧЕТЫРЕХОСНОГО МАНЕВРОВОГО ЭЛЕКТРОВОЗА С ТЯГОВЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ПО СИСТЕМЕ «ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЧАСТОТЫ – АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ»

Для четырехосного маневрового электровоза выполнено математическое описание процесса боксования колесных пар в случае применения системы электропривода «преобразователь частоты – асинхронный двигатель» (ПЧ–АД). Актуальность работы заключается в возможности использования компьютерной модели при разработке и исследовании процессов работы асинхронных двигателей для тягового электропривода электровоза в различных режимах работы. Целью статьи является проведение исследований переходных процессов боксования на динамической компьютерной модели тягового асинхронного электропривода по системе ПЧ-АД для четырехосного электровоза. Использованы методы математического моделирования в среде Matlab Simulink, основные положения физики, теоретической механики, теории электропривода, электрических машин, теории систем управления электроприводов, а также динамическая компьютерная модель асинхронного электропривода. За основу при создании модели взят промышленный маневровый электровоз НПМ2, разработанный Новочеркасским электровозостроительным заводом специально для применения на производственной площадке ПАО «ММК». Разработанная компьютерная модель электропривода настроена на конкретные параметры тяговых электродвигателей, позволяет рассчитывать переходные процессы в системе ПЧ-АД с учетом усилия тяги в сцепке и боксования. В статье дано краткое описание процессов боксования колесных пар, описаны основные типы этих процессов по условиям возникновения, разработаны дифференциальные уравнения движения при боксовании и структурные схемы математических моделей, учитывающих работу тягового электропривода с учетом усилия тяги в сцепке и различных систем регулирования и боксования четырехосного электровоза, проведена оценка переходных процессов при выбранных зазорах сцепных устройств по всей длине поезда, получены условия устойчивого боксования, сделаны выводы о целесообразности внедрения в систему автоматического управления электроприводов локомотива датчика линейной скорости.

Ключевые слова: четырехосный маневровый электровоз, боксование, колесная пара, тяговый электропривод, сила тяги, проскальзывание, сила сцепления, система «колесо-рельс», преобразователь частоты, асинхронный двигатель, компьютерная модель, системы регулирования

ВВЕДЕНИЕ

Маневровые локомотивы в логистических системах промышленных предприятий занимают важное место: без железнодорожных перевозок практически невозможно доставлять сырье, полуфабрикаты и готовую продукцию в требуемых объемах – железнодорожное сообщение в таких случаях является оптимальным для обеспечения заданных требований к качеству перевозок. Несмотря на кажущуюся очевидную простоту, качественные параметры управляемого движения поезда по железнодорожным путям связаны с физикой силы тяги локомотивов [1], реализуемой в соответствии с заданными тяговыми характеристиками [2], что в целом является серьезной научно-технической задачей.

В связи с несовершенством рельсовых путей [3], влиянием условий окружающей среды, перераспределением моментов на колесных парах локомотива при старте поезда и наличием других возмущающих воздействий [4–6], машинисты современных маневровых локомотивов при своей работе сталкиваются с явлением боксования колесных пар [7], представляющим серьезную проблему и повышающим общие риски эксплуатации железнодорожного транспорта.

Данная проблема не обошла стороной и промышленный маневровый электровоз НПМ2 [8, 9], разработанный Новочеркасским электровозостроительным заводом специально для применения на производственной площадке ПАО «ММК». На электровозе НПМ2 установлены регулируемые тяговые электроприводы переменного тока, выполненные по системе ПЧ-АД [10] с системой автоматического управления на основе микропроцессорных контроллеров [11], позволяющей в перспективе снижать вероятность возникновения, а также осуществлять эффективную компенсацию боксования.

Коррекция возможна за счет внедрения алгоритмов, сформированных на базе результатов исследования процесса боксования в системе «колесо-рельс» [7, 12] для локомотива с тяговым электроприводом на динамической компьютерной модели [13]. За основу для динамической компьютерной модели были взяты материалы предыдущих исследований, где для маневрового электровоза разработана по методам теории электрических машин, теории электропривода и систем управления электроприводов в среде Matlab Simulink достоверная динамическая компьютерная модель adktancp.mdl по системе «транзисторный автономный инвертор напряжения – трехфазный тяговый асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором» [14–16].

Целью работы является математическое описание механических особенностей работы четырехосного локомотива с учетом усилия тяги в сцепке, процесса боксования и проведение исследований переходных процессов боксования на динамической компьютерной модели тягового асинхронного электропривода по системе ПЧ-АД [17] с различными системами регулирования [18].

© Омельченко Е.Я., Танич В.О., Лымарь А.Б., 2022

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Задачи для достижения поставленной цели:

1. Математическое описание давления колесных пар с учетом силы тяги локомотива.

2. Корректное описание изменения угловых скоростей колесных пар и линейной скорости вагонов в процессе боксования.

3. Разработка математической и компьютерной модели механической и электрической части электропривода с учетом изменения угловых скоростей колесных пар и линейной скорости вагонов при боксовании.

4. Исследование работы систем скалярного управления ПЧ-АД на модели при боксовании.

ПРОЦЕСС БОКСОВАНИЯ

Боксование может происходить как при трогании поезда с места, так и в движении. После срыва в боксование коэффициент трения скольжения между колесом и рельсом резко уменьшается, и самопроизвольно боксование прекратиться уже не может. Для предотвращения боксования используют модификаторы трения (например, подача песка в зону боксования) и ручную или автоматическую регулировку тягового момента или скорости.

Боксование имеет несколько видов [4, 7, 12, 13]:

1. Боксование колесных пар на поворотах.

2. Прерывистое боксование из-за колебаний кузова и тележек локомотива при движении.

3. Боксование всех колесных пар локомотива при резком пуске и езде на подъем или спуск.

4. Боксование отдельных колесных пар при пуске и подъеме поезда из-за неравномерного давления колесных пар на рельсы.

Боксование 1-го типа зависит от радиуса поворота и скорости поезда и на него нельзя воздействовать через систему регулирования, причем в боксовании всегда участвует внешнее колесо по радиусу поворота. Боксование 2-го вида носит случайный и колебательный характер, уменьшение которого возможно с увеличением устойчивости поезда. Боксование 3-го вида возможно при движении электровоза на холостом ходу или при существенном превышении тягового усилия. В статье выполнено исследование процесса боксования 4-го вида.

АНАЛИЗ БИБЛИОГРАФИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ

Процесс боксования имеет сложную природу. Кратко проанализируем наиболее характерные статьи по этому вопросу. В [3, 4, 7, 12, 13] сделаны попытки объяснения процесса на уровне вещества и приведены структурные схемы для описания боксования между колесами на поворотах для тяговых электродвигателей (ТЭД). Здесь же приведены зависимости сил сцепления колеса от разности скоростей боксования. В [4] представлены укрупненные блочные схемы для выявления боксования, его ограничения между колесными парами для ТЭД переменного тока. В работах Самме Г.В. [7, 12] раскрыто состояние проблемы, приведены новые зависимости коэффициента сцепления от скорости скольжения, имеющие до двух максимумов. Даны предложения по положительному использованию боксования.

ДАВЛЕНИЕ КОЛЕСНЫХ ПАР ОТ СИЛЫ ТЯГИ ЛОКОМОТИВА

Максимальное тяговое усилие, передаваемое через колесную пару, зависит от качества поверхностей колеса и рельса, величины давления колеса на рельс и скорости движения электровоза. Четырехосный электровоз имеет две тележки с опорно-осевой подвеской на подшипниках качения, поэтому в кинематической схеме локомотива (**рис. 1**), описывающей усилия, возникающие при движении локомотива с постоянной скоростью V_L, реакция рельсов от давления колес в подшипниках отмечена усилиями F_{12} и F_{34}, приложенных на расстояниях l_L от центра масс. Каждая колесная пара формирует тяговое усилие F_{KI}. Реакцией от суммарного тягового усилия является усилие сопротивления от вагонов F_{CV}, прикладываемое на высоте сцепки h_L.

В соответствии с обозначениями **рис. 1** для установившегося движения составлена система уравнений:

$$\begin{cases} \sum M_A = 0; -F_{12}l_L + F_{34}l_L - F_V h_L + \dfrac{F_V D_K}{2} = 0; \\ \sum F_Y = 0; F_{34} + F_{12} - P_L = 0; \\ \sum F_X = 0; -F_V + F_{K1} + F_{K2} + F_{K3} + F_{K4} = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где F_{12} и F_{34} – реакция рельсов от давления колес в подшипниках; l_L – расстояние от центра масс, м; F_V – усилие на сцепке, Н; h_L – высота оси сцепного устройства, м; D_K – диаметр колеса, м; P_L – вес локомотива, кг; F_{KI} – тянущие усилия колесных пар, Н.

Решение системы уравнений (1):

$$\begin{cases} F_V = F_{K1} + F_{K2} + F_{K3} + F_{K4}; \\ F_{12} = \dfrac{P_L}{2} - \dfrac{F_V(h_L - R_K)}{2l_L}; \\ F_{34} = \dfrac{P_L}{2} + \dfrac{F_V(h_L - R_K)}{2R_K}. \end{cases} \quad (2)$$

где R_K – радиус колеса.

В соответствии с уравнениями (2) при постоянной скорости поезда усилие от вагонов складывается из тянущих усилий колес F_{KI}, а давление колес на рельсы зависит от веса локомотива и тянущего усилия от вагонов, причем давление передней пары уменьшается (разгрузка), а давление задней пары увеличивается (перегрузка). Это приводит к разным режимам работы колесных пар, так как при отсутствии боксования максимальное тянущее усилие не должно превышать давление колеса на рельс, умноженное на коэффициент сцепления Ψ [4].

Задача по описанию условий боксования решается для электровоза НПМ2М, основные характеристики которого [8, 9] приведены в **табл. 1**.

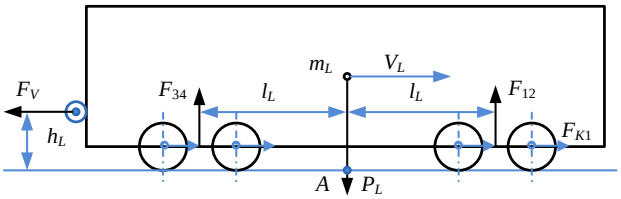


Рис. 1. Усилия при движении локомотива

Таблица 1

Основные характеристики электровоза НПМ2М

$P_{2У}$, кВт	P_L, кН	R_K, м	$P_{СЦ}$, т	V_H, км/ч	F_{VH}, кН	R, м
1400	902,5	0,56	1100	30	160	0,1
l_L, *м*	h_L, *м*	Ψ_0	Ψ_{30}	M_M/M_H	F_{VM}, Н·м	
3,425	1,06	0,351	0,266	3,1	212,2	

В соответствии с уравнениями (2) и данными **табл. 1** получены зависимости изменения давления тележек колес на рельсы от усилия сопротивления вагонов:

$$\begin{cases} F_{12}\left(F_V\right) = 451,25 - 0,073F_V; \\ F_{34}\left(F_V\right) = 451,25 + 0,073F_V. \end{cases} \quad (3)$$

В соответствии с [5] усилие сцепления рассчитывается по формуле [13]

$$F_{СЦ} = 1000 m_L g \Psi, \quad (4)$$

где m_L – масса локомотива, т; g – ускорение свободного падения, м/с^2; Ψ – коэффициент сцепления локомотива, равный отношению наибольшей силы тяги к весу локомотива.

В свою очередь, коэффициент сцепления зависит от скорости движения и качества путей и рассчитывается по формуле [5]

$$\Psi = a_\Psi + \frac{b_\Psi}{c_\Psi + d_\Psi V} - e\Psi V, \quad (5)$$

где a_ψ, b_ψ, c_ψ, d_ψ, e_ψ – эмпирические коэффициенты; V – линейная скорость поезда, км/ч.

Значения параметров уравнения (5) для промышленного электровоза переменного тока НПМ2М на подъездных путях приведены в **табл. 2**.

Значение коэффициента сцепления изменяется от 0,36 до 0,277 при изменении скорости V от 0 до 30 км/ч.

На **рис. 2** приведены зависимости давления тележек колесных пар на рельсы F_{12} и F_{34} от силы сопротивления вагонов [7] F_V (уравнения (3), линии СВ и СА), а также зависимости наибольшей силы тяги тележек F_{C0} и F_{C30} к силе давления колес (коэффициент сцепления Ψ, линии ОВ и ОА). Дополнительно на **рис. 2** пунктирными линиями отмечены номинальное тяговое усилие F_{VH} и максимальное F_{VM} (см. **табл. 1**).

По **рис. 2** проводится оценка режима боксования. При номинальном тяговом усилии тележек (80 кН) давление передней и задней тележек колесных пар равны 438,85 и 463,65 кН (точки 1 и 2). Наибольшие силы тяги F_{C12} и F_{C34} при скорости 30 км/ч равны 121,76 и 128,23 кН (точки 5 и 6).

Запас по боксованию 39,5 и 45,9 кН. При максимальном тяговом усилии (106,1 кН) давление тележек колесных пар равно 435,75 и 466,75 кН (точки 3 и 4), а наибольшие силы тяги 120,7 и 129,3 кН. Запас по боксованию 14,6 и 23,2 кН, то есть запас по боксованию у передней тележки практически отсутствует и при дальнейшем увеличении силы тяги она перейдет в режим боксования. При трогании с места наибольшая сила тяги у передней тележки доходит до 160 кН (точка 8). С учетом критического момента M_M тележки могут создавать максимальное усилие до 250 кН, то есть при неумелом управлении тягой электровоза можно перевести в режим боксования обе тележки.

Таблица 2

Значения для расчета коэффициента сцепления

Наименование	a_ψ	b_ψ	c_ψ	d_ψ	e_ψ
Промышленный электровоз переменного тока на подъездных путях	0,228	7	53	3	0

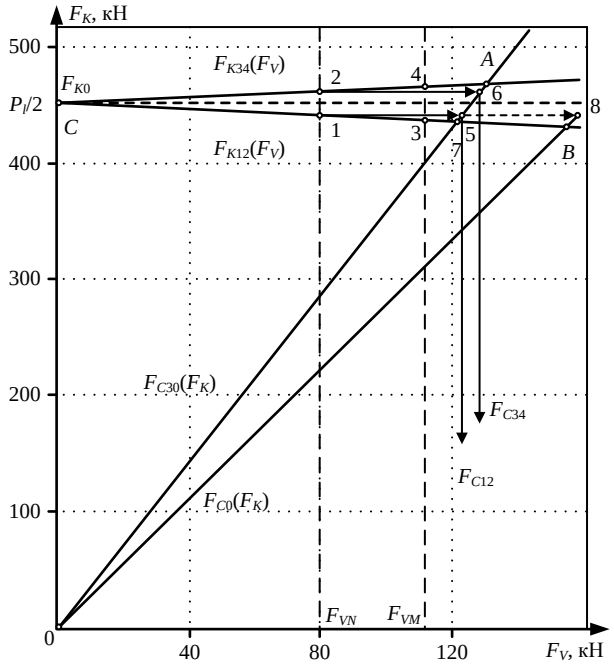


Рис. 2. Зависимости усилий от колес и сцепного усилия от усилия от вагонов

УСЛОВИЯ ВХОДА И ВЫХОДА ИЗ РЕЖИМА БОКСОВАНИЯ

При пуске поезда после выбора зазоров в сцепке двигатели работают в двигательном режиме, и усилие тяги уравновешивается усилием сопротивления движению и динамическим усилием на разгон вагонов [1, 2]. Если при этом усилие тяги превысит усилие сцепления (задан слишком большой момент двигателя), то происходит срыв контакта с рельсом у передней тележки и начинается боксование, сопровождающееся увеличением угловой скорости вращения колес над линейной скоростью поезда (выполняется условие (8)). Колеса задней тележки вращаются без боксования (уравнения (3)). В этом случае по разнице скоростей должно сработать реле антибоксования и уменьшить задание на ток двигателя первой оси. Часто при пуске электровоза на холостом ходу формируется боксование 3-го типа, то есть в режим боксования переходят все колеса электровоза.

Для выхода из режима боксования нужно восстановить равенство скоростей, то есть подтормозить двигатель и установить усилие тяги меньше усилия сцепления (сбросить педаль газа). Дополнительно подсыпается песок под колеса локомотива. При этом увеличивается усилие сцепления [13].

При установившемся движении режим боксования наступает, когда поезд едет в гору. В этом случае увеличивается усилие сопротивления движению и становится больше усилие сцепления. При этом, чтобы не потерять скорость поезда и выйти из режима боксования, надо одновременно немного поднять задание на ток и подсыпать песку, чтобы усилие сцепления превысило силу тяги. Скорость колеса уменьшится, колеса локомотива выйдут из режима боксования.

В торможении поезда участвует локомотив за счет применения электрического торможения и вагоны за счет использования пневматических тормозов. Электрическое торможение может быть рекуперативным с отдачей энергии в сеть (система ПЧ-АД) или динамическим с рассеиванием энергии торможения на сопротивлениях (системы постоянного тока), однако оно не так эффективно, как пневматическое торможение, так как в этом случае в торможении участвует локомотив и все вагоны.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССА БОКСОВАНИЯ

В настоящей статье рассмотрен новый подход к описанию процесса, заключающийся в разложении при боксовании общей массы поезда на три массы, причем первая и вторая масса (электродвигатели передней и задней тележек) вращаются, а третья масса (вагоны и электровоз) движется поступательно. Все выкладки сделаны для 4-го вида боксования.

До срыва контакта между колесом и рельсом при скорости движения поезда можно составить дифференциальное уравнение движения для всего поезда, которое описывает движение единой массы при постоянной инерционности (все зазоры выбраны) и переменных моментах и силах:

$$\begin{aligned} &F_{K1}X_1 + F_{K3}X_3 + \Delta F_{C1}X_B + \\ &+\Delta F_{C3}X_C - \left(F_{CV} + F_{CL}\right) = \\ &= \left[3{,}6J_D\frac{X_1 + X_3}{R^2} + m_V + m_L\right]\frac{dV}{dt}, \end{aligned} \tag{6}$$

где F_1, F_3 – электромагнитные тяговые усилия колесных пар, формируются во времени системой регулирования электровоза, Н·м; V – линейная скорость движения поезда, м/с; F_{CV}, F_{CL} – силы сопротивления вагонов и локомотива соответственно, Н; R_K, i, R – радиус колеса, передаточное отношение редуктора и радиус приведения, м; J_D – момент инерции ТЭД, кг·м^2; m_V, m_L – полная масса вагонов и локомотива, соответственно, кг; X_1, X_3, X_B, X_C – логические коэффициенты, изменяющиеся при боксовании.

На основании дифференциального уравнения (6) составляется интегральное уравнение расчета скорости движения поезда:

$$\begin{aligned} &V = \left(3{,}6J_D\frac{X_1 + X_3}{R^2} + m_V + m_L\right)^{-1} \times \\ &\times\int\left(F_{K1}X_1 + F_{K3}X_3 + \Delta F_{C1}X_B + \right. \\ &\left. +\Delta F_{C3}X_C - \left(F_{CV} + F_{CL}\right)\right)dt + V(0). \end{aligned} \tag{7}$$

В режиме боксования (скольжение колес передней или задней тележек) при

$$V \neq \frac{\omega R_K}{i} \tag{8}$$

составляются два дифференциальных уравнения:

$$M_{12} - \Delta M_X - \Delta F_{C1}\frac{R_K}{i}X_B = 3{,}6J_D\frac{d\omega_{12}}{dt}; \tag{9}$$

$$M_{34} - \Delta M_X - F_{C3}\frac{R_K}{i}X_C = 3{,}6J_D\frac{d\omega_{34}}{dt}, \tag{10}$$

где ΔF_{C1}, ΔF_{C3} – дополнительные усилия, зависящие от скорости боксования, Н·м; M_{12}, M_{34} – моменты на колесах на соответствующих участках характеристик боксования; ΔM_X – момент холостого хода «двигатель-колесо»; ω_{12}, ω_{34} – скорости движения колес на соответствующих участках характеристик боксования.

Дифференциальное уравнение (9) описывает угловую скорость вращения передней тележки с редуктором и колесной парой при срыве контакта между рельсом и колесами. Уравнение (10) описывает угловую скорость задней тележки с редуктором и колесной парой при срыве контакта между рельсом и колесами. Объединяет уравнения (9) и (10) дополнительные усилия ΔF_{C1} и ΔF_{C3}, формирующиеся как разница между усилием на колесе и усилием сцепления. Для вращающейся инерционности двигателя при расчете угловой скорости это усилие является тормозящим, а для поступательной массы поезда при расчете линейной скорости (7) – движущим. Усилия ΔF_{C1} и ΔF_{C3} задаются по [7] (**рис. 3**).

Максимальная сила сцепления, в соответствии с соотношением (5), зависит от скорости движения поезда (точки E_1, E_2 и E_3 на **рис. 3**), а силы сцепления могут быть представлены графическими зависимостями (A_1-B_1-C_1-D_1-E_1-F_1 для скорости 30 км/ч и т.д.). Участок C_1-D_1 показывает устойчивое движение без боксования. Тока D_1 соответствует началу боксования. На участке D_1-E_1 возможно длительное боксование, где в точке E_1 формируется максимальная сила сцепления. Участок E_1-F_1 показывает снижение силы сцепления, приводящее к разносному боксованию, потери механической энергии при движении поезда и нагреву колес.

На основании дифференциальных уравнений (9) и (10) составляются интегральные уравнения движения:

$$\begin{aligned} &\omega_{12} = \frac{1}{3{,}6J_D}\int\left(M_{12} - \Delta M_x - \Delta F_{C1}\frac{R_K}{i}\right)dt + \\ &+\omega_{12}(0), \end{aligned} \tag{11}$$

$$\begin{aligned} &\omega_{34} = \frac{1}{3{,}6J_D}\int\left(M_{34} - \Delta M_X - \Delta F_{C3}\frac{R_K}{i}\right)dt + \\ &+\omega_{34}(0), \end{aligned} \tag{12}$$

где ω_{12}, ω_{34} – скорости движения колес на соответствующих участках характеристик боксования.

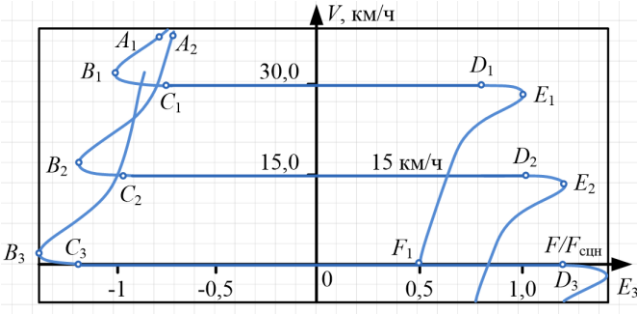


Рис. 3. Зависимости силы сцепления от скорости движения поезда

Интегральные уравнения (7), (11) и (12) используются в структурной схеме ТЭД при описании процесса боксования. Переход от уравнения (7) к системе (11) и (12) производится при выполнении условия (8), то есть при срыве контакта с рельсом при превышении усилия на колесе F_K (сила тяги) над усилием сцепления $F_{СЦ}$.

РАСЧЕТ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ

Для решения поставленных задач на основе уравнений (7), (11), (12) и с учетом модели [15] разработана компьютерная модель (асинхронный двигатель короткозамкнутый, высота оси 350 мм, скалярное управление [11], 2 тележки боксования, 1 редакция). Для примера на компьютерной модели рассчитаны переходные процессы пуска локомотива (92 т) и 12 четырехосных думпкаров 6ВС60 по 87 т (27 т пустой вагон и 60 т полезная нагрузка) с выбранными зазорами в сцепке при различных системах регулирования [15-18] и исследовании процесса боксования. В настоящей статье при выбранных зазорах и сцепном весе 1100 т поезд трогается с моментом сопротивления $0{,}2F_{VN}$ и моментом инерции $768{,}6J_{ДВ}$.

В соответствии с интегральными уравнениями (7), (11) и (12) происходит переключение значения логических коэффициентов компьютерной модели (**табл. 3**) в зависимости от режимов работы нормальная работа/боксование.

На **рис. 4** приведены переходные процессы в относительных единицах пуска четырех ТЭД с двойными регуляторами тока ПЧ-АД со скалярным регулированием в режиме с выбранными зазорами и началом боксования. Процесс пуска начинается с линейного задания тока статора ТЭД электровоза за 3,5 с до 1,6 о.е. (педаль газа). Максимальные значения тока и момента первого двигателя доходят до 1,7 и 1,6 о.е.

Таблица 3

Значения логических коэффициентов компьютерной модели

Логические коэффициенты Режим	X_1	X_B	X_0	X_C
Нормальный	1	0	1	0
Боксование 12	0	1	1	0
Боксование 34	1	0	0	1
Боксование 12 и 34	0	1	0	1

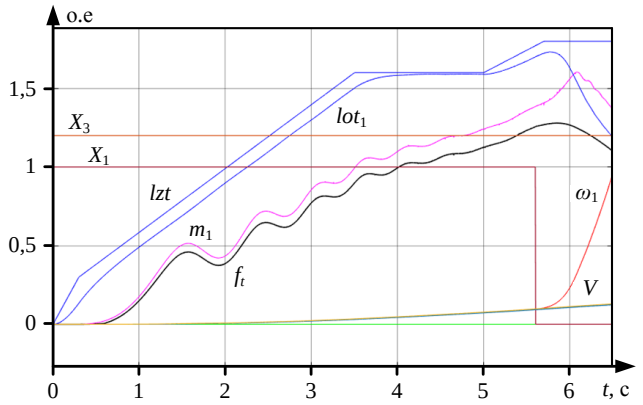


Рис. 4. Переходные процессы пуска ТЭД в замкнутой по току системе ПЧ-АД в режиме выбранных зазоров в сцепке и начале боксования передней тележки

В момент времени 5,0 с даётся сигнал на увеличение задания тока статора до 1,8 о.е. Это приводит к увеличению силы тяги и превышению её над усилием сцепления передней тележки. Начинается процесс боксования в момент времени 5,6 с, сопровождающийся разрывом механической связи между движущимися колесами и рельсом. Начало процесса боксования отмечается логической переменной X_1, показывающей окончание нормального режима работы. X_1 – логическая инверсия условия (8). Угловая скорость двигателя ω_1 значительно увеличивается, а линейная скорость V остается практически постоянной вследствие большой инерционности поезда. Этот процесс близок к разносному боксованию, а максимальная скорость ТЭД передней тележки будет ограничиваться только максимальной частотой ПЧ. Тяговое усилие электровоза уменьшается, так как передняя тележка практически выключена из процесса пуска.

На **рис. 5** приведены переходные процессы в относительных единицах пуска четырех ТЭД с двойными регуляторами тока ПЧ-АД со скалярным регулированием в режиме с выбранными зазорами и началом боксования. Отличие от **рис. 4** состоит в увеличении задания тока статора до 2,2 о.е. Максимальные значения тока и момента двигателя доходят до 1,75 и 1,6 о.е.

Начинается процесс боксования передней тележки в момент времени 5,3 с. Задняя тележка переходит в боксование в момент времени 5,85 с (логическая переменная X_3). Угловые скорости двигателей тележек ω_1 и ω_3 значительно увеличиваются, а линейная скорость V остается практически постоянной вследствие большой инерционности поезда. Тяговое усилие и темп разгона поезда значительно уменьшаются.

На **рис. 6** приведены переходные процессы в относительных единицах пуска четырех ТЭД с двойными регуляторами тока ПЧ-АД со скалярным регулированием в режиме с выбранными зазорами, началом боксования передней тележки и ограничением скорости боксования. Отличие **рис. 6** от **рис. 4** состоит во включении системы ограничения скорости боксования в функции линейной скорости поезда. Система ограничения обеспечивает слежение за скоростью ω_1 от линейной скорости поезда с ошибкой в 2 Гц. Боксование передней тележки продолжается, но тяговое усилие не уменьшается, пуск поезда продолжается.

На **рис. 7** приведены переходные процессы в относительных единицах пуска четырех ТЭД с двойными регуляторами тока ПЧ-АД со скалярным регулированием в режиме с выбранными зазорами, началом боксования передней и задней тележек и ограничением скорости боксования.

Начинается процесс боксования передней тележки в момент времени 5,3 с. Задняя тележка переходит в боксование в момент времени 5,95 с. Угловые скорости двигателей тележек ω_1 и ω_3 незначительно увеличиваются по отношению к линейной скорости V, которая продолжает увеличиваться. Тяговое усилие снизилось незначительно и становится равным 1,3 F_{VN}. Длительное движение поезда в этом режиме возможно (участок D_1-E_1 на **рис. 3**).

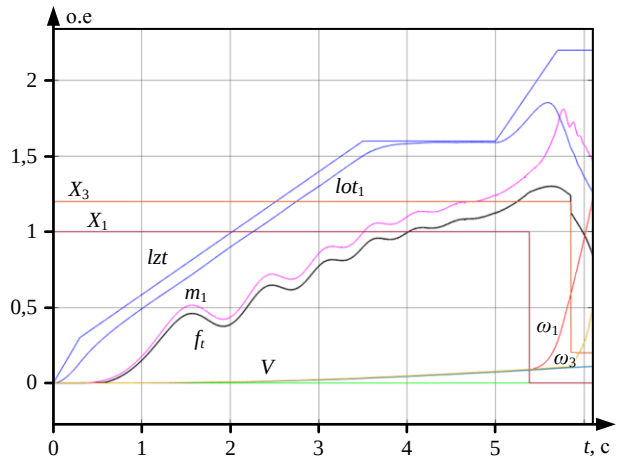


Рис. 5. Переходные процессы пуска ТЭД в замкнутой по току системе ПЧ-АД в режиме выбранных зазоров в сцепке и начале боксования передней и задней тележек

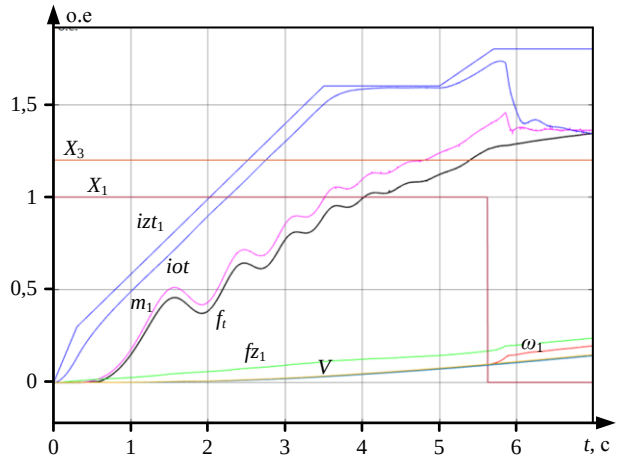


Рис. 6. Переходные процессы пуска ТЭД в замкнутой по току системе ПЧ-АД в режиме выбранных зазоров в сцепке, начале боксования передней тележки и ограничении скорости боксования

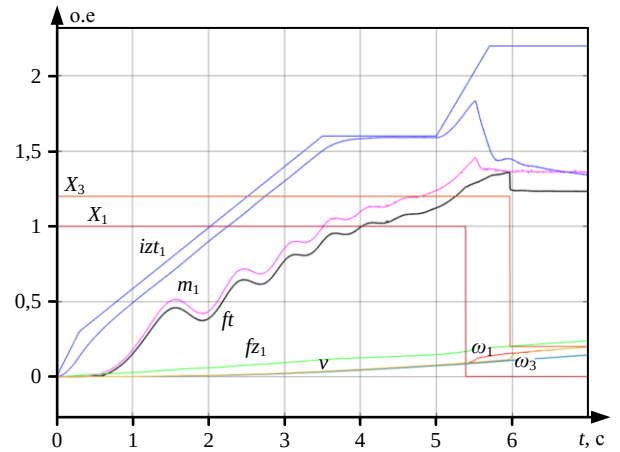


Рис. 7. Переходные процессы пуска ТЭД в замкнутой по току системе ПЧ-АД в режиме выбранных зазоров в сцепке, начале боксования передней и задней тележек и ограничении скорости боксования

Заключение

1. Выведены интегральные уравнения для расчета переходных процессов при боксовании четырехосного маневрового электровоза с учетом усилия тяги в сцепке, определены условия перехода в боксование передней и задней приводных тележек.

2. Доработанная компьютерная модель позволяет проводить исследования динамических режимов в электроприводе четырехосного электровоза при боксовании в системе ПЧ-АД со скалярным управлением и ограничением скорости боксования.

3. Применение системы ограничения скорости боксования в функции линейной скорости электровоза позволяет получить устойчивый режим тяги локомотива.

Список источников

1. Копотилов В.И. Сила тяги локомотива и её теоретическое обоснование // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. 2017. № 11. С. 31-35.
2. Руднев В.С. Основы тяги поездов, сила тяги и тяговые характеристики локомотивов // Локомотив. 2017. № 12(732). С. 21-25.
3. Новосельцев В.П., Новосельцев П.В., Гордеева А.А. Влияние продольной жесткости пути на возможность проскальзывания колесных пар локомотива при движении в режиме тяги // Международный научно-исследовательский журнал. 2013. № 4-1 (11). С. 93-95.
4. Самме Г.В. Фрикционное взаимодействие колесных пар локомотива с рельсами: монография. М.: Маршрут, 2005. 80 с.
5. Сидяков В.А., Андреева Л.А., Колчанов А.Г. Актуализация правил тяговых расчетов на промышленном железнодорожном транспорте // Методическое пособие к СП 37.13330.2012, «СНиП 2.05.07-91* Промышленный транспорт». М.: ЗАО «ПромтранСНИИпроект». 2016, 95 с.
6. Свидетельство о гос. регистрации прогр. для ЭВМ № 2019618026. Расчет нагрузки локомотива по траектории движения поезда / Танич В.О., Енин С.С., Омельченко Е.Я., Белый А.В.; заявитель ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»; заявл. 05.06.2019, опубл. 26.06.2019.
7. Самме Г.В., Яковлев В.А. Характеристики сцепления и поведение моторно-колесных блоков электровоза при боксовании // Наука и техника транспорта. 2009. № 3. С. 16-26.
8. Результаты наладочных и приемочных испытаний промышленного электровоза НПМ2-001 / С.А. Крамсков, А.А. Курочка, С.Г. Волков, М.П. Шапиро, А.В. Киреев, Д.А. Кабанов // Вестник Всероссийского научно-исследовательского и проектно-конструкторского института электровозостроения. 2005. № 2. С. 227-237.
9. Андриянов В.И., Никитенко В.С. НПМ2 – электровоз мирового уровня // Вестник Всероссийского научно-исследовательского и проектно-конструкторского института электровозостроения. 2008. № 2. С. 271-275.
10. Рябов Е.С. К вопросу создания маневровых электровозов // Журнал: Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте. 2015. № 3 (112). С. 69-72.
11. Тяговый преобразователь на новой элементной базе для промышленного электровоза НПМ2 с асинхронным тяговым двигателем / И.В. Синявский, Л.В. Шитова, Е.О. Посохов, С.М. Изотов // Вестник Всероссийского научно-исследовательского и проектно-конструкторского института электровозостроения. 2012. № 2(64). С. 23-32.
12. Самме Г.В. Новые результаты в теории сцепления локомотива // Транспорт Российской Федерации. 2010. №3(28). С. 14-16.
13. Ляпушкин Н.Н., Савоськин А.Н., Чукин А.А. Моделирование процессов сцепления локомотива с рельсом // Транспорт Российской Федерации. 2010. №6(31). С. 50-53.
14. Свидетельство о гос. регистрации прогр. для ЭВМ № 2014617766. Динамическая математическая модель трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором / Омельченко Е.Я., Тележкин О.А., Моисеев В.О., Енин С.С.; заявитель ФГБОУ ВПО «МГТУ им. Г.И. Носова»; заявл. 03.06.2014, опубл. 20.08.2014.
15. Dynamic Computer Model of Traction Asynchronous Motor / E. Omelchenko, T. Khramshin, V. Tanich, I. Kozhevnikov // IEEE Russian Workshop on Power Engineer-

ing and Automation of Metallurgy Industry: Research and Practice (PEAMI). IEEE, 2019. Pp. 59-63. doi: 10.1109/PEAMI.2019.8915408

16. Свидетельство о гос. регистрации прогр. для ЭВМ №2014617766. Динамическая математическая модель трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором / Омельченко Е.Я., Тележкин О.А., Моисеев В.О., Енин С.С.; заявитель ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»; заявл. 03.06.2014, опубл. 20.08.2014.
17. Omelchenko E., Tanich V. Lymar A. The Operation Researching of a Traction Asynchronous Electric Drive in the Electric Locomotive on a Dynamic Model // Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice (PEAMI). IEEE, 2020. Pp. 44-49. doi: 10.1109/PEAMI49900.2020.9234347
18. Омельченко Е.Я., Моисеев В.О., Тележкин О.А. Анализ работы регуляторов тока // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2013. №4(44). С. 81-85.

Поступила в редакцию 03 июня 2022 г.

INFORMATION IN ENGLISH

SLIPPING PROCESS OF FOUR-AXLE SHUNTING ELECTRIC LOCOMOTIVE WITH INVERTER POWERED ASYNCHRONOUS TRACTION ELECTRIC DRIVE

Evgeniy Ya. Omelchenko

D.Sc. (Engineering), Professor, Department of Automated Electric Drive and Mechatronics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, Momentum2@yandex.ru

Vasiliy O. Tanich

Associate Professor (Engineering), Department of Automated Electric Drive and Mechatronics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia,Shift-91@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-0098-6431

Alexey B. Lymar

Assistant Professor, Department of Automated Electric Drive and Mechatronics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, lymar.alexei@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-2783-3662

For a four-axle shunting electric locomotive, a mathematical description of the wheel set slipping process is made in the case of using the electric drive system "frequency converter - asynchronous motor". The relevance of the work lies in the possibility of using a computer model in the development and study of the asynchronous motor operation processes for the traction electric drive of an electric locomotive in various operating modes. The purpose of the article is to study transient slipping processes on a dynamic computer model of a traction asynchronous electric drive using the FC-AD system for a four-axle electric locomotive. The mathematical modeling methods in the Matlab Simulink environment, the basic provisions of physics, theoretical mechanics, the electric drive theory, electric machines theory, the theory of electric drive control systems, as well as a dynamic computer model of an asynchronous electric drive are used. The NPM2 industrial shunting electric locomotive developed by the Novocherkassk Electric Locomotive Plant specifically for use at the production site of PJSC MMK was taken as the basis for creating the model. The developed computer model of the electric drive is tuned to the specific parameters of the traction motors, it allows you to calculate transients in the FC-IM system taking into account the choice of gaps in the coupling and slipping. The article gives a brief description of the wheel set slipping processes, describes the main types of these processes according to the conditions of the occurrence, developed differential equations of motion during slipping and structural diagrams of mathematical models that take into account the operation of the traction electric drive taking into account various control systems and slipping of a four-axle electric locomotive. The research group carried out assessment of transient processes for selected gaps of coupling devices along the entire train length, conditions for stable slipping are obtained, conclusions are made about the feasibility of introducing a linear speed sensor into the automatic control system of locomotive electric drives.

Keywords: four-axle electric locomotive, slipping, shunting locomotive, wheel set, traction electric drive, traction force, slippage, adhesion force, wheel-rail system, frequency converter, asynchronous motor, computer model, control systems

REFERENCES

1. Omelchenko E.Ya., Tanich V.O., Enin S.S., Lymar A.B. Dynamic mathematical model of the system "frequency inverter – asynchronous drive" with vector control". Certificate of State Registration of the Computer Program No. 2015614458.
2. Omelchenko E., Tanich V., Kopotilov V.I. Traction power of a locomotive and its theoretical substantiation. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie. Nauchnyi informatsionnyi sbornik.* [Transport: science, technology, management. Scientific information collection], 2017, no. 11, pp. 31-35. (In Russian)
3. Rudnev V.S. Fundamentals of train traction. Traction force and traction characteristics of locomotives. *Lokomotiv* [Locomotive Engine Journal], 2017, no. 12 (732), pp. 21-25. (In Russian)
4. Novoseltsev V.P., Novoseltsev P.V., Gordeeva A.A. Influence of the track longitudinal rigidity on the possibility of the locomotive wheelset slipping when moving in the traction mode. *Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatelskiy zhurnal* [International research journal], 2013, no. 4-1 (11), pp. 93-95. (In Russian)
5. Samme G.V. *Frikcionnoe vzaimodejstvie kolesnyh par lokomotiva s relsami* [Frictional interaction of locomotive wheelsets with rails]. Moscow, Marshrut Publ., 2005. 80 p. (In Russian)
6. Sidyakov V.A., Andreeva L.A., Kolchanov A.G. *Aktualizatsiya pravil tyagovyh raschetov na promyshlennom zheleznodorozhnom transporte* [Updating the rules for traction calculations in industrial railway transport. Methodological guide to SoR 37.13330.2012, BC 2.05.07-91 Industrial transport]. Moscow, CJSC PROMTRANSNIIPROECT Publ., 2016. 95 p. (In Russian)
7. Tanich V.O., Enin S.S., Omelchenko E.Ya., Bely A.V. *Raschet nagruzki lokomotiva po traektorii dvizheniya poezda* [Calculation of the load of the locomotive along the trajecto-

ry of the train]. Computer program RF, no. 2019618026, 2019.
8. Samme G.V., Yakovlev V.A. Clutch characteristics and behavior of motor-wheel blocks of an electric locomotive during boxing. *Nauka i tekhnika transporta* [Journal of Science and Technology of Transport], 2009, no. 3, pp. 16-26. (In Russian)
9. Kramskov S.A., Kurochka A.A., Volkov S.G., Shapiro M.P., Kireev A.V., Kabanov D.A. Results of adjustment and acceptance testing of the electric industrial locomotive NPM2-001. *Vestnik Vserossiyskogo naucho-issledovatelskogo i proektno-konstruktorskogo instituta elektrovozostroeniya* [All-Russian Research and Design Institute of Electric Locomotive Building], 2005, no. 2, pp. 227-237. (In Russian)
10. Andriyanov V.I., Nikitenko V.S. NPM2 is a world-class electric locomotive. *Vestnik Vserossiyskogo naucho-issledovatelskogo i proektno-konstruktorskogo instituta elektrovozostroeniya* [Bulletin of the All-Russian Research and Design Institute of Electric Locomotive Building], 2008, no. 2, pp. 271-275. (In Russian)
11. Ryabov E.S. On the issue of creating shunting electric locomotives. Information and key systems on the transshipment transport, 2015, no. 3 (112), pp. 69-72.
12. Sinyavskiy I.V., Shitova L.V., Posokhov E.O., Izotov S.M. Traction converter made with a new element base for an industrial electric locomotive NPM2 with an asynchronous traction motor. *Vestnik Vserossijskogo nauchno-issledovatelskogo i proektno-konstruktorskogo instituta elektrovozostroeniya* [Bulletin of the All-Russian Research and Design Institute of Electric Locomotive Building], 2012, no. 2 (64), pp. 23-32. (In Russian)
13. Samme G.V. New results in the theory of locomotive adhesion. *Transport Rossijskoj Federacii* [Transport of the Russian Federation], 2010, no. 3 (28), 14-16 pp. (In Russian)
14. Lyapushkin N.N., Savoskin A.N., Chukin A.A. Modeling the processes of a locomotive adhesion to a rail. *Transport Rossijskoj Federacii* [Transport of the Russian Federation], 2010, no. 6(31), pp. 50-53. (In Russian)
15. Omelchenko E., Khramshin T., Tanich V., Kozhevnikov I. Dynamic Computer Model of Traction Asynchronous Motor. 2019 IEEE Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice (PEAMI). IEEE, 2019, pp. 59-63. doi: 10.1109/PEAMI.2019.8915408
16. Omelchenko E.Ya., Telezhkin O.A., Moiseev V.O., Enin S.S. Dynamic mathematical model of a three-phase asynchronous motor with a squirrel-cage rotor. Computer program RF, no. 2014617766. (In Russian)
17. Lymar A. The Operation Researching of a Traction Asynchronous Electric Drive in the Electric Locomotive on a Dynamic Model. 2020 Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice (PEAMI). IEEE, 2020, pp. 44-49, doi: 10.1109/PEAMI49900.2020.9234347
18. Omelchenko E. Ya., Moiseev V.O., Telezhkin O.A. Analysis of the current regulators operation. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Bulletin of the Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2013, no. 4(44), pp. 81-85. (In Russian)

Омельченко Е.Я., Танич В.О., Лымарь А.Б. Процесс боксования четырехосного маневрового электровоза с тяговым электроприводом по системе «преобразователь частоты – асинхронный двигатель» // Электротехнические системы и комплексы. 2022. № 3(56). С. 28-35. https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-3(56)-28-35

Omelchenko E.Ya., Tanich V.O., Lymar A.B. Slipping Process of Four-Axle Shunting Electric Locomotive with Inverter Powered Asynchronous Traction Electric Drive. *Elektrotekhnicheskie sistemy i kompleksy* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2022, no. 3(56), pp. 28-35. (In Russian). https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-3(56)-28-35

ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА, АВТОМАТИКА И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

УДК 621.372.632 https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-3(56)-36-43

Маклаков А.С.[1], Радионов А.А.[2, 3], Цзин Т.[4]

[1] Южно-Уральский государственный университет (НИУ), Челябинск
[2] Московский политехнический университет
[3] Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова
[4] Китайский университет Цзиляна, Ханчжоу, Китай

АЛГОРИТМ СМЕНЫ СТРАТЕГИЙ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО ЗАПРОГРАММИРОВАННОЙ ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИИ ТРЕХУРОВНЕВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Формирование стратегий управления переключением полупроводниковых ключей силовых преобразователей с помощью заранее заданных последовательностей начинается во второй половине 20-го века. Основная идея стратегий заключается в модулировании напряжения преобразователя с определённым спектром гармоник. Следует отметить, что контролировать спектр гармоник трудноосуществимо в условиях низкой частоты переключений полупроводниковых модулей преобразователей классическими методами широтно-импульсной модуляции (ШИМ), такими как синусоидальной ШИМ или пространственно-векторной ШИМ. Низкая частота переключений в диапазоне от 150 до 900 Гц является следствием ограниченных возможностей полупроводниковой базы в области номинальных мощностей преобразователей свыше мегаватта. Развитие и исследование подобных способов управления переключением полупроводниковых модулей для преобразователей большой мощности является наиболее актуальным направлением ввиду их известных проблем в области электромагнитной совместимости, качества преобразованной электроэнергии и электрических потерь при частых коммутациях ключей, приводящих к перегревам. Существует ряд научных исследований, которые показывают эффективность изменения последовательностей подключений ключей преобразователей в процессе их работы, но алгоритм их смены подробно не рассмотрен в научной литературе. Статья посвящена разработке алгоритма смены стратегий предварительно запрограммированных широтно-импульсно модулируемых (ПЗШИМ) последовательностей переключений ключей трёхуровневого преобразователя. Сформулированы требования к разрабатываемому алгоритму, учитывающие значения коэффициента модуляции, угол сдвига внутренней ЭДС преобразователя от напряжения сети, а также состояния полупроводниковых модулей каждой фазы преобразователя. Проведены экспериментальные исследования на лабораторном оборудовании и показана работоспособность предложенного алгоритма. Определены перспективы использования результатов исследования для высоковольтных преобразователей.

Ключевые слова: силовая преобразовательная техника, силовая электроника, широтно-импульсная модуляция, заранее заданные последовательности переключений, трёхуровневый преобразователь

ВВЕДЕНИЕ

Развитие силовой преобразовательной техники в области больших мощностей привело к широкому внедрению энергосберегающих систем преобразования и передачи электрической энергии на основе двунаправленных трехуровневых преобразователей частоты [1-3]. Они позволяют обеспечить:

1. Рекуперацию электрической энергии в питающую сеть в тормозных режимах электропривода.
2. Поддержание нулевого сдвига первой гармоники тока по отношению к входному напряжению.
3. Компенсацию реактивной мощности в точке подключения к питающей сети.
4. Обеспечение норм международных стандартов качества напряжения и потребляемого тока в диапазоне низких и средних частот.

Следует отметить, что последний пункт трудноосуществим в условиях низкой частоты переключений полупроводниковых модулей преобразователей классическими методами широтно-импульсной модуляции (ШИМ), такими как синусоидальной ШИМ или пространственно-векторной ШИМ. Низкая частота переключений в диапазоне от 150 до 900 Гц является следствием ограниченных возможностей полупроводниковой базы в области номинальных мощностей преобразователей свыше мегаватта. Повышение частоты переключений полупроводниковых ключей при такой мощности приведет к существенным дополнительным электрическим потерям и перегревам [4-6].

Специалистами и учеными в области силовой преобразовательной техники был развит специальный метод ШИМ, который в международной литературе получил название «предварительно запрограммированная ШИМ» (ПЗШИМ) (с англ. pre-programmed PWM), направленный на решение проблем обеспечения электромагнитной совместимости высокомощных преобразователей. Развитие и исследование ПЗШИМ для управления переключением полупроводниковых ключей преобразователей большой мощности является наиболее актуальным направлением ввиду их широкоизвестных проблем в области электромагнитной совместимости, качества электроэнергии и значительных потерь при коммутации, приводящих к перегревам. ПЗШИМ обладает следующими полезными свойствами в сравнении с другими методами модуляции [7, 8]:

1) ниже динамические коммутационные потери;
2) лучше показатели качества электроэнергии на низкой частоте коммутации ключей;
3) действующее значение внутренней ЭДС преобразователя больше за счет снижения количества переключений;
4) уменьшились массогабаритные показатели синус-фильтров.

© Маклаков А.С., Радионов А.А., Цзин Т., 2022

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ

В статье [9] был применен алгоритм смены синусоидальной ШИМ на векторную ШИМ для достижения баланса напряжений конденсаторов звена постоянного тока трёхуровневого преобразователя. Опубликованные в работе [10] результаты работы алгоритма смены пространственно-векторной ШИМ и ШИМ с удалением выделенных гармоник снизили динамические потери ключей в установившихся режимах работы инвертора напряжения. Исследования в работах [11, 12] показали повышение эффективности инверторов электроприводов ветрогенераторов посредством смены пространственно-векторной ШИМ на ШИМ с удалением выделенных гармоник в установившихся режимах. Существует ряд и других работ, которые тем или иным образом показывают эффективность изменения стратегий ШИМ преобразователей в процессе их работы.

Однако литературный обзор показал, что алгоритм смены различных методов ШИМ не представлен, а вопрос смены одной стратегии ПЗШИМ на другую не рассмотрен вовсе.

ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ СТАТЬИ

Цель данной статьи – продемонстрировать разработанный авторами алгоритм, позволяющий осуществить смену различных стратегий ПЗШИМ трёхуровневого преобразователя без дополнительных переключений и коротких замыканий в силовой цепи. Алгоритм смены стратегий ПЗШИМ может улучшить качество преобразованной электроэнергии широтно-импульсно модулируемыми высоковольтными силовыми полупроводниковыми преобразователями в различных режимах работы. В работе представлены результаты экспериментальных исследований на лабораторном исследовательском стенде для подтверждения работоспособности предложенного алгоритма.

СТРАТЕГИИ ПЗШИМ

Формирование стратегий управления полупроводниковыми преобразователями с помощью заранее заданных последовательностей переключений полупроводниковых модулей начинается во второй половине 20-го века. Основная идея данных стратегий заключается в модулировании напряжения преобразователя с определённым спектром гармоник вне зависимости от величины амплитуды или частоты самого сигнала. Развитие и исследование подобных способов управления переключением полупроводниковых ключей для преобразователей большой мощности является наиболее актуальным направлением ввиду их широкоизвестных проблем в области электромагнитной совместимости, качества электроэнергии и значительных потерь при коммутации, приводящих к перегревам.

В научной литературе предложены несколько стратегий к формированию спектров сигналов с помощью ПЗШИМ. Все они основаны на поиске углов переключений α по определённому критерию оптимальности. Любая стратегия ПЗШИМ с четвертьволновой симметрией задаёт форму выходного напряжения внутренней ЭДС преобразователя, подавая сигналы управления полупроводниковыми модулями в заранее заданные моменты времени с помощью предварительно рассчитанных углов переключений α_1, α_2, ... , α_N, в количестве N штук за четверть периода напряжения внутренней ЭДС преобразователя в интервале от 0 до π/2 при условии, что $0 < \alpha_1 < \alpha_2 < ... < \alpha_N < \pi/2$. При подавлении отдельных гармонических составляющих дополнительно вводятся ограничения по уровню каждой n-й гармонической составляющей напряжения внутренней ЭДС преобразователя. Типовая форма сигнала фазной ЭДС с ПЗШИМ показана на **рис. 1**.

Логика формирования сигналов управления переключением полупроводниковых модулей преобразователя посредством ПЗШИМ показана на **рис. 2**, где α_1, α_2 и α_3 – углы переключения, полученные на основе заданных значений коэффициента модуляции M, фазы сигналов θ_A, θ_B и θ_C, формирующиеся на основе значений α' и θ. Затем α_1, α_2 и α_3 сравниваются с сигналами θ_A, θ_B и θ_C, формируя логические сигналы управления для каждой фазы трёхуровневого преобразователя. Для любых других последовательностей переключений схема строится схожим образом [13].

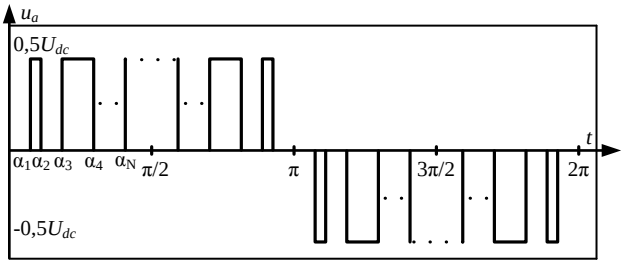


Рис. 1. Типовая форма сигнала фазной ЭДС преобразователя с ПЗШИМ

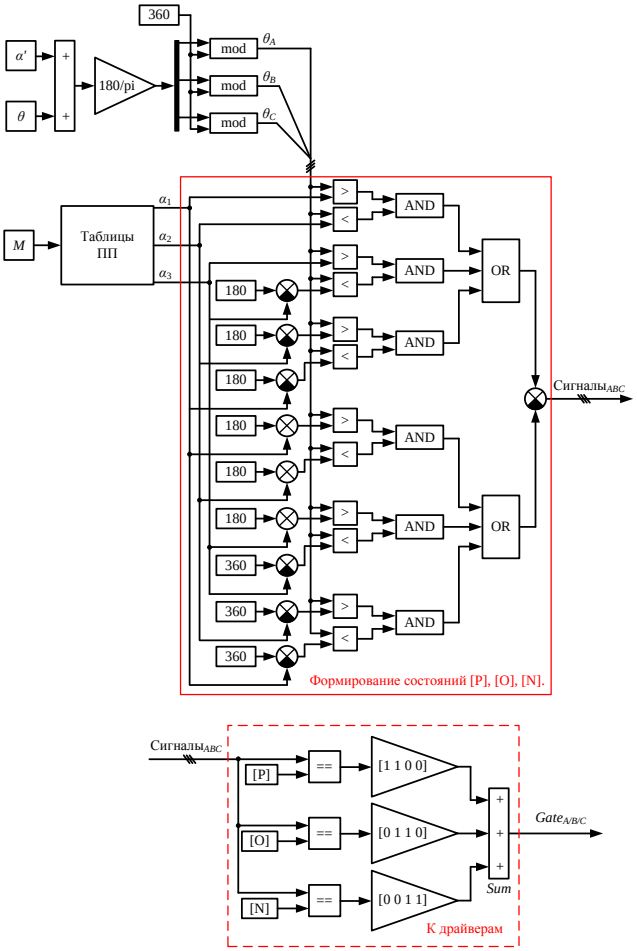


Рис. 2. Пример логической схемы ПЗШИМ

АЛГОРИТМ СМЕНЫ РАЗЛИЧНЫХ СТРАТЕГИЙ ПЗШИМ

В основу требований к разрабатываемому алгоритму смены ПЗШИМ положено:

1. Исключение возможных коротких замыканий в силовой цепи.
2. Минимизация переключений.

На **рис. 3** представлена блок-схема созданного алгоритма, в которой основными функциональными блоками являются: «Определение текущей последовательности переключений (ТПП)», «Идентификация смены ТПП», «Формирование предыдущей последовательности переключений (ППП)», «Сравнение ТПП и ППП» и «Формирование новой последовательности переключений (НПП)».

При запуске алгоритма происходит определение номера ТПП и формируется при этом соответствующий сигнал «1» или «2»:

$$\text{ТПП} = \begin{cases} 1, & \text{ПЗШИМ №1;} \\ 2, & \text{ПЗШИМ №2.} \end{cases} \quad (1)$$

В случае если сигнал на смену ПЗШИМ инициируется, то с выхода блока «Идентификация смены ТПП» формируется заданный номер стратегии ПЗШИМ, и логический сигнал «1» поступает на блок формирования ППП. На этом этапе появляется логический сигнал, обозначающий переход на новую стратегию ПЗШИМ:

$$\text{ППП} = f(\text{ТПП}, \text{СПП}) = \\ = \begin{cases} 1, & \text{ТПП} = 1, \text{СПП} = 1; \\ 2, & \text{ТПП} = 2, \text{СПП} = 1. \end{cases} \quad (2)$$

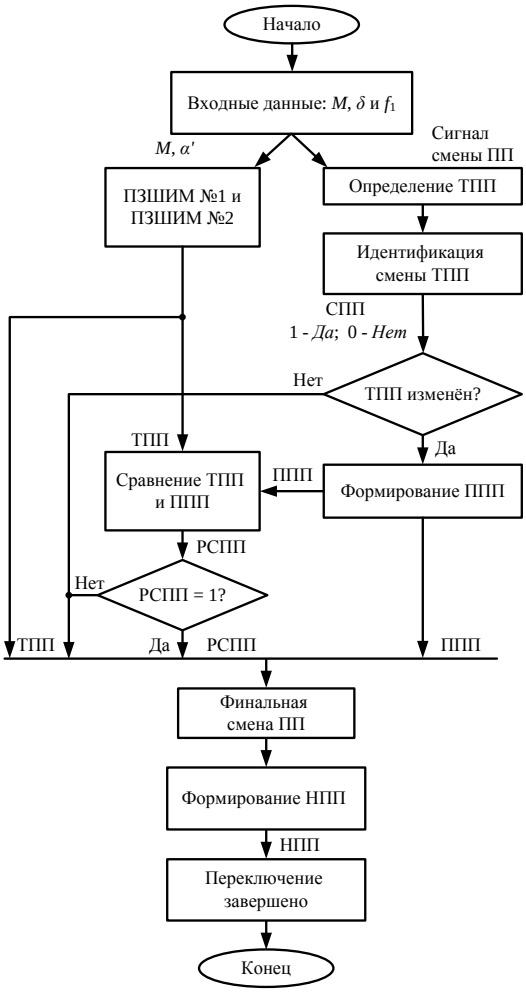


Рис. 3. Блок-схема предложенного алгоритма

Далее происходит сравнение состояний ТПП и ППП. Компаратор разрешает или запрещает смену стратегий ПЗШИМ. В алгоритме данный этап обозначен промежуточной переменной «результат сравнения последовательностей переключений (РСПП)». Если состояния работы полупроводниковых модулей при ТПП и ППП отличаются, то РСПП выдаст логический сигнал «0», а если нет, то логический сигнал «1»:

$$\text{РСПП} = f(\text{ТПП}, \text{ППП}) = \begin{cases} 0; \\ 1. \end{cases} \quad (3)$$

На последнем этапе работы алгоритма логические сигналы ТПП, ППП и РСПП проверяются, и, если все логические сигналы «1», то смена стратегии ПЗШИМ выполняется:

$$\text{НПП} = f\begin{pmatrix} \text{ТПП}, \\ \text{ППП}, \\ \text{РСПП} \end{pmatrix} = \\ = \begin{cases} 1, & \text{ТПП} = 1, \text{ППП} = 2, \text{РСПП} = 1; \\ 2, & \text{ТПП} = 1, \text{ППП} = 1, \text{РСПП} = 1. \end{cases} \quad (4)$$

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Проверка работоспособности предложенного алгоритма была выполнена в лаборатории силовой преобразовательной техники Южно-Уральского государственного университета. Фотография исследовательского оборудования представлена на **рис. 4**.

В среде программирования Matlab/Simulink был разработан исполняемый код алгоритма смены ПЗШИМ последовательностей переключений полупроводниковых модулей преобразователя, затем он интерпретирован в C/C++ код и загружен в микроконтроллер TMS320C28346 платформы управления силовыми трёхуровневыми полупроводниковыми модулями P924F33 Vincotech. Посредством консольного соединения с платформой управления и специализированного программного обеспечения осуществлялось графическое отображение и управление данными микроконтроллера.

Результаты работы разработанного алгоритма смены последовательностей переключений ПЗШИМ продемонстрированы на **рис. 5, а**.

Первая область «А» (**рис. 5, б**) показывает переход от ПЗШИМ №1 к ПЗШИМ №2, а вторая область «В» (**рис. 5, в**) показывает переход от ПЗШИМ №2 к ПЗШИМ №1. Для демонстрации был выбран период времени от 0,1 до 0,5 с.

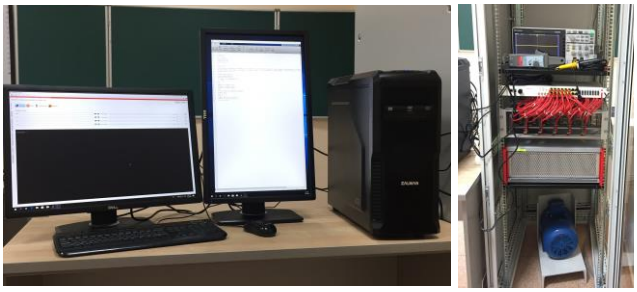


Рис. 4. Общий вид исследовательского стенда

На **рис. 6** продемонстрирована смена двух стратегий ПЗШИМ №1 и ПЗШИМ №2. В момент времени t=0,02 с поступает сигнал смены ПП. Фазные ЭДС преобразователя сразу меняют свою форму, так как вступившая в работу по сигналу «Финальная смена ПП» новая стратегия ПЗШИМ имеет уже другие моменты переключений полупроводниковых модулей преобразователя. Из **рис. 6** можно убедиться, что смена последовательностей ПЗШИМ происходит без дополнительных переключений.

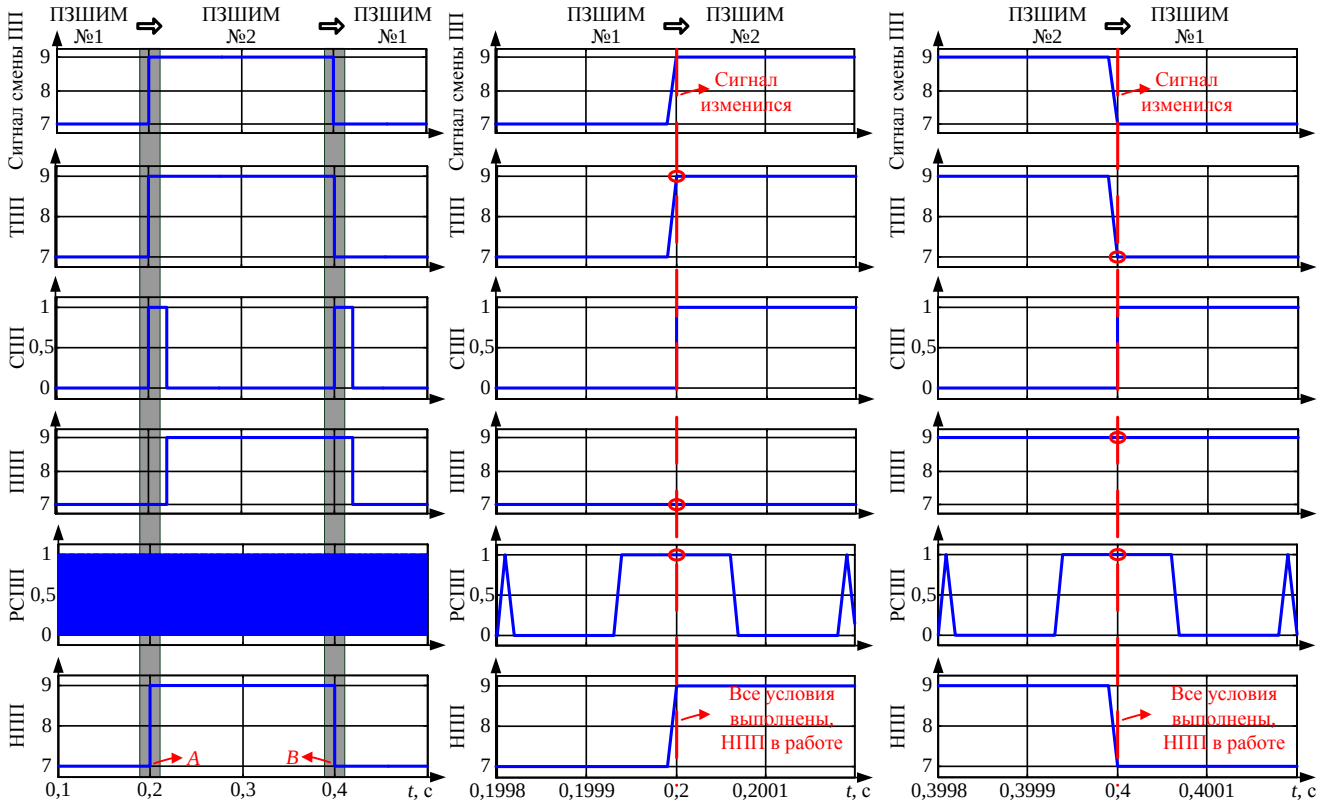


Рис. 5. Смена двух последовательностей ПЗШИМ (а), увеличение области «А» момента переключения с ПЗШИМ №1 на ПЗШИМ №2 (б), увеличение области «В» момента переключения с ПЗШИМ №2 на ПЗШИМ №1 (в)

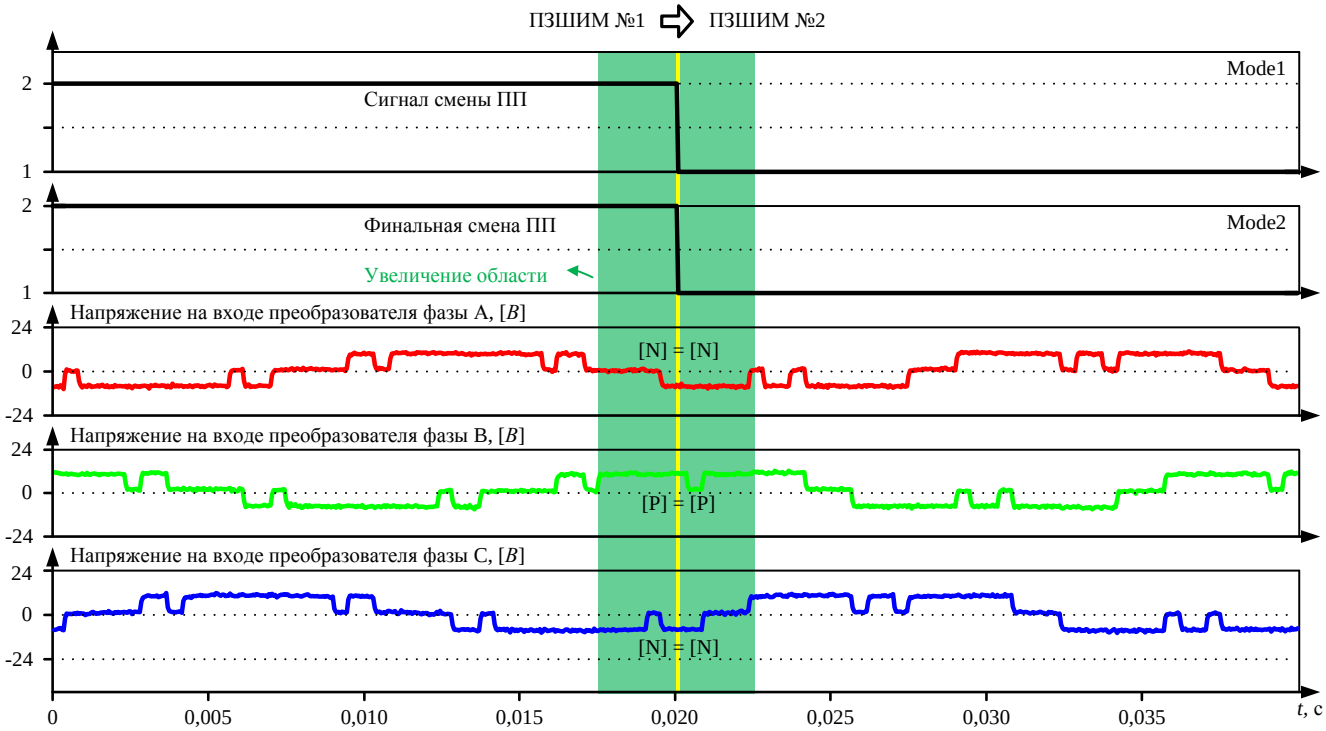


Рис. 6. Измеренные сигналы фазных ЭДС преобразователя

Рис. 7 демонстрирует смену двух стратегий ПЗШИМ №1 и ПЗШИМ №2, где в увеличенном масштабе на **рис. 8** можно увидеть, что фазные ЭДС преобразователя не меняют свою форму по сигналу смены ПП. При t = 0,02 с ПЗШИМ №2 имеет различные состояния с ПЗШИМ №1, что не позволяет осуществить смену ПЗШИМ. Смена ПЗШИМ выполняется алгоритмом через время Δt, когда состояния последовательностей ПЗШИМ полностью совпадают.

Далее продемонстрирован ещё один эксперимент при выполнении перехода между двумя последовательностями ПЗШИМ с высокой и низкой частотой переключений полупроводниковых модулей. На **рис. 9** показаны измеренные сигналы фазных ЭДС преобразователя при переходе от ПЗШИМ с частотой 150 Гц к ПЗШИМ с частотой 750 Гц, а на **рис. 10** продемонстрирована их обратная смена.

На основе результатов экспериментальных исследований можно сделать вывод о работоспособности предложенного алгоритма при различных вариантах смены последовательностей ПЗШИМ. Если условия смены не выполняются в момент поступления сигнала смены ПЗШИМ, то алгоритм позволяет определить момент, при котором все условия для переключения будут выполнены. Это даёт возможность избежать коротких замыканий и дополнительных переключений полупроводниковых модулей преобразователя.

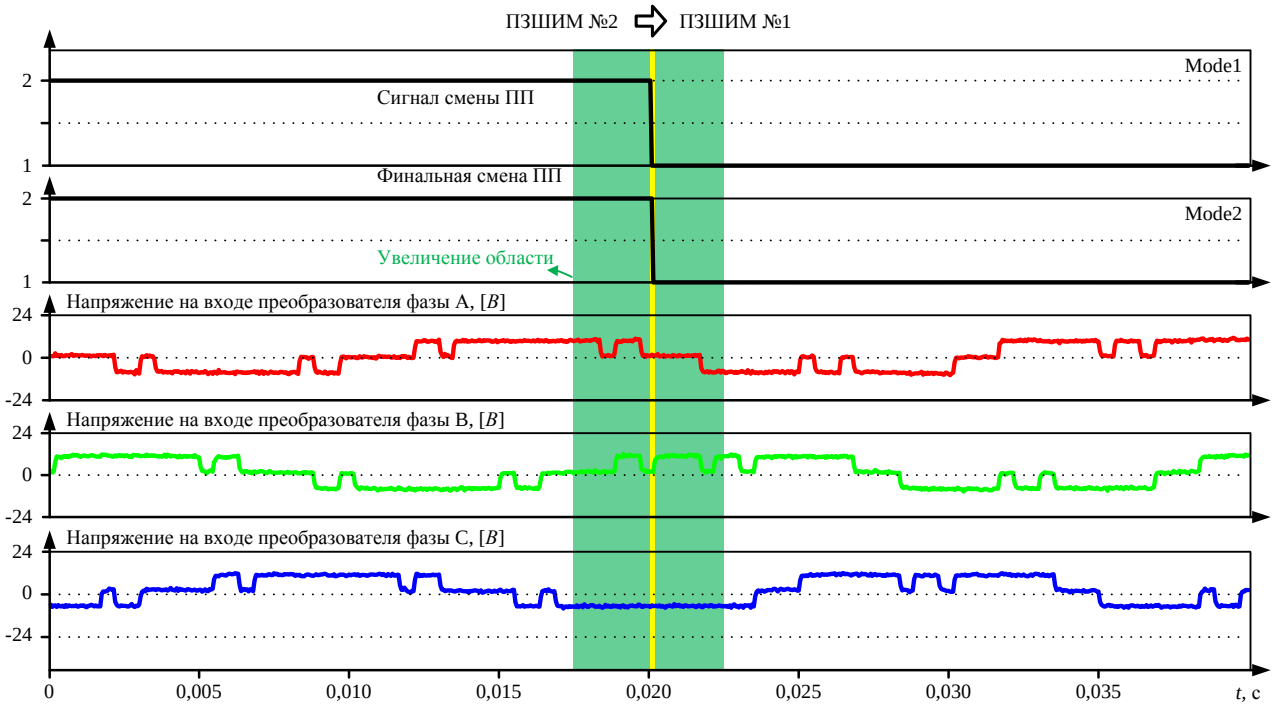


Рис. 7. Измеренные сигналы фазных ЭДС преобразователя

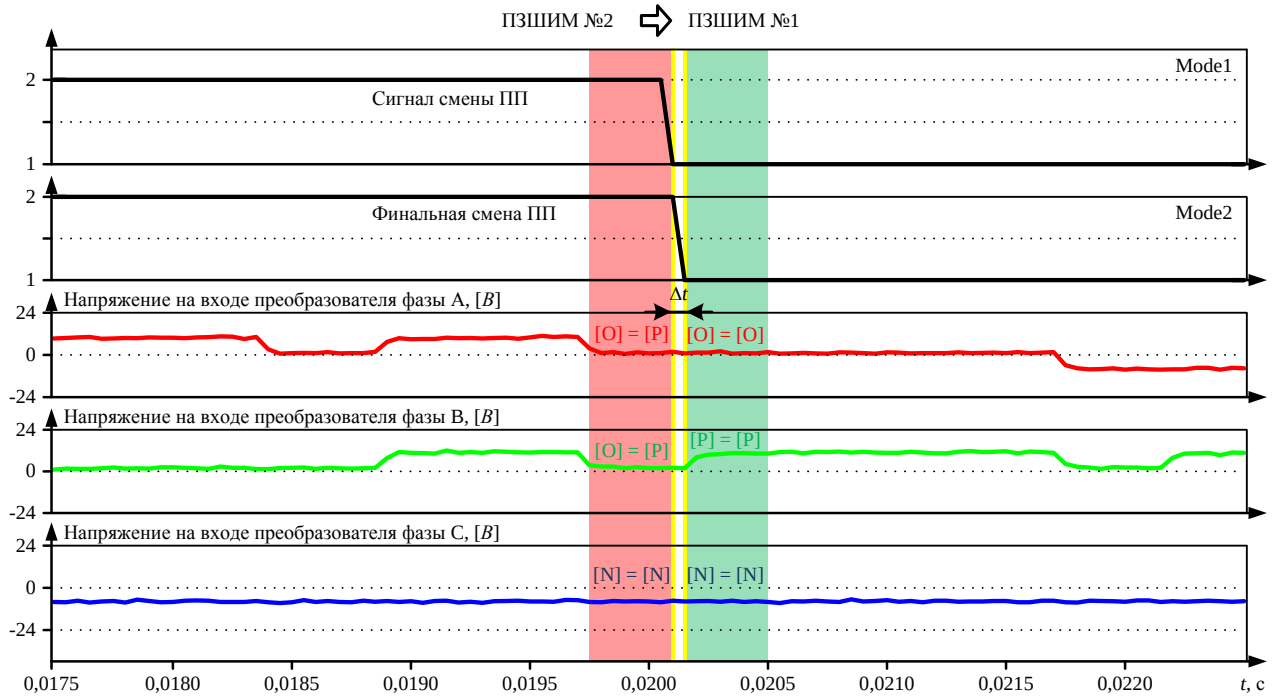


Рис. 8. Смена ПЗШИМ (увеличение рис. 7)

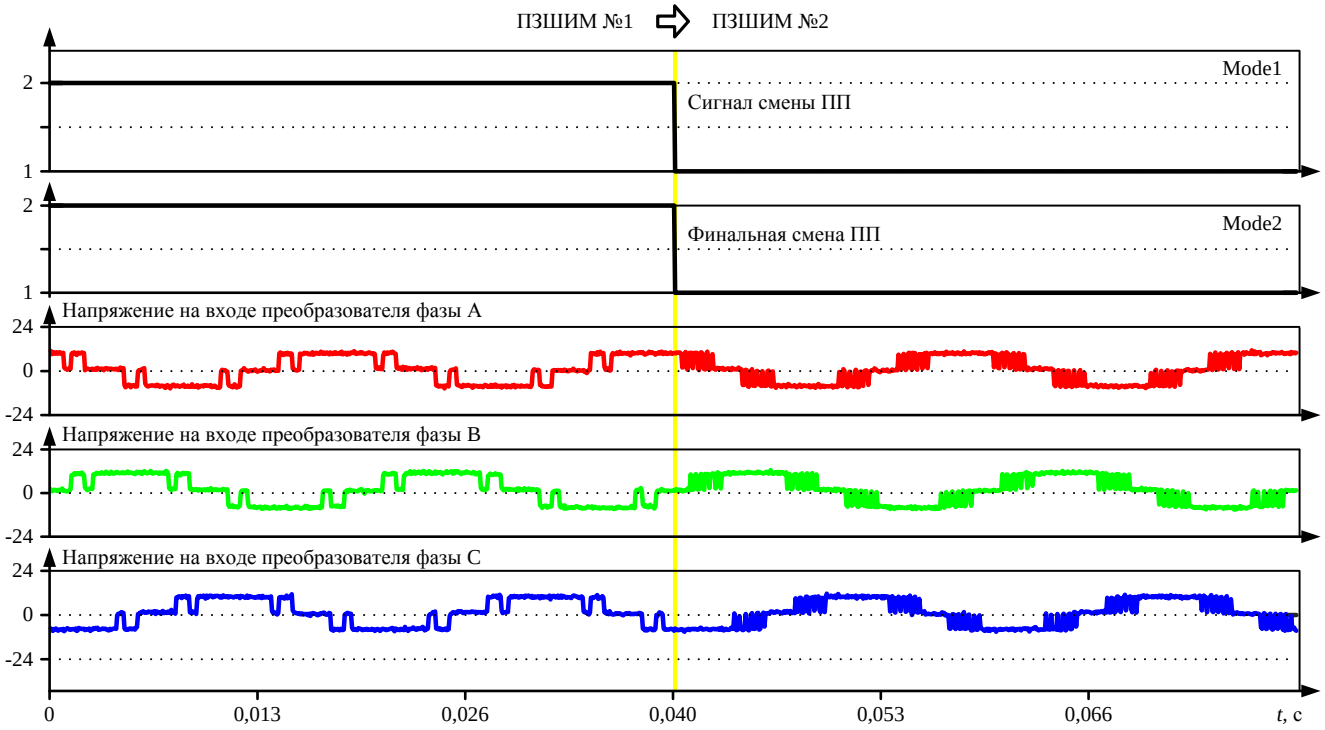


Рис. 9. Переход от ПЗШИМ (150 Гц) к ПЗШИМ (750 Гц)

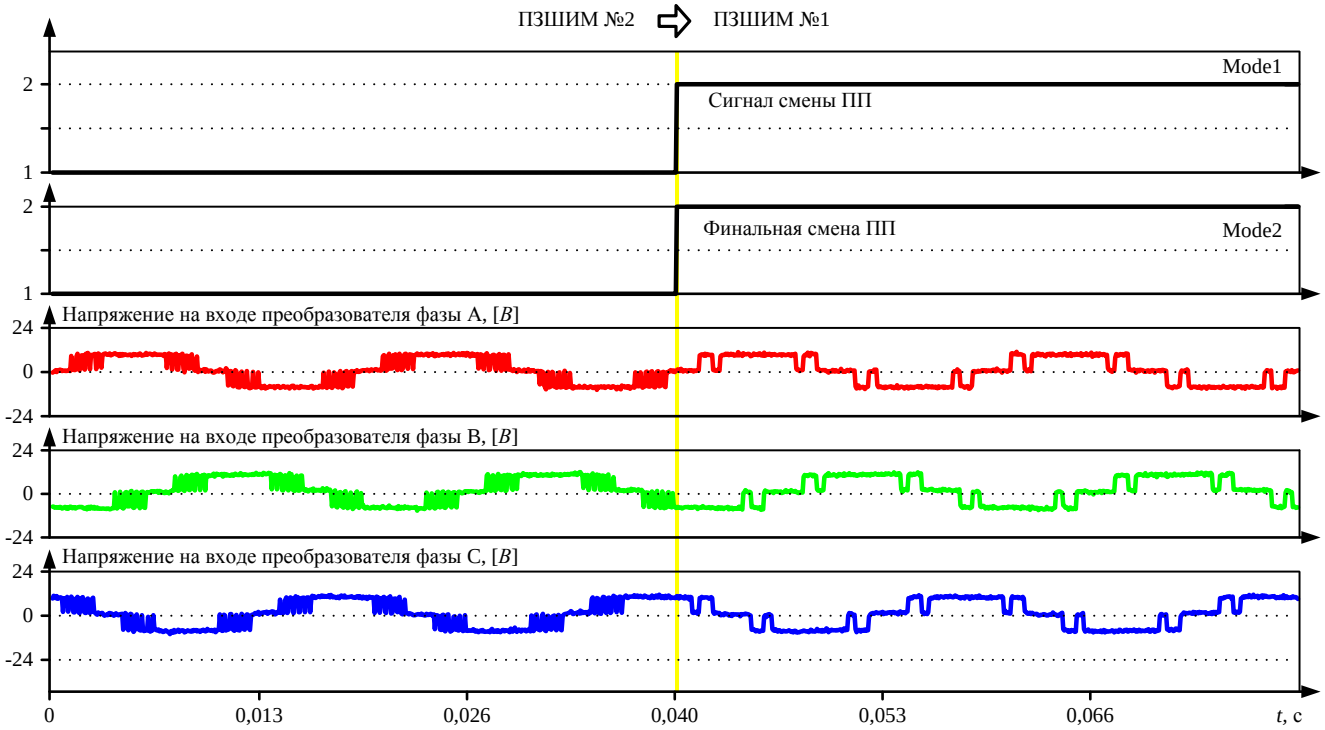


Рис. 10. Переход от ПЗШИМ (750 Гц) к ПЗШИМ (150 Гц)

Заключение

1. В статье продемонстрирован алгоритм смены ПЗШИМ трёхфазного трехуровневого преобразователя, позволяющего изменять последовательности ПЗШИМ без дополнительных переключений и коротких замыканий в силовой цепи.

2. Доказана работоспособность предложенного алгоритма путём анализа экспериментальных данных, полученных с помощью измерительного оборудования исследовательского стенда.

3. Предложенный алгоритм имеет перспективы использования для высоковольтных преобразователей, в частности в области ветроэнергетических комплексов, электроприводов металлургических прокатных станов и мощных судовых электроприводов, где применяются трёхуровневые преобразователи.

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

Список источников

1. Wu B., Narimani M. High-power converters and AC drives. New Jersey. 2nd ed. Wiley-IEEE Press, 2017. 480 p.
2. Medium-Voltage Drives: Challenges and existing technolo-

gy / H. Abu-Rub, S. Bayhan, S. Moinoddin, M. Malinowski, J. Guzinski // IEEE Power Electronics Magazine. 2016. Vol. 3. No. 2. Pp. 29-41. doi: 10.1109/MPEL.2016.2551802
3. Jing T., Maklakov A.S. A review of voltage source converters for energy applications // International Ural Conference on Green Energy. IEEE, 2018. Pp. 275-281. doi: 10.1109/URALCON.2018.8544364
4. The Essential Role and the Continuous Evolution of Modulation Techniques for Voltage-Source Inverters in the Past, Present, and Future Power Electronics / J.I. Leon, S. Kouro, L.G. Franquelo, J. Rodriguez, B. Wu // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2016. Vol. 63. No. 5. Pp. 2688-2701. doi: 10.1109/TIE.2016.2519321
5. Nikolaev A.A., Gilemov I.G., Denisevich A.S. Analysis of Influence of Frequency Converters with Active Rectifiers on the Power Quality in Internal Power Supply Systems of Industrial Enterprises // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). IEEE, 2018. Pp. 1–4. doi: 10.1109/ICIEAM.2018.8728819
6. Nikolaev A.A., Gilemov I.G., Antropova L.I. Fearures of the Mathematical Modeling of Frequency Converters with Active Rectifiers for Power Quality Analysis in Internal Power Supply Systems // IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). IEEE, 2020. Pp. 774-778. doi: 10.1109/EIConRus49466.2020.9038988
7. Providing Electromagnetic Compatibility of High-Power Frequency Converters with Active Rectifiers at Internal Power Supply System of Cherepovets Steel Mill / A.A. Nikolaev, I.G. Gilemov, M.V. Bulanov, V.I. Kosmatov // XVIII International Scientific Technical Conference Alternating Current Electric Drives (ACED). IEEE, 2021. Pp. 1-8. doi: 10.1109/ACED50605.2021.9462264
8. Цзин Тао. Разработка методов расчёта и алгоритма смены предварительно запрограммированных широтно-импульсно модулируемых последовательностей переключений полупроводниковых модулей трёхфазного трёхуровневого активного выпрямителя напряжения с фиксирующими диодами: дис. … кан. техн. наук. 05.09.12 / Цзин Тао. Челябинск, 2021.
9. Hybrid PWM strategy of SVPWM and VSVPWM for NPC three-level voltage-source inverter / W. Jiang, S. Du, L. Chang, Y. Zhang, Q. Zhao // IEEE Transactions on Power Electronics. 2010. Vol. 25. No. 10. Pp. 2607-2619. doi: 10.1109/TPEL.2010.2041254
10. Adjustable proportional hybrid SVPWM strategy for neutral-point-clamped three-level inverters / C. Xia, H. Shao, Y Zhang, X. He // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2013. Vol. 60, no. 10. Pp. 4234-4242. doi: 10.1109/TIE.2012.2213558
11. Zhang Y. Hybrid PWM scheme for grid-connected PV inverter: M.-Eng / Yang Fan Zhang. Zhejiang, 2014.
12. Hybrid PWM Scheme for the Grid Inverter / Y. Zhang, D. Xu, C. Yan, S. Zou // IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics. 2015. Vol. 3. No. 4. Pp. 1151-1159. doi: 10.1109/JESTPE.2015.2451159
13. A flexible hybrid selective harmonic elimination transition algorithm to provide variable frequency of output voltage in 3L-NPC inverter / T. Jing, A.S. Maklakov, A.A. Radionov, V.R Gasiyarov // 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. IEEE, 2019. Pp. 3307-3311. doi: 10.1109/IECON.2019.8927054

Поступила в редакцию 26 мая 2022 г.

INFORMATION IN ENGLISH

SWITCHING ALGORITHM OF PREPROGRAMMED PULSE-WIDTH MODULATION PATTERNS FOR THREE-LEVEL CONVERTER

Alexander S. Maklakov

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

Andrey A. Radionov

D.Sc. (Engineering), Professor, Department of Automation and Control, Moscow Polytechnic University, Nosov Magnitogorsk state Technical University, Moscow, Russia, radionov.mail@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-3914-4429

Tao Jing

Ph.D. (Engineering), Lecturer, School of Mechanical and Electrical Engineering, China Jiliang University, Hangzhou, Zhejiang, China, jingtao19940214@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-1371-1031

The formation of semiconductor switching strategies for power converters based on preprogrammed switching patterns begins in the second half of the 20th century. The main idea of the strategies is to modulate the converter output voltage with a defined harmonicspectrum. It should be noted that it is difficult to control the harmonic spectrum at a low switching frequency of converter semiconductor modules using classical pulse-width modulation (PWM) methods, such as sinusoidal PWM or space-vector PWM. The low switching frequency in the range from 150 Hz to 900 Hz is a consequence of limited capabilities of the semiconductors of converter power ratings above one megawatt. The development and research of the switching methods of semiconductor modules for high-power converters are the most relevant directions due to their well-known problems in electromagnetic compatibility, power quality and switching losses leading to overheating. There are some scientific articles presenting the effectiveness of changing the modulation methods, but the changing algorithm is not considered in detail. This article is devoted to the development of an algorithm for changing strategies for pre-programmed pulse-width modulated (PPWM) for a three-level converter. The requirements for the developed algorithm are formulated on a modulation index, a shift angle of the output converter voltage and power converter semiconductor module states. Experimental studies were carried out on laboratory equipment and the efficiency of the proposed algorithm was shown. The prospects of research results for high-voltage converters are determined.

Keywords: power converters, power electronics, pulse-width modulation, preprogrammed PWM, three level converter

REFERENCES

1. Wu B., Narimani M. High-power converters and AC drives. New Jersey. 2nd ed. Wiley-IEEE Press, 2017. 480 p.
2. Abu-RubH., Bayhan S., Moinoddin S., Malinowski M.,

Guzinski J. Medium-Voltage Drives: Challenges and existing technology. IEEE Power Electronics Magazine, 2016. vol. 3, no. 2, pp. 29–41. doi: 10.1109/MPEL.2016.2551802

3. Jing T., Maklakov A.S. A review of voltage source converters for energy applications. 2018 International Ural Conference on Green Energy. IEEE, 2018, pp. 275-281. doi: 10.1109/URALCON.2018.8544364
4. Leon J.I., Kouro S., Franquelo L.G., Rodriguez J., Wu B. The Essential Role and the Continuous Evolution of Modulation Techniques for Voltage-Source Inverters in the Past, Present, and Future Power Electronics. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, vol. 63, no. 5, pp. 2688–2701. doi: 10.1109/TIE.2016.2519321
5. Nikolaev A.A., Gilemov I.G., Denisevich A.S. Analysis of Influence of Frequency Converters with Active Rectifiers on the Power Quality in Internal Power Supply Systems of Industrial Enterprises. 2018 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). IEEE, 2018, pp. 1–4. doi: 10.1109/ICIEAM.2018.8728819
6. Nikolaev A.A., Gilemov I.G., Antropova L.I. Features of the Mathematical Modeling of Frequency Converters with Active Rectifiers for Power Quality Analysis in Internal Power Supply Systems. 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), pp. 774-778. doi: 10.1109/EIConRus49466.2020.9038988
7. Nikolaev A.A., Gilemov I.G., Bulanov M.V., Kosmatov V.I. Providing Electromagnetic Compatibility of High-Power Frequency Converters with Active Rectifiers at Internal Power Supply System of Cherepovets Steel Mil. 2021 XVIII International Scientific Technical Conference Alternating Current Electric Drives (ACED). IEEE, 2021, pp. 1-8. doi: 10.1109/ACED50605.2021.9462264
8. Jing T. *Razrabotka metodov rascheta i algoritma smeny predvaritelno zaprogramirovannykh shirotno-impulsno moduliruemykh posledovatelnostey pereklyucheniy poluprovodnikovykh module tryekhfaznogo tryekhurovnevogo aktivnogo vypryamitelya napryazheniya s fiksiruyushchimi diodami. Kand. Diss.* [Development of calculation methods and algorithm for changing preprogrammed pulse width modulation switching patterns of semiconductor modules for three-phase three-level neutral-point clamped active front end. Kand. Diss.]. Chelyabinsk, 2021.
9. Jiang W., Du S., Chang L., Zhang Y., Zhao Q. Hybrid PWM strategy of SVPWM and VSVPWM for NPC three-level voltage-source inverter. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, vol. 25, no. 10, pp. 2607–2619. doi: 10.1109/TPEL.2010.2041254
10. Xia C., Shao H., Zhang Y., He X. Adjustable proportional hybrid SVPWM strategy for neutral-point-clamped three-level inverters. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, vol. 60, no. 10, pp. 4234–4242. doi: 10.1109/TIE.2012.2213558
11. Zhang, Yang Fan. "Hybrid PWM scheme for grid-connected PV inverter". Zhejiang, 2014. 81 p.
12. Zhang Y., Xu D., Yan C., Zou S. Hybrid PWM Scheme for the Grid Inverter. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2015, vol. 3, no. 4, pp. 1151–1159. doi: 10.1109/JESTPE. 2015.2451159
13. Jing T., Maklakov A.S., Radionov A.A., Gasiyarov V.R. A flexible hybrid selective harmonic elimination transition algorithm to provide variable frequency of output voltage in 3L-NPC inverter. IECON 2019 – 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Oct. 2019. Pp. 3307–3311. doi: 10.1109/IECON.2019.8927054

Маклаков А.С., Радионов А.А., Цзин Т. Алгоритм смены стратегий предварительно запрограммированной широтно-импульсной модуляции трехуровневого преобразователя // Электротехнические системы и комплексы. 2022. № 3(56). С. 36-43. https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-3(56)-36-43

Maklakov A.S., Radionov A.A., Jing T. Switching Algorithm of Preprogrammed Pulse-Width Modulation Patterns for Three-Level Converter. *Elektrotekhnicheskie sistemy i kompleksy* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2022, no. 3(56), pp. 36-43. (In Russian). https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-3(56)-36-43

УДК [621.314.26+621.316.94+621.317.757]:621.311.1 https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-3(56)-44-53

Николаев А.А., Гилемов И.Г., Линьков С.А., Светлаков М.С.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СЕТИ 34,5 кВ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ЗАВОДА ЗАО «ММК METALURJI»

В системах внутризаводского электроснабжения металлургических заводов используются распределительные сети среднего напряжения 6–35 кВ. В результате взаимного влияния ёмкостей протяжённых кабельных линий и индуктивностей понизительных трансформаторов возможно возникновение резонансных явлений в диапазоне средних частот. В случае попадания высокочастотных гармоник, генерируемых преобразователями частоты с активными выпрямителями, в резонансную область возможны аварийные режимы работы потребителей во внутризаводской распределительной сети предприятия. Подобные явления могут приводить к длительным простоям технологического оборудования, браку продукции. Это влечёт за собой значительный экономический ущерб, особенно при производстве продукции с высокой добавленной стоимостью. В данной работе были отражены результаты экспериментальных исследований качества напряжения в распределительной сети 34,5 кВ металлургического завода «ММК Metalurji». Целью экспериментальных исследований был анализ текущих режимов работы системы электроснабжения для разработки научно обоснованных технических мероприятий, направленных на улучшение качества напряжения в точке общего подключения внутризаводских потребителей при основном режиме работы системы электроснабжения. При проведении экспериментальных исследований был применён анализатор качества электроэнергии Fluke 435 и токовых клещей Fluke i5s. Предложены мероприятия по улучшению электромагнитной совместимости преобразователей частоты с активными выпрямителями электроприводов стана горячей прокатки 1750 с питающей сетью.

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

ВВЕДЕНИЕ

Современный регулируемый электропривод (ЭП) переменного тока реализуется на базе преобразователей частоты (ПЧ). При значительной мощности ЭП часто применяются преобразователи частоты с активными выпрямителями (ПЧ-АВ) [1-10]. Благодаря применению АВ удаётся обеспечить работу ЭП с единичным коэффициентом мощности, а также при использовании специальных алгоритмов широтно-импульсной модуляции (ШИМ) улучшить электромагнитную совместимость (ЭМС) с питающей сетью.

Однако, несмотря на более высокие технические показатели по сравнению с диодными выпрямителями, АВ не лишены недостатков. При провалах питающего напряжения АВ показывают неустойчивую работу, часто приводящую к аварийным отключениям [7,11-13]. В случае применения специальных алгоритмов ШИМ, например ШИМ с удалением выделенных гармоник (ШИМ с УВГ) [14-20], АВ генерируют высокочастотные гармоники значительной величины [8].

На некоторых металлургических предприятиях при эксплуатации ПЧ-АВ наблюдались проблемы с функционированием электрооборудования. Например, происходили выходы из строя ПЧ, функционирующих параллельно мощным ПЧ-АВ главных ЭП прокатного стана [1, 2], аварийные отключения ПЧ-АВ при провалах и несимметрии напряжения питающей сети [7], ухудшение качества напряжения во внутризаводской распределительной сети [8].

В одной из предыдущих работ [8] была рассмотрена проблема электромагнитной совместимости мощных ПЧ-АВ с питающей сетью на металлургическом предприятии в России. Пять мощных электроприводов клетей и натяжной моталки были введены в работу после реконструкции четырехклетьевого стана холодной прокатки. Электроприводы были реализованы на базе трехуровневых ПЧ-АВ серии *ACS*6000 фирмы *ABB*. Проведённые исследования доказали, что сильные искажения напряжения обусловлены взаимным влиянием индуктивностей сетевых трансформаторов главной понизительной подстанции и ёмкостью кабельных линий. Было выявлено, что заданы неоптимальные настройки применяемого алгоритма ШИМ с УВГ в АВ. Были предложены новые настройки алгоритма ШИМ с учётом удаления высокочастотных гармоник потребляемого тока, попадающих в резонансную область частотной характеристики питающей сети относительно секций главной понизительной подстанции (ГПП). Проведённые мероприятия позволили практически двукратно улучшить качество напряжения в точке общего подключения внутризаводских потребителей.

Как показали исследования на металлургическом заводе «ММК Metalurji», имеются схожие проблемы с ЭМС ПЧ-АВ. При запуске стана горячей прокатки 1750 (*HSM*) и реверсивного стана холодной прокатки 1750 (*CRM*) обнаружилась невозможность работы в штатном режиме электроснабжения, когда два прокатных стана и другие второстепенные потребители запитаны от одного понизительного трансформатора 380/34,5 кВ. Низкое качество напряжения в распределительной сети предприятия приводило к аварийной работе чувствительных электроприёмников. В результате все ЭП стана горячей прокатки 1750 были вынуждены перевести на питание от резервного трансформатора с отдельной секции ГПП. Из-за этого отсутствует возможность проведения ремонтных мероприятий на трансформаторе, а также резерв. С целью разработки мероприятий, направленных на улучшение ЭМС

© Николаев А.А., Гилемов И.Г., Линьков С.А., Светлаков М.С., 2022

ПЧ-АВ с питающей сетью, были проведены экспериментальные исследования качества электроэнергии во внутризаводской распределительной сети 34,5 кВ металлургического завода ЗАО «MMK Metalurji».

ВНУТРИЗАВОДСКАЯ СИСТЕМА ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Питание завода осуществляется по транзитной линии 380 кВ от Эрзин на Исдемир (**рис. 1**). На главной понизительной подстанции расположены четыре понижающих трансформатора 380/34,5 кВ номинальной мощностью 155 МВА, производства фирмы *ABB*. Трансформаторы Т3 и Т4 осуществляют питание сталеплавильного производства. Прокатное производство завода штатно должно быть запитано от одного трансформатора – Т1 или Т2.

Однако из-за вышеописанных проблем ЭП стана горячей прокатки HSM получают питание от трансформатора Т2. Для этого секция *D* ГПП была отключена от параллельной работы с секцией *B* и подключена к трансформатору Т2. Секция В ГПП была подключена к трансформатору Т1. От секции *D* ЗРУ-34,5 кВ ГПП получают питание секции 1 и 2 распределительного устройства 132EDM по двум кабельным линиям – КЛ1 и КЛ2. При этом секции 1 и 2 распределительного устройства 132EDM включены на параллельную работу.

От секции 1 распределительного устройства 132EDM запитаны ЭП двух черновых клетей *R*1 и *R*2, первых двух чистовых клетей *F*1, *F*2 и тиристорные возбудители синхронных двигателей. От секции 2 получают питание оставшиеся два ЭП чистовых клетей *F*3, *F*4 и их возбудители. Электроприводы прокатного стана построены на базе преобразователя частоты серии *ACS*6000 фирмы *ABB*.

Для снижения негативного влияния ПЧ мощных ЭП прокатного стана HSM на питающую сеть применено следующее схемотехническое решение. Для реализации 12-пульсной схемы выпрямления в каждом ЭП применяются два трансформатора с различными группами соединения вторичных обмоток, имеющими угол сдвига напряжения в 30 электрических градусов. Первичная обмотка первого трансформатора выполняется расщеплённой и последовательно соединяется с первичной обмоткой второго трансформатора. Благодаря этому решению в гармоническом спектре потребляемого *AED* тока присутствуют высшие гармоники с порядковыми номерами $12n\pm1$.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для анализа текущих режимов работы внутризаводской системы электроснабжения с помощью анализатора качества электроэнергии *Fluke* 435 (**рис. 2**) и токовых клещей *Fluke i*5*s* были записаны мгновенные значения напряжений и токов на различных участках распределительной сети. Точки подключения анализатора качества электроэнергии отмечены на **рис. 1**.

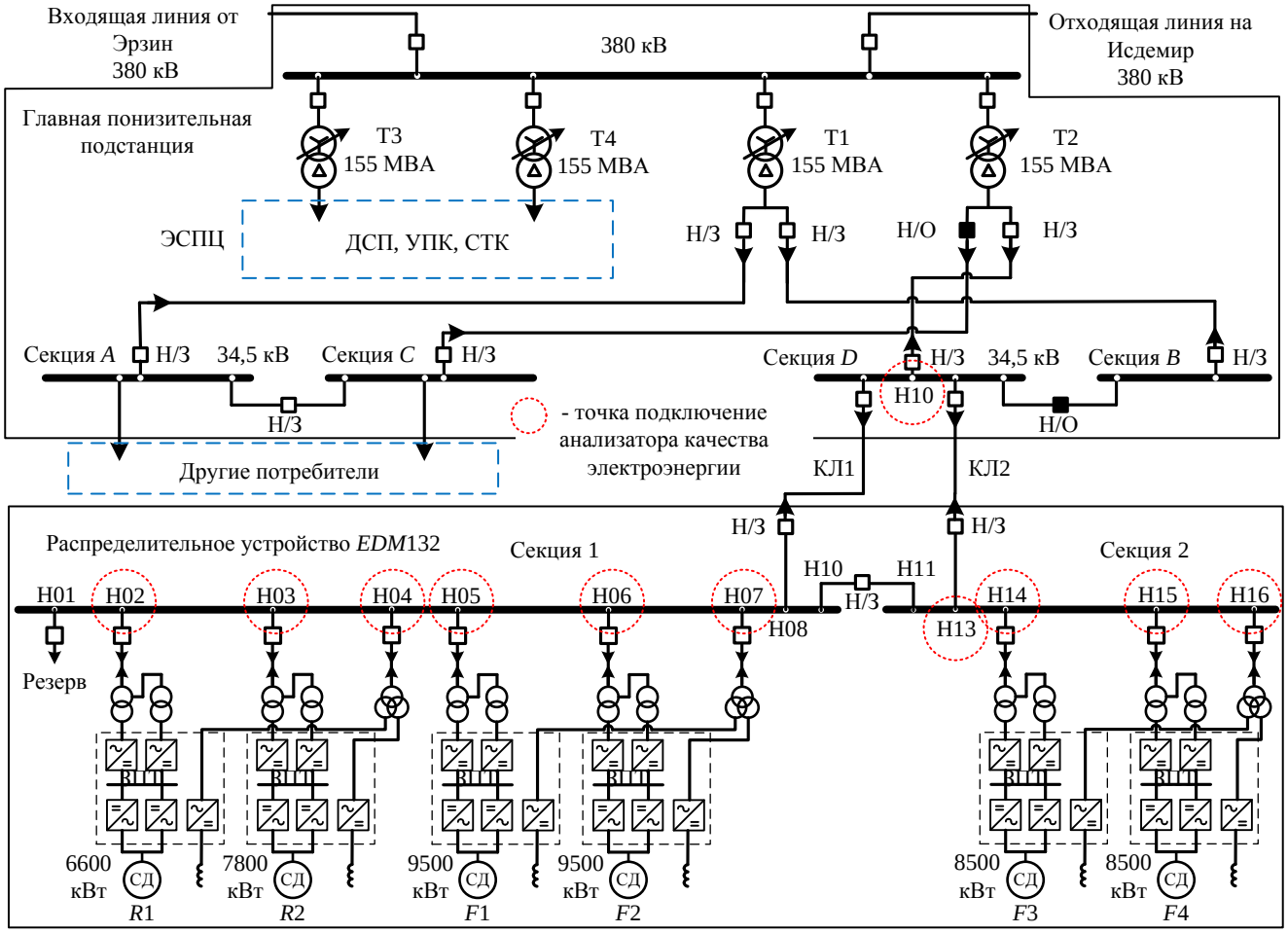


Рис. 1. Однолинейная схема системы электроснабжения электроприводов стана горячей прокатки

Рис. 2. Проведение экспериментальных исследований с использованием анализатора качества электроэнергии *Fluke* 435

Из-за аппаратных особенностей применяемого анализатора расчёт гармонического состава измеренных напряжений и токов проводился только до 150 гармоники.

На **рис. 3** показаны измеренные мгновенные значений напряжений и токов на шинах секций ЗРУ-34,5 кВ ГПП и распределительного устройства 132*EDM*. На **рис. 3, а, б** приведены осциллограммы фазных напряжений на шинах секции *D* ЗРУ-34,5 кВ ГПП и гармонический состав напряжения фазы *A* во время работы стана горячей прокатки. Видно присутствие на значимом уровне гармоник с номерами 35, 37, 47, 49, 59, 61, 71, 73 и 95. Их присутствие обусловлено работой ПЧ-АВ. Значение суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения K_U составило 12,36, 12,73, 12,59% для фаз *A, B, C* соответственно. Столь сильные искажения питающего напряжения являются причиной нарушения нормального функционирования чувствительных электроприёмников при их параллельной работе с ЭП *HSM*.

Также на **рис. 3, б, г, и, л** показана частотная характеристика сети 34,5 кВ относительно секции *D* ГПП. Частотная характеристика была получена путём математического моделирования распределительной сети 34,5 кВ с использованием фактических параметров сетевого трансформатора 155 МВА и параметров кабельных линий в математическом пакете *Matlab-Simulink*. Благодаря полученной частотной характеристике можно заметить наличие основного резонанса тока в частотном диапазоне f – 1850 … 3050 Гц (n = 37 … 61).

На **рис. 3, в, г** приведена осциллограмма тока фазы *A* вводной ячейки Н10 секции *D* ЗРУ-34 кВ ГПП и его гармонический состав для аналогичного предыдущему случаю момента времени. Действующая величина тока составила 383 А. Величина K_I составила 8,59%. В гармоническом спектре на значимом уровне присутствуют гармоники с теми же номерами, что и в предыдущем рассмотренном случае.

Далее были получены осциллограммы фазных напряжений и их гармонический состав для шин секций 1 и 2 ЗРУ-34,5 кВ распределительного устройства 132*EDM* при их параллельной работе (**рис. 3, д, е**). Запись мгновенных значений напряжений производилась при прокатке сляба станом *HSM*. Результаты измерений аналогичны результатам для секции *D* ЗРУ-34,5 кВ ГПП.

Затем были произведены измерения для тех же точек распределительной системы электроснабжения при остановленных электродвигателях ЭП прокатного стана.

На **рис. 3, ж, и** отображены осциллограммы фазных напряжений на шинах секции *D* ЗРУ-34,5 кВ ГПП и гармонический состав напряжения фазы *A*. Как и в случае работы стана при данном режиме, на значимом уровне в гармоническом спектре напряжения присутствуют гармоники с идентичными порядковыми номерами. Значение K_U увеличилось и составило 13,24% для напряжения фазы *A*. Значение K_U для напряжений фаз *B* и *C* составило 13,27 и 13,22% соответственно.

Осциллограмма тока фазы *A* на шину секции *D* ЗРУ-34 кВ ГПП и его гармонический состав показаны на **рис. 3, к, л**. Из-за низкой величины первой гармоники тока при работе АВ ЭП-в «на холостом ходу» значение коэффициента K_I тока ячейки *H*10 увеличилось на порядок по сравнению с предыдущим рассмотренным режимом работы стана.

На **рис. 3, м, н** показаны осциллограммы напряжений на секциях 1 и 2 распределительного устройства 132EDM, питающего ЭП стана *HSM*. Учитывая, что в момент измерений они были запитаны от шин секции *D* ГПП, результаты измерений идентичны.

Затем были записаны и проанализированы токи ЭП прокатного стана при прокатке металла станом (**рис. 4**) и при отсутствии сляба в прокатных клетях (**рис. 5**).

На **рис. 4, а, б** показана осциллограмма тока фазы *A* ячейки Н02 и его гармонический состав. Ячейка *H*02 питает ЭП первой черновой клети *R*1. При амплитудном значении величины первой гармоники тока в 97,32 А величина K_I составила 11,07%. Действующее значение тока фазы *A* составило 65 А. В гармоническом спектре на значимом уровне присутствуют гармоники с номерами 35, 37, 47, 49, 61.

Подобным образом выглядит и ток фазы *A* ячейки Н03, от которой запитан ЭП второй черновой клети *R*2 (**рис. 4, в, г**). Действующее значение тока фазы *A* равнялось 99 А. На значимом уровне присутствуют гармоники с номерами 35, 37, 47, 49, 59. Стоит отметить, что запись осциллограмм токов в различных ячейках распределительного устройства 132*EDM* производилась в разные моменты времени.

Ток фазы *A* ячейки *H*05 и его гармонический состав показан на **рис. 4, д, е**. Данная ячейка питает электропривод первой чистовой клети *F*1. Действующее значение тока фазы *A* составило 57 А.

Действующее значение тока фазы *A* ЭП клети *F*2, запитанного от ячейки Н06, на момент измерения было равно 75 А (**рис. 4, ж, и**). Следует отметить, что, кроме характерных для предыдущих случаев гармоник с номерами 35, 37, 47, 49, в гармоническом составе тока данного ЭП присутствуют значимые гармоник и с номерами 73 и 95 (**рис. 4, и**).

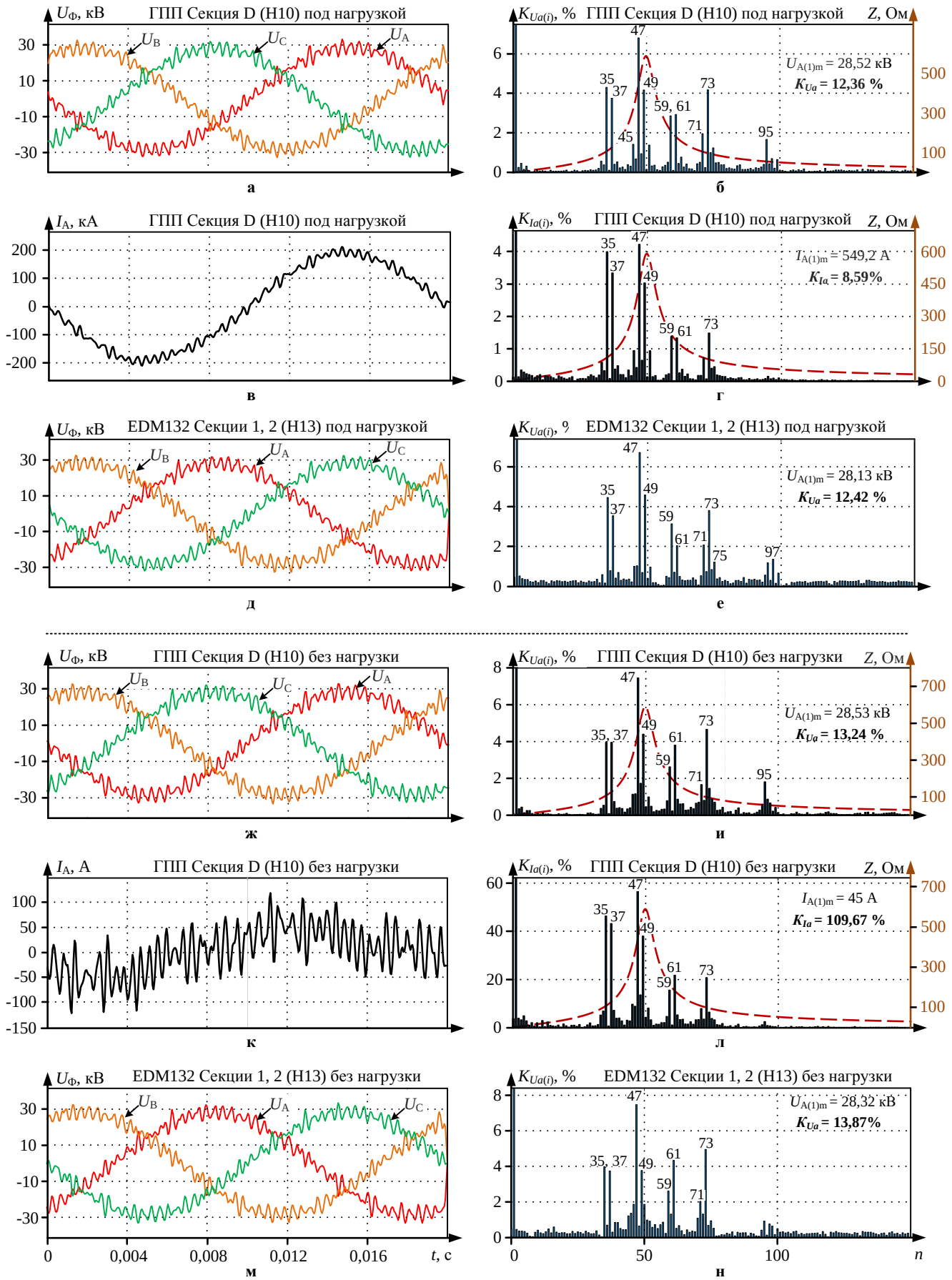


Рис. 3. Измеренные мгновенные значения напряжений и токов и их гармонический состав для двух точек измерения при различных режимах работы прокатного стана

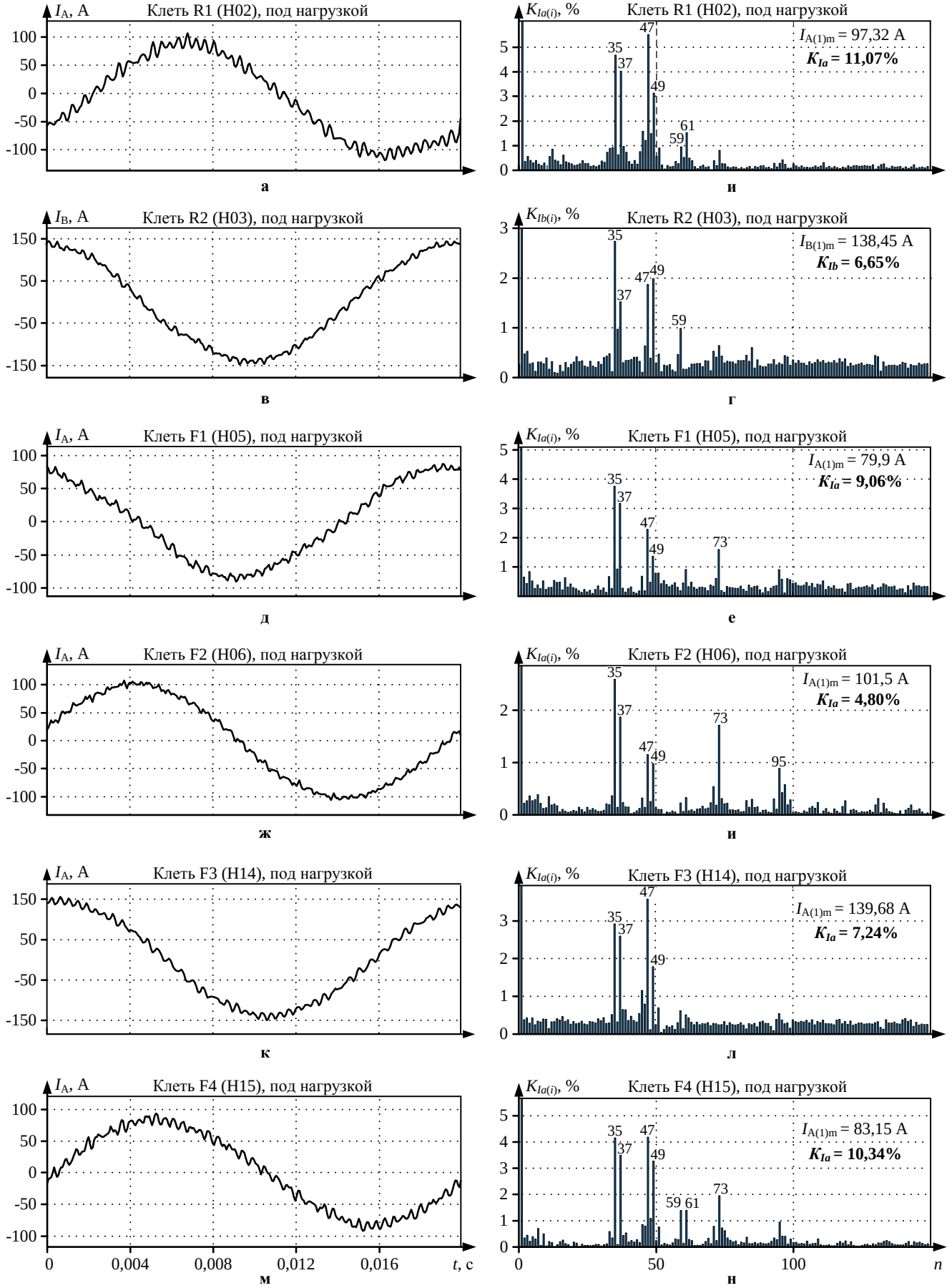


Рис. 4. Измеренные мгновенные значения токов электроприводов при работе стана и их гармонический состав

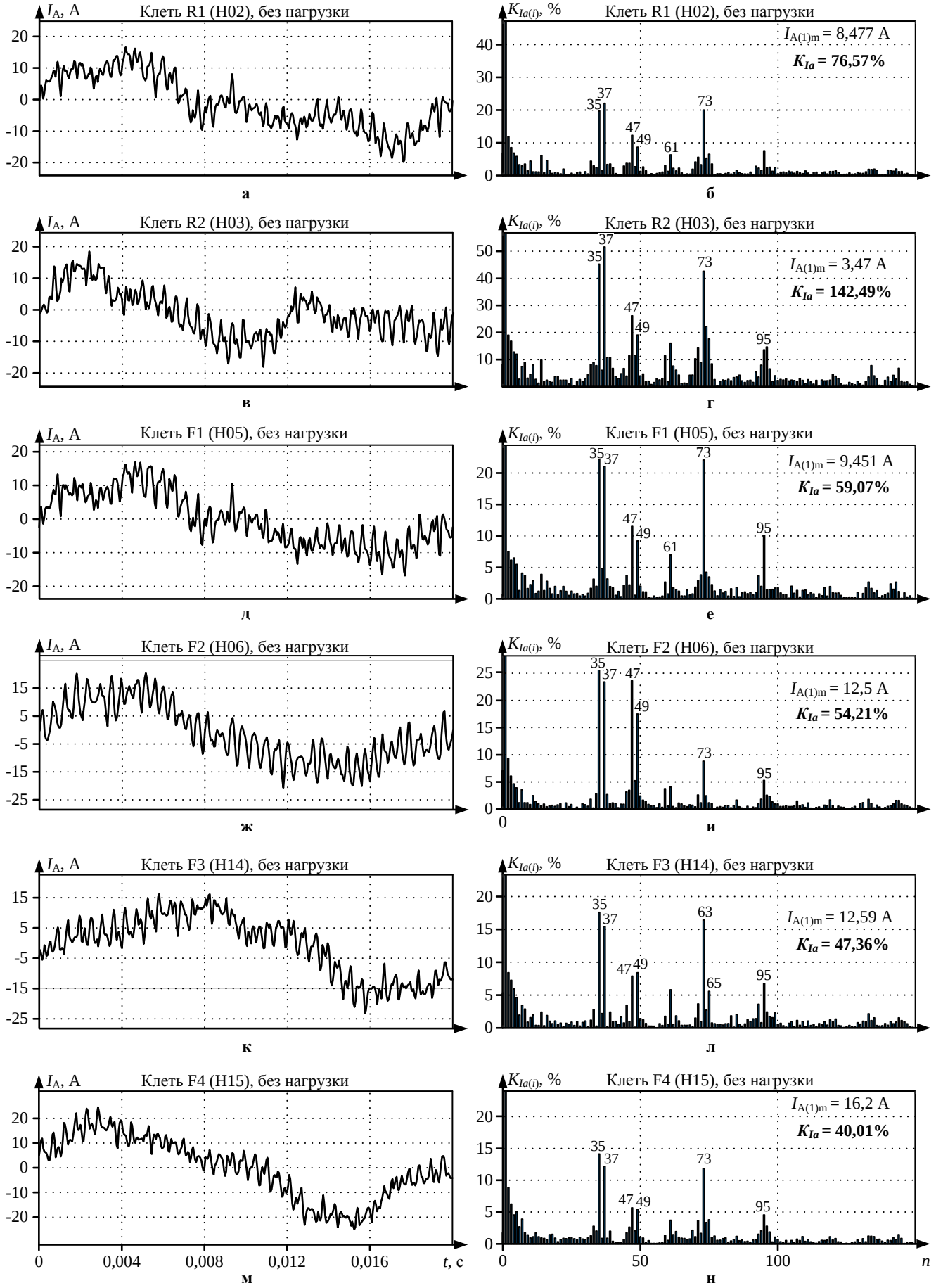


Рис. 5. Измеренные мгновенные значения токов электроприводов без нагрузки и их гармонический состав

Несмотря на это, величина K_I составила 4,8% и является минимальной среди всех рассмотренных случаев. Ток фазы *A* ячейки *H*14 и его гармонический состав показан на **рис. 4, к, л**. Ячейка *H*14 питает трансформаторы ЭП чистовой клети *F*3. Действующее значение тока составило 98 А.

На **рис. 4, м, н** отображена осциллограмма тока фазы *A* ячейки *H*15 и его гармонический состав. От ячейки *H*15 распределительного устройства 132*EDM* запитан ЭП четвертой чистовой клети *F*4. Величина K_I для тока фазы *A* составила 10,34% при действующем значении тока в 61 А.

В аналогичном порядке приведены осциллограммы фазных токов для электроприводов клетей *R*1, *R*2, *F*1, *F*2, *F*3, *F*4 при неработающем стане на **рис. 5**. Во всех случаях в гармоническом спектре токов на значимом уровне присутствуют высшие гармоники с номерами 35, 37, 47, 49, 61, 73, 95.

Для удобства все основные результаты исследований приведены в **таблице**.

Проанализировав полученные результаты, а также учитывая предыдущий опыт [8], можно предположить, что ПЧ-АВ используют алгоритм ШИМ с УВГ с 7-ю переключениями за четверть периода и удалением 6-ти первых значимых гармоник: 5, 7, 11, 13, 23, 25. Также является вероятным использование и других настроек контроллеров ШИМ: 9 переключений за четверть периода с удалением 8-ми первых значимых гармоник: 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 25. В случае второго варианта можно произвести исключение гармоник 35 и 37 вместо 17, 19, так как гармоники 17 и 19 самоустраняются за счёт эффекта 12-пульсной схемы выпрямления и не присутствуют в потребляемом токе ЭП. Однако в этом случае произойдёт увеличение амплитуд гармоник, оставшихся в гармоническом спектре токов ЭП.

В резонансную область частотной характеристики сети относительно шин секции *D* ЗРУ-34,5 кВ ГПП (см. **рис. 3, б**) попадают по большей части 47-я и 49-я гармоники тока, генерируемого ПЧ-АВ. В результате происходит их значительное усиление, что сказывается на качестве напряжения в точке общего подключения при текущем режиме работы системы электроснабжения.

Также отметим, что исследован был неосновной режим электроснабжения ЭП стана *HSM*. В случае основного режима от одного понизительного трансформатора 380/34,5 кВ частотная характеристика в точке общего потребления внутризаводских потребителей может отличаться значительно из-за смещения резонанса в левую часть частотного диапазона из-за увеличения суммарной ёмкости кабельных линий. В этом случае будет наблюдаться усиление гармоник n = 35, 37, что приведёт к ещё более сильному увеличению K_U и нарушению работы чувствительных электроприёмников.

Для улучшения качества электроэнергии в электротехнических комплексах, имеющих в своём составе мощные ПЧ-АВ, обычно применяются следующие технические решения [20]:

1) выделение отдельной секции для питания мощных ЭП на базе ПЧ-АВ (уже используется);

2) использование специальных алгоритмов ШИМ с целью исключения или снижения величины высших гармонических составляющих потребляемого ЭП тока, попадающих в резонансную область, или качественная настройка их параметров с этой же целью;

3) применение традиционных фильтрокомпенсирующих устройств или специальных фильтров для сдвига основного резонанса в безопасную область.

Таблица

Результаты исследований

Точка измерения	Параметр	При нагрузке	Без нагрузки
ГПП, секция *D*, *H*10	$U_{A(1)m}$, кВ	28,52	28,53
	K_U, %	12,36	13,24
	Значимые гармоники	35, 37, 47, 49, 59,61, 71, 73, 95	35, 37, 47, 49, 59,61, 71, 73, 95
	$I_{A(1)m}$, А	549,2	45,0
	K_I, %	8,59	109,67
	Значимые гармоники	35, 37, 47, 49, 59, 61, 73	35, 37, 47, 49, 59, 61, 73
132*EDM* секция 2, *H*13	$U_{A(1)m}$, кВ	28,13	28,32
	K_U, %	12,42	13,87
	Значимые гармоники	35, 37, 47, 49, 59, 61, 71, 73, 95, 97	35, 37, 47, 49, 59, 61, 71, 73
132*EDM* секция 1, *H*02 (*R*1)	$I_{A(1)m}$, А	97,3	8,48
	K_I, %	11,07	76,57
	Значимые гармоники	35, 37, 47, 49, 59, 61, 73	35, 37, 47, 49, 61, 71, 73, 95
132*EDM* секция 1, *H*03 (*R*2)	$I_{A(1)m}$, А	138,5	3,47
	K_I, %	6,65	142,5
	Значимые гармоники	35, 37, 47, 49, 59, 61, 73, 95	35, 37, 47, 49, 59, 61, 71, 73, 95
132EDM секция 1, H05 (F1)	$I_{A(1)m}$, А	79,9	9,45
	K_I, %	9,06	59,1
	Значимые гармоники	35, 37, 47, 49, 61, 73, 95	35, 37, 47, 49, 59, 61, 71, 73, 95, 97
132EDM секция 1, H06 (F2)	$I_{A(1)m}$, А	101,5	12,6
	K_I, %	4,80	54,3
	Значимые гармоники	35, 37, 47, 49, 73, 95	35, 37, 47, 49, 59, 61, 73, 95
132EDM секция 2, H14 (F3)	$I_{A(1)m}$, А	139,68	12,59
	K_I, %	7,24	47,36
	Значимые гармоники	35, 37, 47, 49	35, 37, 47, 49, 51, 61, 63, 65, 95
132EDM секция 2, H15 (F4)	$I_{A(1)m}$, А	83,15	16,2
	K_I, %	10,34	40,01
	Значимые гармоники	35, 37, 47, 49, 59, 61, 73, 95	35, 37, 47, 49, 73, 95

В рассматриваемом случае самым оптимальным вариантом будет использование специального корректирующего фильтра для сдвига основного резонанса в область частот f – 850 … 1150 Гц (n = 17 … 23) при основном режиме электроснабжения. В результате чего значимые высшие гармоники n = 35, 37, 47, 49, генерируемые АВ, не будут оказывать столь значимого воздействия на качество электроэнергии в точке общего подключения внутризаводских потребителей.

Заключение

1. Проведены исследования качества напряжения во внутризаводской распределительной сети 34,5 кВ металлургического завода ЗАО «ММК Metalurji». Электротехнический комплекс предприятия имеет в своём составе мощные электроприводы стана горячей прокатки на базе ПЧ-АВ. В результате исследований были выявлены сильные ухудшения качества напряжения вследствие влияния резонансных явлений в частотной характеристике питающей сети 34,5 кВ из-за наложения на частотный диапазон резонанса основных высокочастотных гармоник, генерируемых электроприводами клетей стана горячей прокатки.

2. Проанализированы параметры существующих алгоритмов ШИМ, применяемых для АВ в составе ЭП клетей стана горячей прокатки. Анализ показал, что используется алгоритм ШИМ с УВГ с частотой переключения ключей 450 Гц. Имеются резервы для улучшения режимов работы электроприводов за счёт увеличения частоты коммутации до 550 Гц (11 переключений за четверть периода), что позволит удалить дополнительные гармоники, попадающие в частотный диапазон резонанса.

3. Предложены также альтернативные мероприятия по улучшению качества электроэнергии за счёт установки фильтров высших гармоник либо специального корректирующего фильтра, обеспечивающего сдвиг основного резонанса в низкочастотную область и исключение наложения гармоник АВ с резонансным диапазоном. Сказано, что использование специального корректирующего фильтра будет являться наиболее оптимальным решением вследствие его простоты и дешевизны.

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-19-20069).

Список источников

1. Nikolaev A.A., Bulanov M.V., Antropova L.I. Ways to Ensure Electromagnetic Compatibility of Powerful Frequency Converters in Internal Power Supply Systems of Industrial Enterprises in the Presence of Resonance Phenomena // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). 2019. Pp. 1-6. doi: 10.1109/ICIEAM.2019.8742938
2. Экспериментальные исследования электромагнитной совместимости современных электроприводов в системе электроснабжения металлургического предприятия / А.А. Николаев, Г.П. Корнилов, Т.Р. Храмшин, Г.В. Никифоров, Ф.Ф. Муталлапова // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2016. Т.14. №4. С. 96-105. doi:10.18503/1995-2732-2016-14-4-96-105
3. 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
4. Маклаков А.С. Имитационное моделирование главного электропривода прокатной клети толстолистового стана 5000 // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2014. №3. С. 16-25.
5. Храмшин Т.Р., Корнилов Г.П. Крубцов Д.С. Оценка методов широтно-импульсной модуляции напряжения активных выпрямителей прокатных станов // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2013. №2. С. 48-53.
6. O'Brien K., Teichmann R., Bernet S. Active rectifier for medium voltage drive systems // Applied Power Electronics Conference and Exposition. IEEE, 2001. Pp. 557-562. doi: 10.1109/APEC.2001.911701
7. Kornilov G.P., Khramshin T.R., Abdulveleev I.R. Increasing stability of electric drives of rolling mills with active front ends at voltage sag // International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS). 2019. Pp. 1-4. doi: 10.1109/ICOECS46375.2019.8949945
8. Providing Electromagnetic Compatibility of High-Power Frequency Converters with Active Rectifiers at Internal Power Supply System of Cherepovets Steel Mill / A.A. Nikolaev, I.G. Gilemov, M.V. Bulanov, V.I. Kosmatov // XVIII International Scientific Technical Conference Alternating Current Electric Drives (ACED). 2021. Pp. 1-8. doi: 10.1109/ACED50605.2021.9462264
9. Retrofit of a hot rolling mill plant with three-level active front end drives / G.A. Orcajo, J.R. D., J.M. Cano, J.G. Norniella, P.G. Ardura, R.T. Llera, D.R. Cifrián // IEEE Transactions on Industry Applications. IEEE, 2018. No 54(3). Pp. 2964-2974. doi: 10.1109/TIA.2018.2808159
10. Design and Analysis of Electrical Drives Using Active Front End Converter / K.B. Chimonyo, K.K. Sathish, K.B. Kishore, K. Ravi // Second International Conference on Inventive Communication and Computational Technologies (ICICCT). 2018. Pp. 115-119. doi: 10.1109/ICICCT.2018.8473042
11. Ndokaj A., Di Napoli A. Behavior of an Active Front End in presence of voltage sags // International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion. 2014. Pp. 1208-1212. doi: 10.1109/SPEEDAM.2014.6872043
12. Ndokaj A., Di Napoli A. Active front end in presence of voltage notches // International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP). 2015. Pp. 9-13, doi: 10.1109/ICCEP.2015.7177593
13. 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. 2005. Pp. 1-10. doi: 10.1109/EPE.2005.219589
14. 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. Vol. 10. No. 5. Pp. 566-573. doi: 10.1109/63.406844
15. Turnbull F.G. Selected harmonic reduction in static DC-AC inverters // IEEE Trans. Commun. Electron. 1964. Vol. 83. No. 73. Pp. 374-378. doi: 10.1109/TCOME.1964.6541241
16. 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
17. Research on hybrid SHEPWM based on different switching 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
18. Furukawa K., Miyazaki H. Solution for SHE-PWM: Non-iterative computation algorithm based on trigonometric harmonic cancellation rule // 15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE). 2013. Pp. 1-10. doi: 10.1109/EPE.2013.6631893
19. Rai N., Chakravorty S. A Review on the Generalized Formulations for Selective Harmonic Elimination (SHE-PWM) strategy // IEEE First International Conference on Smart Technologies for Power, Energy and Control (STPEC). 2020. Pp. 1-6. doi: 10.1109/STPEC49749.2020.9297733
20. Разработка научно обоснованных технических решений по обеспечению электромагнитной совместимости мощных промышленных электроприводов с питающей сетью: монография / Николаев А.А., Буланов М.В., Гилемов И.Г., Афанасьев М.Ю., Шахбиева К.А., Лаптова В.А. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2021. 330 с.

Поступила в редакцию 30 мая 2022 г.

INFORMATION IN ENGLISH

EXPERIMENTAL STUDIES OF POWER QUALITY IN THE 34.5 KV NETWORK AT MMK METALURJI

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

Ildar G. Gilemov

Postgraduate student, Department of Automated Electric Drive and Mechatronics, Nosov Magnitogorsk State University, Magnitogorsk, Russia, gilemov.ig@outlook.com, https://orcid.org/0000-0002-2481-3378

Sergey A. Linkov

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Department of Automated Electric Drive and Mechatronics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, xx_linkov@rambler.ru, https://orcid.org/0000-0002-0774-3910

Maksim S. Svetlakov

Student, Department of Automated Electric Drive and Mechatronics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia,smsko987@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-7288-8262

Medium voltage distribution networks of 6–35 kV are used in in-plant power supply systems at steel mills. As a mutual influence result of long cable line capacitances and step-down transformer inductances, resonance phenomena can occur in the medium frequency range. If the high-frequency harmonics generated by frequency converters with active rectifiers fall into the resonant range, this can lead to disturbances in the plant internal distribution network. Such phenomena can cause long downtime of technological equipment and product defects. This entails significant economic losses, especially in the production of high value-added products. This paper reflects the experimental research results of voltage quality in 34.5 kV distribution networks at the metallurgical plant "MMK Metalurji". The purpose of the experimental studies was to analyze the current operating modes of the power supply system in order to develop scientifically substantiated technical measures aimed at improving the voltage quality at the point of common connection with internal consumers in the main mode of the power supply system operation. The Fluke 435 power quality analyzer and the Fluke i5s current clamp were used in the experimental studies. Measures for electromagnetic compatibility improvement of frequency converters with active rectifiers of electric drives in hot strip mill 1750 with supply mains are proposed.

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. Nikolaev A.A., Bulanov M.V., Antropova L.I. Ways to Ensure Electromagnetic Compatibility of Powerful Frequency Converters in Internal Power Supply Systems of Industrial Enterprises in the Presence of Resonance Phenomena. 2019 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). IEEE, 2019, pp. 1-6. doi: 10.1109/ICIEAM.2019.8742938
2. Nikolaev A.A., Kornilov G.P., Khramshin T.R., Nikiforov G., Mutallapova F.F. Experimental studies of electromagnetic compatibility of modern electric drives in the power supply system of industrial enterprises. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Bulletin of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2016, vol. 14, no. 4, pp. 96-103. (In Russian)
3. 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
4. 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) doi:10.18503/1995-2732-2016-14-4-96-105
5. Khramshin T.R., Kornilov G.P., Krubtsov D.S. Evaluation of methods of PWM voltage active rectifiers at rolling mills. *Mashinostroenie: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal* [Russian Internet Journal of Industrial Engineering], 2013, no. 2, pp. 48-53. (In Russian)
6. O'Brien K., Teichmann R., Bernet S. Active rectifier for medium voltage drive systems. Applied Power Electronics Conference and Exposition. APEC 2001. IEEE, 2001, pp. 557-562. doi: 10.1109/APEC.2001.911701
7. Kornilov G.P., Khramshin T.R., Abdulveleev I.R. Increasing stability of electric drives of rolling mills with active front ends at voltage sag. 2019 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS). IEEE, 2019, pp. 1-4. doi: 10.1109/ICOECS46375.2019.8949945

8. Nikolaev A.A., Gilemov I.G., Bulanov M.V., Kosmatov V.I. Providing Electromagnetic Compatibility of High-Power Frequency Converters with Active Rectifiers at Internal Power Supply System of Cherepovets Steel Mill. 2021 XVIII International Scientific Technical Conference Alternating Current Electric Drives (ACED). IEEE, 2021, pp. 1-8. doi: 10.1109/ACED50605.2021.9462264
9. Alonso Orcajo G., Josué Rodríguez D., Cano José M., Norniella Joaquín G., Pablo Ardura G., Rocío Llera T., Diego Cifrián R. Retrofit of a hot rolling mill plant with threelevel active front end drives. IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 54, no. 3, pp. 2964-2974. doi: 10.1109/TIA.2018.2808159
10. Chimonyo K.B., Sathish Kumar K., Kishore Kumar B., Ravi K. Design and Analysis of Electrical Drives Using Active Front End Converter. 2018 Second International Conference on Inventive Communication and Computational Technologies (ICICCT). IEEE, 2018, Pp. 115-119. doi: 10.1109/ICICCT.2018.8473042
11. Ndokaj A., Di Napoli A. Behavior of an Active Front End in presence of voltage sags. 2014 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion. IEEE, 2014, pp. 1208-1212. doi: 10.1109/SPEEDAM.2014.6872043
12. Ndokaj A., Di Napoli A. Active front end in presence of voltage notches. 2015 International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP). IEEE, 2015, pp. 9-13. doi: 10.1109/ICCEP.2015.7177593
13. Dell'Aquila A., Liserre M., Monopoli V.G. Active front end adjustable speed drives under grid voltage sags: effects and dynamical performance evaluation. 2005 European Conference on Power Electronics and Applications. IEEE, 2005, pp. 1-10. doi: 10.1109/EPE.2005.219589
14. 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, vol. 10, no. 5, pp. 566-573. doi: 10.1109/63.406844.
15. Turnbull F. G. Selected harmonic reduction in static DC-AC inverters // IEEE Trans. Commun. Electron, 1964, vol. 83, no. 73, pp. 374-378. doi: 10.1109/TCOME.1964.6541241
16. Jing T., Maklakov A., Radionov A. Two Selective Harmonic Control Techniques Applied in 10kV Grid with Three-Level NPC Inverter. 2019 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
17. 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
18. Furukawa K., Miyazaki H. Solution for SHE-PWM: Non-iterative computation algorithm based on trigonometric harmonic cancellation rule. 2013 15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE). IEEE, 2013, pp. 1-10. doi: 10.1109/EPE.2013.6631893
19. Rai N., Chakravorty S. A Review on the Generalized Formulations for Selective Harmonic Elimination (SHE-PWM) strategy. 2020 IEEE First International Conference on Smart Technologies for Power, Energy and Control (STPEC). IEEE, 2020, pp. 1-6. doi: 10.1109/STPEC49749.2020.9297733
20. Nikolaev A.A., Bulanov M.V., Gilemov I.G., Afanasyev M.Ju., Shahbieva K.A., Laptova V.A. *Razrabotka nauchno obosnovannyh tehnicheskih reshenij po obespecheniju jelektromagnitnoj sovmestimosti moshhnyh promyshlennyh jelektroprivodov s pitajushhej setju* [Development of scientifically based technical solutions to ensure the electromagnetic compatibility of powerful industrial electric drives with a supply network]. Magnitogorsk, NMSTU Publ., 2021, 330 p. (In Russian)

Экспериментальные исследования качества электроэнергии в сети 34,5 кВ металлургического завода ЗАО «ММК Metalurji» / А.А. Николаев, И.Г. Гилемов, С.А. Линьков, М.С. Светлаков // Электротехнические системы и комплексы. 2022. № 3(56). С. 44-53. https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-3(56)-44-53

Nikolaev A.A., Gilemov I.G., Linkov S.A., Svetlakov M.S. Experimental Studies of Power Quality in the 34.5 kV Network at MMK Metalurji. *Elektrotekhnicheskie sistemy i kompleksy* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2022, no. 3(56), pp. 44-53. (In Russian). https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-3(56)-44-53

УДК 621.396.67 https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-3(56)-54-64

Верзунов С.Н.

Институт машиноведения и автоматики Национальной академии наук Кыргызской Республики, Бишкек

СПОСОБ ОПТИМИЗАЦИИ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЯЧЕЕК-РЕЗОНАТОРОВ МИКРОПОЛОСКОВЫХ АНТЕНН НА ОСНОВЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ

Конструкции микрополосковых антенн широко описаны в литературе и дают хорошие результаты на практике. Однако, поскольку сами по себе они отличаются низкой эффективностью и ограниченной полосой пропускания, часто приходится оптимизировать конструкцию, изменяя ее параметры и улучшая технические характеристики. Один из способов добиться этого дает применение метаматериалов. Однако особенности ячеек метаматериала и их массива делает аналитическую разработку уравнений электромагнитного поля очень сложной и нецелеобразной. Обычно эту проблему решают путем разработки антенны с помощью множества дорогостоящих в вычислительном отношении и трудоемких электромагнитных симуляций. В настоящей работе предложен новый способ поиска оптимальной конструкции ячеек-резонаторов для микрополосковой антенны, позволяющий целенаправленно оптимизировать параметры ячеек-резонаторов, значительно улучшающие ее электрические характеристики. Предлагаемый метод объединяет регрессионную модель, использующую глубокую сеть на основе полносвязных нейронных слоев, с поиском на основе алгоритма условной оптимизации COBYLA для нахождения оптимальных конструктивных параметров ячеек-резонаторов. Вначале тензор, определяющий параметры ячеек-резонаторов, подается на вход нейронной сети, и сеть обучается, чтобы уменьшить разницу между выходом, предсказанным глубокой нейронной сетью, и соответствующими электрическими параметрами антенны, полученными в результате полноценного численного моделирования в программе CST MWS. Далее генерируются новые параметры ячеек-резонаторов посредством итеративной оптимизации. Этот шаг сочетает в себе сеть-регрессор, обученную ранее с алгоритмом оптимизации, и использует некоторую стратегию поиска для нахождения оптимальных параметров CSRR-ячеек. Такой подход полностью автоматизирует процесс создания микрополосковых антенн с ячейками-резонаторами на основе метаматериалов и позволяет находить параметры этих ячеек, обеспечивающие оптимальный режим работы в целом, и дает максимальный уровень излучения антенны при сохранении полосы пропускания. При этом ток перераспределяется между подложкой и патчем антенны в сторону патча, чем и объясняются полученные улучшения характеристик антенны.

Ключевые слова: метаматериалы, микрополосковые антенные ячейки, CSSR-ячейки, глубокое обучение, моделирование антенн, оптимизация, COBYLA, Matlab Antenna Toolbox, CST Microwave Studio, генеративное глубокое обучение

ВВЕДЕНИЕ

Антенны являются одним из самых распространенных видов датчиков в системах геоэкологического мониторинга, позволяя создать «интерфейс» между передатчиком или приемником и наблюдаемой средой. По сравнению с другими типами антенн в современных системах мониторинга микрополосковые антенны применяются наиболее часто, так как их конструкция отлично подходит для этой области применения благодаря своей плоской геометрии и небольшим размерам, обладая при этом и характерными недостатками, такими как низкие показатели усиления и распределение излучения в пространстве.

К примеру, такие антенны могут быть с успехом применены для реализации предложенного в работе [1] гибридного метода зондирования для обнаружения скрытых металлосодержащих объектов, например подземных кабельных линий, трубопроводов и т.п. При этом за счет повышения частоты излучения, на которой будет работать трассоискатель, можно будет достигнуть значительного повышения точности локализации неглубоко залегающих объектов.

Использование метаматериалов в конструкции антенн является актуальной областью исследований, это позволяет при сохранении небольших размеров максимально повысить их производительность за счет изменения значений магнитной и диэлектрической проницаемости подложки антенны. Однако геометрия ячеек метаматериала и их расположение делают нецелесообразным аналитическую разработку уравнений результирующих электромагнитных полей. Из-за чего инженеры вынуждены проектировать конструкции таких антенн посредством трудоемкого в вычислительном смысле электромагнитного моделирования, используя метод проб и ошибок [2].

Метаматериалы – материалы с особыми физическими свойствами, которые невозможно воспроизвести с помощью природных материалов, поэтому они являются довольно популярными средствами в современных высокотехнологичных сферах и часто используются во многих областях, таких как плащи-невидимки для микроволнового излучения, подводные лодки, которые используют стелс-технологию, инновационная электроника, микроволновые компоненты, фильтры и т.д. [3].

Кроме того, метаматериалы, появившиеся благодаря последним достижениям науки и техники, привели к значительным достижениям в управлении и использовании волн, включая электромагнитные, акустические и механические волны. Благодаря разнообразным исследованиям метаматериалов стали доступны такие свойства, как отрицательное преломление, чрезвычайно высокий показатель преломления, управление амплитудой, фазой и поляризацией волн. Характеристики и свойства этих метаматериалов сделали возможными удивительные и необычные явления, которые невозможно найти среди природных материалов. Это оказало глубокое влияние на различные сферы исследований и технологий, включая электромагнитную инженерию, нанофотонику, оптику, материаловедение, физику твердого тела, физику полупроводников, акустику и механику упругости [4].

© Верзунов С.Н., 2022

Одним из наиболее важных применений является разработка компактных высокоэффективных антенн, которые стали реальностью благодаря использованию метаматериалов. Используя метаматериалам с уникальными свойствами, становится возможным создавать антенны с инновационными функциями, которые не могут обеспечить стандартные материалы. Один или несколько слоев метаматериала могут использоваться в качестве подложки или в дополнение к конструкции антенны, чтобы расширить ее возможности. Например, если желательна компактная антенна с низкой стоимостью и высокой эффективностью, лучшим вариантом будет антенна с использованием метаматериалов, которые могут помочь увеличить пропускную способность и коэффициент усиления небольших антенн. Еще одно преимущество заключается в том, что метаматериалы не только уменьшают геометрические размеры антенн, но и могут увеличить направленность сигнала. В случае если размеры антенны не имеют значения, применение метаматериалов обеспечивают преимущество перед традиционными антеннами, поскольку это позволяет получить большую полосу пропускания [5].

В последнее десятилетие метаматериалы нашли применение в качестве поглотителей волн, и с тех пор эта область исследований привлекает большое внимание. В 2008 г. Лэнди с соавторами в работе [6] представил краткие сведения о ячейке-поглотителе для микроволнового диапазона на основе метаматериалов.

Метаматериалы, поглощающие электромагнитные волны, часто применяются в военной промышленности, что обусловлено хорошими характеристиками и малым весом, что важно для этой области. Например, в работе [7] представлена структура метаматериала из композита с превосходными характеристиками поглощения электромагнитных волн, охватывающих весь радиолокационный X-диапазон, который был разработан и изготовлен ими с целью практической проверки свойств.

Особенный интерес вызывает проектирование резонаторов в виде разомкнутых колец как ключевых составных блоков для создания эффективных сред с отрицательной магнитной проницаемостью ($\mu_{eff} < 0$) или «левых» материалов. В работе [8] демонстрируется потенциал включений субволновых (то есть очень маленьких) резонаторов с разъемным кольцом и комплементарных ячеек-резонаторов с разъемным кольцом (CSRR – Complementary Split Ring Resonator) для создания компактных микрополосковых режекторных фильтров для подавления нежелательных паразитных полос в микроволновом диапазоне.

Как правило, антенны на основе метаматериалов проектируются путем многократного моделирования и, внося многократные коррективы в параметры антенны, используя метод проб и ошибок, можно получить требуемый набор характеристик антенны. Количество времени, которое потребуется для выполнения этой процедуры, совершенно непредсказуемо и определяется, кроме удачи, в некоторой степени опытом конструктора. Во многих известных случаях использование метода моделирования во временной области с конечным дифференцированием или метода конечных элементов позволило получить решения с оптимальными характеристиками, только методом проб и ошибок, подкрепленных профессиональными рассуждениями и эмпирическими знаниями. Однако этот процесс трудоемкий и дорогостоящий, а из-за разнообразия конструктивных параметров и аналитических степеней свободы даже почти аналогичные конструкции могут иметь разные результаты численного моделирования и практического тестирования.

К счастью методы анализа данных на основе интеллектуального анализа данных, бурно развивающиеся в последние годы, также могут быть использованы для решения этой проблемы. Идеи глубоких нейронных сетей (DNN – Deep Neural Network), развивающие методы машинного обучения, основанные на биологических нейронных сетях и использующие глубокое (или иерархическое) обучение, начали быстро развиваться в 2000-х годах, хотя и были известные ранее. Глубокое обучение – это один из методов машинного обучения, использующийся для регрессии и классификации на больших объемах сложных данных, использующий принципы мышления человеческого мозга. Благодаря достижениям в области глубокого обучения оно применяется сейчас в самых разных областях и его результаты можно увидеть во многих областях экономики. Наибольшие успехи пока что были достигнуты в основном в компьютерном зрении, обработке естественного языка, распознавании голоса и обработке видеосигнала, но в последнее время появились исследования, свидетельствующие о большом потенциале глубокого обучения для ускорения процедуры проектирования антенн.

Предполагается, что машинное обучение ускорит процедуру проектирования антенны, обеспечивая при этом высокую точность, сводя к минимуму возможные ошибки, позволит экономить время и даст возможность прогнозировать поведение антенны, повышая эффективность вычислений, и уменьшить количество необходимых моделирований [9-12], чем и объясняется актуальность настоящего исследования.

Например, в работе [4] обсуждается метод, основанный на глубоком обучении, позволяющий быстро разработать ячейки с проводящим слоем структурного типа для применения в X-диапазоне (8–12 ГГц), представляющие собой ячейки со стороной 12,8 мм. Они состоят из нижней части, состоящей из заземляющей пластины, диэлектрика и ячейки-поглотителей электромагнитных волн с квадратным рисунком, площадью 16×16 пикселей, причем каждый пиксель представляет собой квадрат с ребром 0,8 мм. Рабочие характеристики такой ячейки зависят от того, как спроектирован пикселей квадратный шаблон.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Таким образом, конструкции микрополосковых антенн широко описаны в литературе и дают хорошие результаты на практике. Однако, поскольку сами по себе они отличаются низкой эффективностью и ограниченной полосой пропускания, часто приходится оптимизировать конструкцию, уменьшая ее геометрические размеры и улучшая технические характеристики для удовлетворения требований ее практического применения. Один из способов добиться этого – это применение метаматериалов. Метаматериалы – это мате-

риалы с особыми электрическими характеристиками. Однако геометрия ячеек метаматериала и их массива делает аналитическую разработку результирующих уравнений электромагнитного поля очень сложной и нецелеобразной. Традиционно эту проблему решают путем разработки антенны с помощью множества дорогостоящих в вычислительном отношении и трудоемких электромагнитных симуляций. С появлением доступных библиотек обработки данных с помощью глубоких нейронных сетей и их аппаратной поддержки появилась возможность оптимизировать конструкции антенн за счет разработки соответствующих моделей глубокого машинного обучения, что позволяет избежать ручного поиска оптимальной конструкции и является задачей настоящего исследования.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Особенности микрополосковых антенн

Как известно, антенна является переходной структурой между свободным пространством и передающим или принимающим устройством. Это последнее устройство обычно называется линией передачи и широко известно как волновод или фидер в телекоммуникационных системах. Линии передачи могут иметь форму коаксиального кабеля или полого металлического короба и используются для передачи энергии электромагнитной волны от источника к антенне или от антенны к приемнику. В первом случае имеется в виду передающая антенна, а во втором – антенна, принимающая сигнал. Чтобы описать работу антенны, необходимо определить множество параметров. Некоторые из этих параметров взаимосвязаны и не все из них необходимо указывать для полного описания характеристик антенны.

Диаграмма направленности излучения антенны определяется как математическая функция или графическое представление свойств антенны в координатном пространстве. Эти свойства могут включать интенсивность и плотность излучения, напряженность поля, направленность, фазу или поляризацию. Также важно отметить, что эти свойства обычно нормируются на основе их максимально возможного значения, которое может быть выражено в логарифмической шкале или в децибелах. На этом графике обычно присутствуют лепестки, представляющие собой замкнутые концентрации поля, обычно симметричные. Если антенна имеет только один лепесток постоянного радиуса во всех направлениях, такая антенна называется изотропной или ненаправленной, то есть излучает одинаковую мощность независимо от направления.

Другим важным параметром является интенсивность излучения U, определяемая как мощность, излучаемая антенной на единицу телесного угла в заданном направлении. Этот параметр может быть получен как

$$U = r^2 W_{rad},$$

где r – расстояние; W_{rad} – плотность излучения.

Также важно отметить, что антенна имеет эффективность излучения η_r:

$$\eta_r = \frac{P_{rad}}{P_0},$$

где P_{rad} – излучаемая мощность; P_0 – мощность, принимаемая антенной.

Направленность – это мера способности антенны концентрировать излучаемую мощность в определенном направлении. Если направление не указано, то под направленностью понимается направление максимальной интенсивности излучения ($U = U_{\max}$). Эту безразмерную меру можно представить математически через уравнение:

$$D = \frac{U}{P_0} = \frac{4\pi U}{P_{rad}}.$$

Коэффициент усиления антенны G является мерой способности концентрировать в определенном направлении мощность, принимаемую антенной. Эта мера также безразмерна и больше используется на практике, чем направленность, так как легче измерить мощность, принимаемую антенной, чем мощность, излучаемую ею. Он определяется как

$$G = \eta_r D = \frac{4\pi U}{P_0}.$$

Теоретически, в случае антенны без потерь ($\eta_r = 1$), направленность и усиление будут одинаковыми.

Полоса пропускания антенны определяется как диапазон частот, в котором характеристики антенны по некоторым параметрам соответствуют установленному стандарту. Полоса пропускания может рассматриваться как диапазон частот по обе стороны от центральной частоты (обычно это резонансная частота), где характеристики антенны (такие как входное сопротивление, диаграмма направленности, ширина луча, поляризация, уровень боковых лепестков, коэффициент усиления, направление луча, эффективность излучения) находятся в пределах допустимого значения для центральной частоты. Для широкополосных антенн ширина полосы обычно выражается как отношение верхних и нижних частот приемлемой работы. Например, полоса пропускания 10:1 означает, что верхняя частота в 10 раз больше нижней. Для стреловидных антенн ширина полосы выражается в процентах от разности частот (верхняя минус нижняя) относительно центральной частоты полосы пропускания. Например, полоса пропускания 5% указывает, что разность частот приемлемой работы составляет 5% от центральной частоты полосы пропускания [12].

Комплексный коэффициент отражения S_{11} показывает, какая часть падающей высокочастотной мощности отражается из-за рассогласования антенны с фидером. Рассогласование антенны с фидером заключается в разнице между входным сопротивлением антенны и волновым сопротивлением фидера или импедансом генератора (в случае, если линия передачи отсутствует). Зависимость комплексного коэффициента отражения от частоты дает возможность определить рабочую полосу антенны, которая берется по уровню амплитуды $S_{11} < -5$ дБ [13].

Как показано на **рис. 1**, микрополосковые антенны состоят из очень тонкой металлической полосы, называемой патчем, слоя диэлектрика, также называемого

подложкой, и металлической основы, так называемой заземляющей пластины. При выборе подложки, как правило, отдается предпочтение тонким слоям с низкой диэлектрической проницаемостью, конкретные характеристики могут меняться в зависимости от области применения. Этот выбор учитывает наилучшее соотношение цены и качества между характеристиками антенны и стоимостью конструкции.

Диэлектрическая подложка в большинстве случаев должна быть электрически тонкой, а диэлектрическая проницаемость должна варьироваться в пределах $2{,}2 \le \varepsilon_r \le 12$. Резонанс патч-антенны достигается, когда L близко к $\lambda/2$. Входной импеданс регулируется путем изменения положения точки питания в диапазоне от 50 до 300 Ом [12].

Исходные данные

Для определенности необходимо выбрать резонансную частоту микрополосковой антенны. Наиболее перспективным, на наш взгляд, в настоящее время кажется диапазон 400 МГц на частоте 6 ГГц, который может быть задействован для использования в сети сотовой связи 5G. Либо, например, для определения диэлектрической проницаемости горных пород методом свободного пространства [14]. Этот диапазон во многих странах в настоящее время не задействован [15] и захватывается доступными программно-определяемыми радиопериферийными устройствами, способными передавать или принимать радиосигналы в диапазоне от 1 МГц до 6 ГГц. К примеру, устройство HackRF One, предназначенное для тестирования и разработки современных и радиотехнологий, представляет собой аппаратную платформу с открытым исходным кодом, которую можно использовать в качестве периферийного USB-устройства или запрограммировать для автономной работы [16].

В **табл. 1** представлены значения, полученные по представленному в работе [12] способу. Моделируемая антенна изготовлена из двухстороннего фольгированного стеклотекстолита с толщиной фольги 0,35 мм и диэлектрической проницаемостью $\epsilon_r = 4{,}3$ размером 61620 на 51480 мкм, как рекомендуется в работе [17].

В настоящее время только небольшое количество прикладных программных пакетов может использоваться для моделирования эффектов применения метаматериалов. Хорошим примером является пакет CST Microwave Studio (CST MWS).

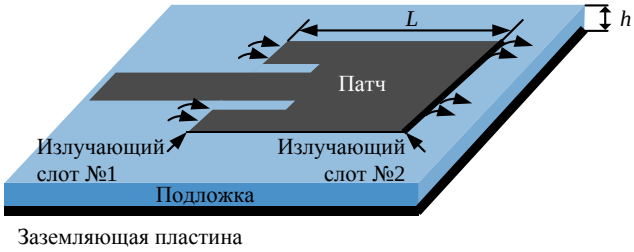


Рис. 1. Конструкция микрополосковой антенны

Таблица 1

Конструктивные параметры микрополосковой антенны

L_a, мкм	W_a, мкм	W, мкм	L, мкм	h, мкм	W_0, мкм	y_0, мкм	g, мкм
61620	51480	23694	19820	1700	3500	6800	1000

С помощью этой программы могут быть рассчитаны многие характеристики антенны, такие как полоса пропускания, коэффициент усиления, обратные потери и др. [18]. Сравнимую функциональность предоставляет Matlab Antenna Toolbox (AT), хотя для моделирования он может задействовать только одно ядро CPU, в отличие от CST MWS, который может использовать параллельную обработку на множестве ядер CPU и GPU.

Для улучшения электрических характеристик необходимо добавить в конструкцию антенны ячейки метаматериала на основе комплементарных разомкнутых колец CSRR (**рис. 2**) с определенными конструктивными параметрами, как рекомендуется в работе [17].

Исходя из эмпирических правил, предложенных в работе [19], диапазон изменения этих параметров задаётся как функция от резонансной длины волны λ_0:

$$\begin{aligned} &0{,}025h_0 \le W_m \le \frac{\lambda_0}{4}; \\ &t_m \approx 0{,}1W_m; \\ &0{,}0019\lambda_0 \le W_{0m} \le 0{,}0076\lambda_0; \\ &0{,}0009\lambda_0 \le d_m \le 0{,}0057\lambda_0. \end{aligned} \tag{1}$$

Ячейки располагаются по сторонам патча, как показано на **рис. 3**, с учетом соображений симметричности антенны.

Чтобы охватить достаточное количество возможных вариантов, интервалы, используемые при размещении CSRR-ячеек в массиве, задаются уравнениями:

$$\begin{aligned} &g \le X_a \le \left(\frac{W}{2} - \frac{W_m}{2}\right); \\ &W_m \le Y_a \le \left(\frac{4L}{R-1} - W_m\right); \\ &R = 3, 5, 7. \end{aligned} \tag{2}$$

Таким образом, конструктивные параметры CSRR-ячеек можно задать тензором:

$$\bar{\mathbf{X}} = \left[W_m, W_{0m}, d_m, t_m, R, X_a, Y_a\right].$$

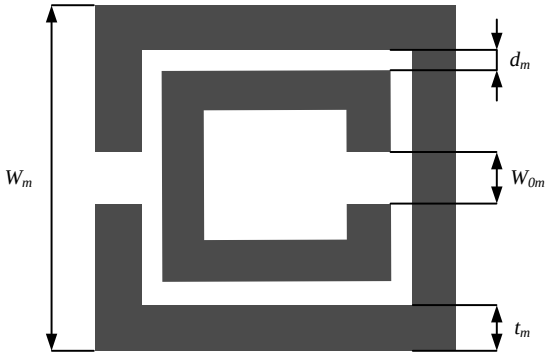


Рис. 2. Параметры CSRR-ячейки:
W_m – высота ячейки CSRR; W_{0m} – зазор кольца;
d_m – расстояние между кольцами; t_m – толщина колец;
X_a – расстояние между ячейкой и патчем; Y_a – расстояние между ячейками; R – количество ячеек в массиве с каждой стороны

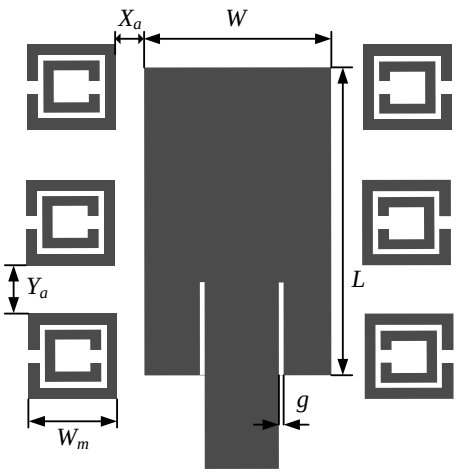


Рис. 3. Расположение CSRR-ячеек относительно патча антенны

Исходя из приведенных выше границ изменения конструктивных параметров CSRR-ячеек, заданных формулами (1), (2) в программе CST MWS Вазом Р. в работе [16], были сгенерированы исходные данные для обучения нейронных сетей в количестве 572 образцов, доступных в открытом доступе [18].

Для оценки электрических характеристик моделируемых электрических параметров микрополосковых антенн с CSRR-ячейками с помощью программы CST MWS были рассчитаны такие параметры, как

$$\bar{\mathbf{Y}} = [G_a, B_w, S_r],$$

где G_a – усиление антенны, дБ; B_w – полоса пропускания; S_r – обратные потери на резонансной частоте.

СПОСОБ ОПТИМИЗАЦИИ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЯЧЕЕК-РЕЗОНАТОРОВ

Предлагается новый способ, позволяющий оптимизировать параметры CSRR-ячеек резонаторов, взаимное функционирование которых будет обеспечивать оптимальный режим работы антенны в целом и даст максимальный уровень излучения антенны при сохранении полосы пропускания. Предлагаемый метод объединяет модель регрессии, использующую глубокую сеть на основе полносвязных нейронных слоев, с поиском на основе алгоритма условной оптимизации для нахождения наилучших конструктивных параметров ячеек-резонаторов. Такой подход полностью автоматизирует процесс создания микрополосковых антенн с ячейками-резонаторами на основе метаматериалов и позволяет находить параметры CSRR-ячеек, дающие наилучшие электрические характеристики антенны. В общем виде способ, схематически показанный на **рис. 4**, состоит из двух шагов.

Шаг 1 – обучение сети-регрессора, который предсказывает электрические характеристики антенны исходя из ее конструктивных параметров, заданных в виде тензора чисел. Тензор, определяющий параметры CSRR-ячеек, подается на вход нейронной сети, и сеть обучается, чтобы уменьшить разницу между выходом, предсказанным глубокой нейронной сетью, и соответствующими электрическими параметрами антенны, полученными в результате полноценного численного моделирования в программе CST MWS.

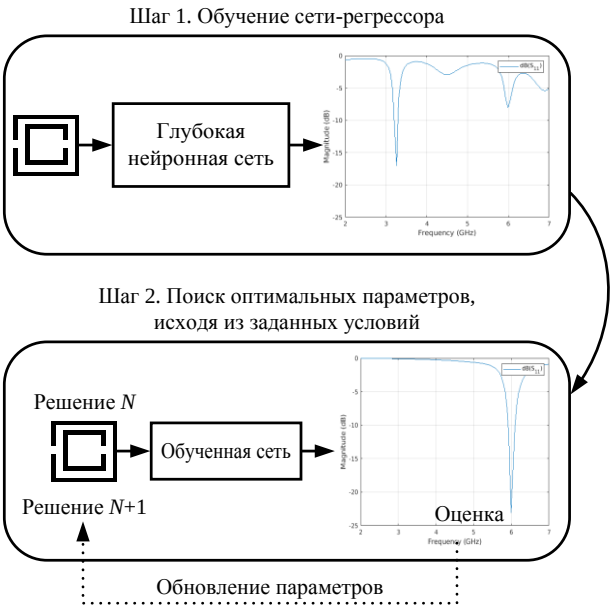


Рис. 4. Общая схема поиска оптимальной конструкции CSRR-ячеек микрополосковой антенны

Шаг 2 – генерация новых параметров CSRR-ячеек резонаторов посредством итеративной оптимизации. Он сочетает в себе сеть-регрессор, обученную на шаге 1 с алгоритмом оптимизации, и использует некоторую стратегию поиска для нахождения оптимальных параметров CSRR-ячеек.

Сеть-регрессор для определения электрических характеристик микрополосковой антенны с CSRR-ячейками

Как известно, задача регрессии заключается в предсказании тензора вещественных меток по имеющимся входным данным:

$$\hat{\mathbf{Y}} = DNN(\bar{\mathbf{X}}, \bar{\mathbf{Y}}).$$

На **рис. 5** показана матрица корреляции исходных данных. Очевидно наличие корреляции между t_m и W_m, следующей из формулы (1), и отрицательной корреляции между полосой пропускания B_w и обратными потерями S_r. Также присутствует корреляция между полосой пропускания B_w и усилением G_a.

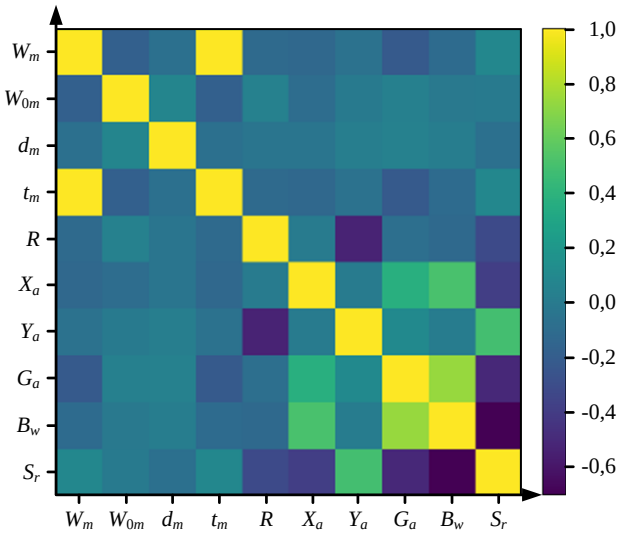


Рис. 5. Матрица корреляции исходных данных

Необходимо отметить существенную положительную корреляцию параметрами X_a и B_w, Y_a и S_r, а также отрицательную корреляцию межу параметрами X_a и S_r, R и S_r. Но все же корреляция между параметрами G_a, B_w и S_r не полная и поэтому имеет смысл использовать для оптимизации все три эти параметра.

Каждый признак в исходных данных имеет свой масштаб. Например, полоса пропускания измеряется в мегагерцах, конструктивные параметры CSRR-ячеек в микрометрах, другие в децибелах и т.д. Как известно, проблематично передавать в нейронную сеть значения, имеющие самые разные диапазоны.

Сеть, конечно, сможет автоматически адаптироваться к таким разнородным данным, однако это усложнит обучение. На практике к таким данным принято применять нормализацию: для каждого признака во входных данных из каждого значения вычитается среднее по этому признаку и разность делится на стандартное отклонение:

$$\bar{\bar{\mathbf{Y}}} = \frac{\bar{\mathbf{Y}} - \langle \bar{\mathbf{Y}} \rangle}{S(\bar{\mathbf{Y}})};$$

$$\bar{\bar{\mathbf{X}}} = \frac{\bar{\mathbf{X}} - \langle \bar{\mathbf{X}} \rangle}{S(\bar{\mathbf{X}})}.$$

Исходные данные делятся на обучающие и контрольные в отношении 4:1, и величины, используемые для нормализации контрольные данных, вычисляются с использованием только обучающих для более точной оценки качества обученной нейронной сети далее.

Из-за небольшого количества образцов используется небольшая сеть с тремя промежуточными полносвязными слоями с 64-мя нейронами в каждом. Связано это с большой вычислительной сложностью численного моделирования в программе CST MWS, даже несмотря на применение GPU. Вообще говоря, чем меньше обучающих данных, тем скорее, как известно, наступит переобучение, а использование маленькой сети, архитектура которой показана на **рис. 6**, – один из способов борьбы с ним. Кроме того, используется и самый популярный в настоящее время метод борьбы с переобучением, так называемое «прореживание» с коэффициентом 0,1 после первого скрытого слоя.

Другой более «точный» способ борьбы с переобучением – использование L_1-регуляризации во втором полносвязном слое, он реализуется в предложенной архитектуре добавлением в функцию потерь сети штрафа за увеличение весов. Добавляемый штраф прямо пропорционален абсолютным значениям весовых коэффициентов, с коэффициентом пропорциональности $L_1=5\cdot10^{-4}$.

Сеть обучалась с функцией потерь mse – mean sqeared error (среднеквадратическая ошибка), вычисляющей квадрат разности между предсказанными и целевыми значениями. Эта функция широко используется в задачах регресси.

Для более удобной оценки результатов обучения сети используется параметр точности регрессии mae – mean absolute error (средняя абсолютная ошибка). Это среднее абсолютное значение разности между предсказанными и целевыми значениями.

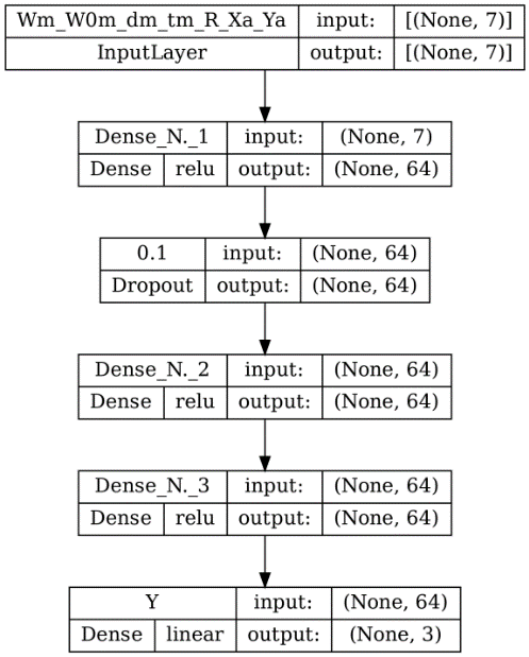


Рис. 6. Архитектура сети-регрессора

Для обучения сети использовался алгоритм оптимизации Adam с начальной скоростью обучения $l_r=10^{-3}$, экспоненциально убывающей на протяжении всего обучения с постоянным коэффициентом $d_r=0{,}95$ на пакетах размером 32 образца.

Результаты обучения сети на протяжении 4000 эпох показаны на **рис. 7**.

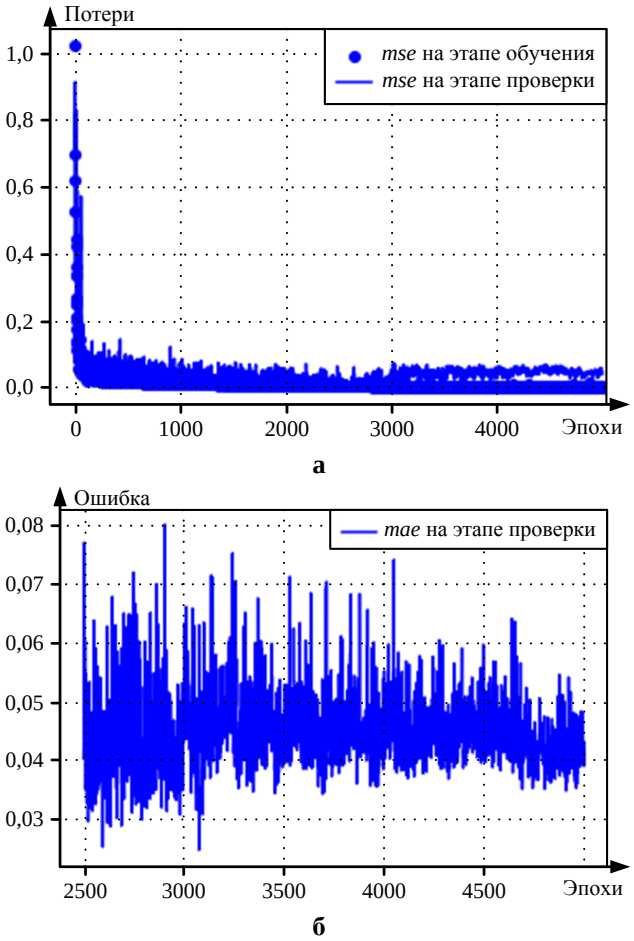


Рис. 7. Изменение mse (а) и mae (б) в ходе обучения сети-регрессора

Оптимизация конструктивных параметров CSRR-ячеек

Для определения наилучших конструктивных параметров CSRR-ячеек предлагается определить оптимизируемую функцию как

$$A(\bar{\bar{Y}}) = k_g G_a + k_b B_w + k_s S_r,$$

где k_g, k_b, k_s – весовые коэффициенты, отражающие вклад каждого параметра в оптимизируемую функцию.

Тогда оптимизационная задача запишется как

$$A(\bar{\bar{\mathbf{Y}}}) = \min_{\bar{\mathbf{X}}},$$

так как значения $\bar{\bar{Y}}$, соответствующие $\bar{\bar{X}}$, непосредственно вычислить невозможно, для их оценки, как было предложено выше, используется обученная нейронная сеть.

$$\hat{\bar{Y}} = DNN(\bar{\bar{X}}).$$

В **табл. 2** показаны параметры CSRR-ячеек, полученные при решении оптимизационной задачи (3) методом COBYLA [20] с дополнительными ограничениями, заданными из геометрических соображений:

$$\bar{X}_i > 0, i = 1,2,3,...7;$$
$$R < 8;$$
$$R(W_m + X_a) < L_g$$

и условий (2) при значениях весовых коэффициентов, равных k_g=-0,1; k_b=-0,1; k_s=1. То есть в результате оптимизации необходимо добиться минимального значения обратных потерь на резонансной частоте, при этом резонансная частота CSRR-ячеек будет приблизительно совпадать с одной из резонансных частот патча микрополоской антенны. Для того чтобы при этом не ухудшались другие электрические параметры антенны, остальные веса должны иметь небольшие отрицательные значения.

Таблица 2

Оптимальные конструктивные параметры CSRR-ячеек

W_m, мкм	W_{0m}, мкм	d_m, мкм	t_m, мкм	R	X_a, мкм	Y_a, мкм	$\hat{S}_r$
2244,4	295,8	743,5	224,4	5,2	8731,4	6948,8	-25,4

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты, полученные при моделировании с помощью АТ микрополосковых антенн, представлены в **табл. 3,** а на **рис. 8** показана кривая обратных потерь S_{11} в диапазоне 1-7 ГГц и диаграммы направленности антенн на резонансной частоте 6 ГГц.

Полученные улучшения можно объяснить тем, что CSRR-ячейка – очень удачная структура, в которой емкость между двумя кольцами сочетается с их индуктивностью. Изменяющееся во времени магнитное поле с вектором напряженности, перпендикулярным поверхности колец, вызывает потоки, которые в зависимости от резонансных свойств структуры подложки порождают вторичное электромагнитное поле, усиливающее исходное либо противодействующее ему в зависимости от разности фаз исходной и вторичной электромагнитной волны.

Резонансная частота, полученная с помощью двух кольцевых разомкнутых резонаторов, должна быть намного меньше, чем соответствующая классическим кольцевым или прямоугольным резонаторам с одиночным разомкнутым контуром аналогичных размеров. Эта особенность связана с большой распределенной емкостью между двумя кольцами. Небольшой размер CSRR-ячеек открывает возможность применения этой своеобразной конфигурации с целью создания компактных микрополосковых антенн. Так как существует множество различных параметров, влияющих на резонансную частоту CSRR-ячеек, наиболее важными из которых являются диэлектрическая проницаемость подложки и длина резонатора, ограничимся только численным определением резонансной частоты, путем моделирования в АТ.

Как видно из **рис. 9**, резонансная частота массива CSRR-ячеек действительно совпадает со второй резонансной частотой микрополосковой антенны, что и подтверждает приведенную выше гипотезу. CSRR-ячейка, выступая конструктивным элементом метаматериала подложки, в совокупности с другими элементами микрополоской антенны образует локальные резонансные подобласти, изменяющие ее эффективную магнитную проницаемость.

Взаимное функционирование данных резонансных областей обеспечивает оптимальный режим работы антенны в целом и дает максимальный уровень излучения антенны при сохранении полосы пропускания, что подтверждается распределением тока в элементах антенны, показанных на **рис. 10**. При этом ток перераспределяется между подложкой и патчем антенны в сторону патча, чем и объясняются полученные улучшения электрических характеристик антенны.

Таблица 3

Сравнительные электрические характеристики микрополосковой антенны с CSRR-ячейками и без них

Микрополосковая антенна без CSRR-ячеек	
Обратные потери	-8,0 дБ
Полоса пропускания (S_{11}<-5 дБ)	≈350 МГц
Направленность	6,0 дБ
Микрополосковая антенна с CSRR-ячейками оптимальной конструкции	
Обратные потери	-23,1 дБ
Полоса пропускания (S_{11}<-5 дБ)	≈350 МГц
Направленность	9,7 дБ

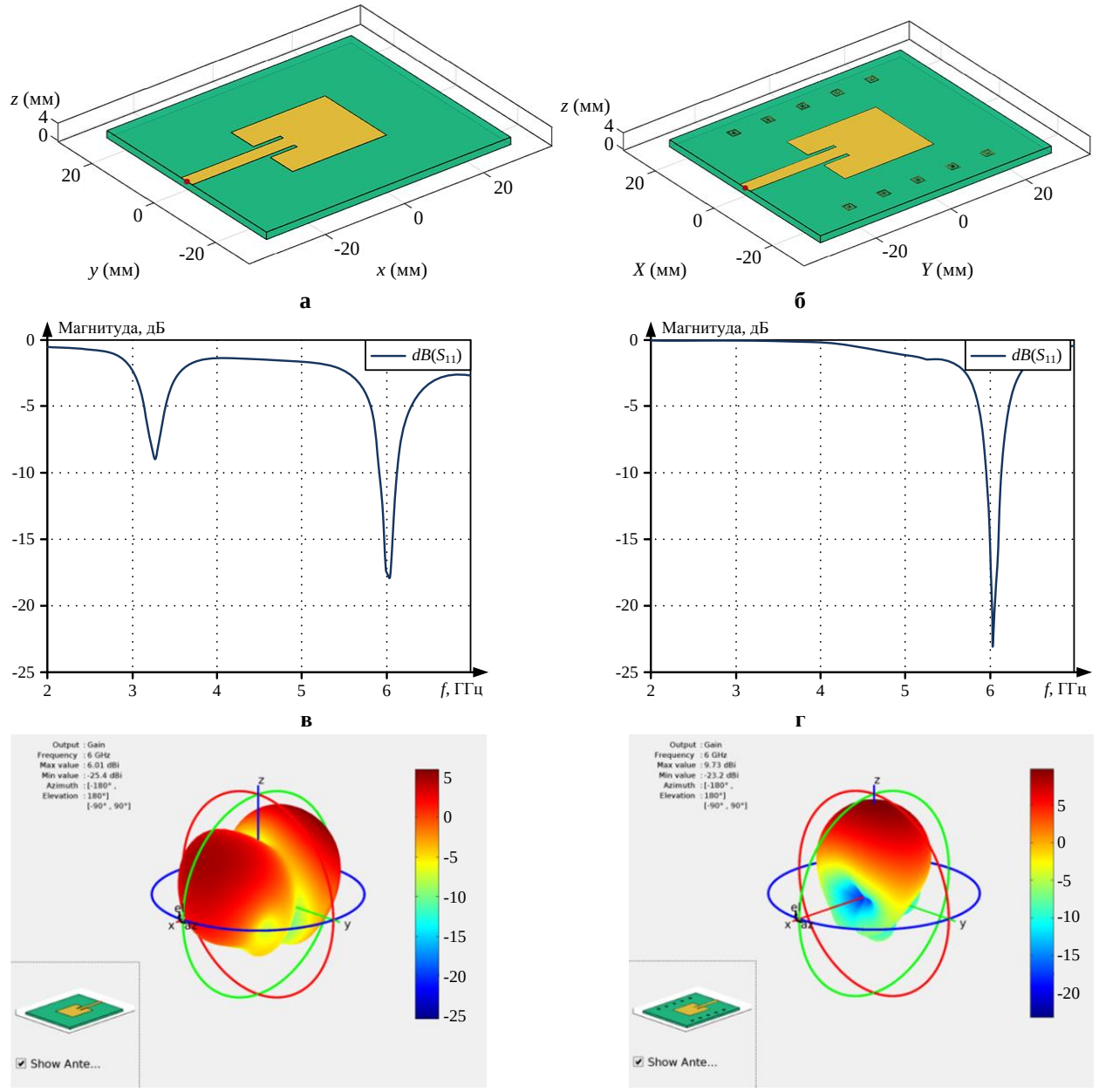


Рис. 8. Электрические характеристики микрополосковой антенны и антенны с CSRR-ячейками: а, б – внешний вид; в, г – кривая обратных потерь S_{11}; д, е – диаграмма направленности

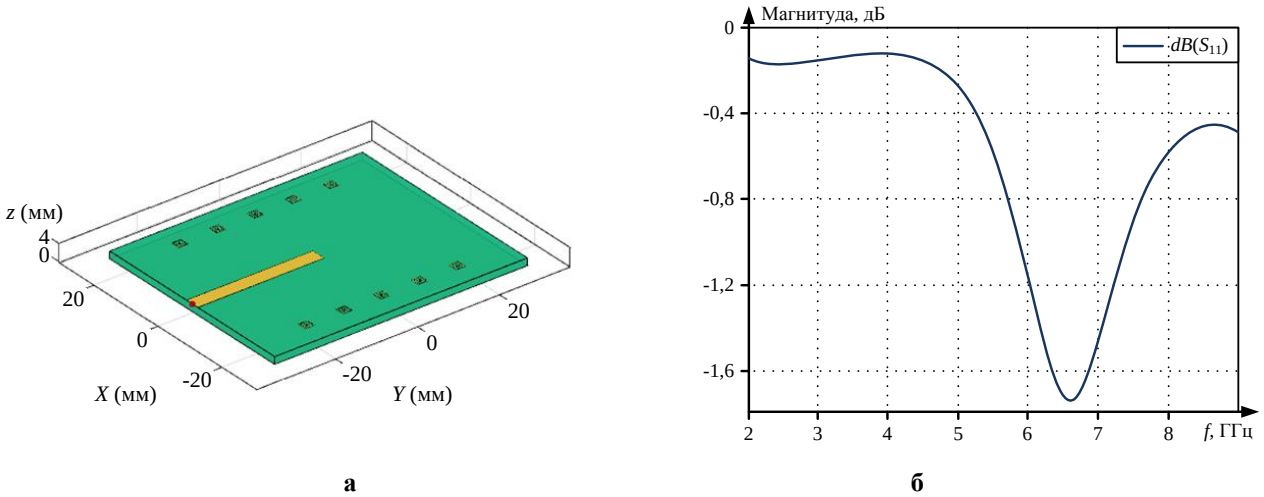


Рис. 9. Внешний вид CSRR-ячейки (а) и кривая обратных потерь (б)

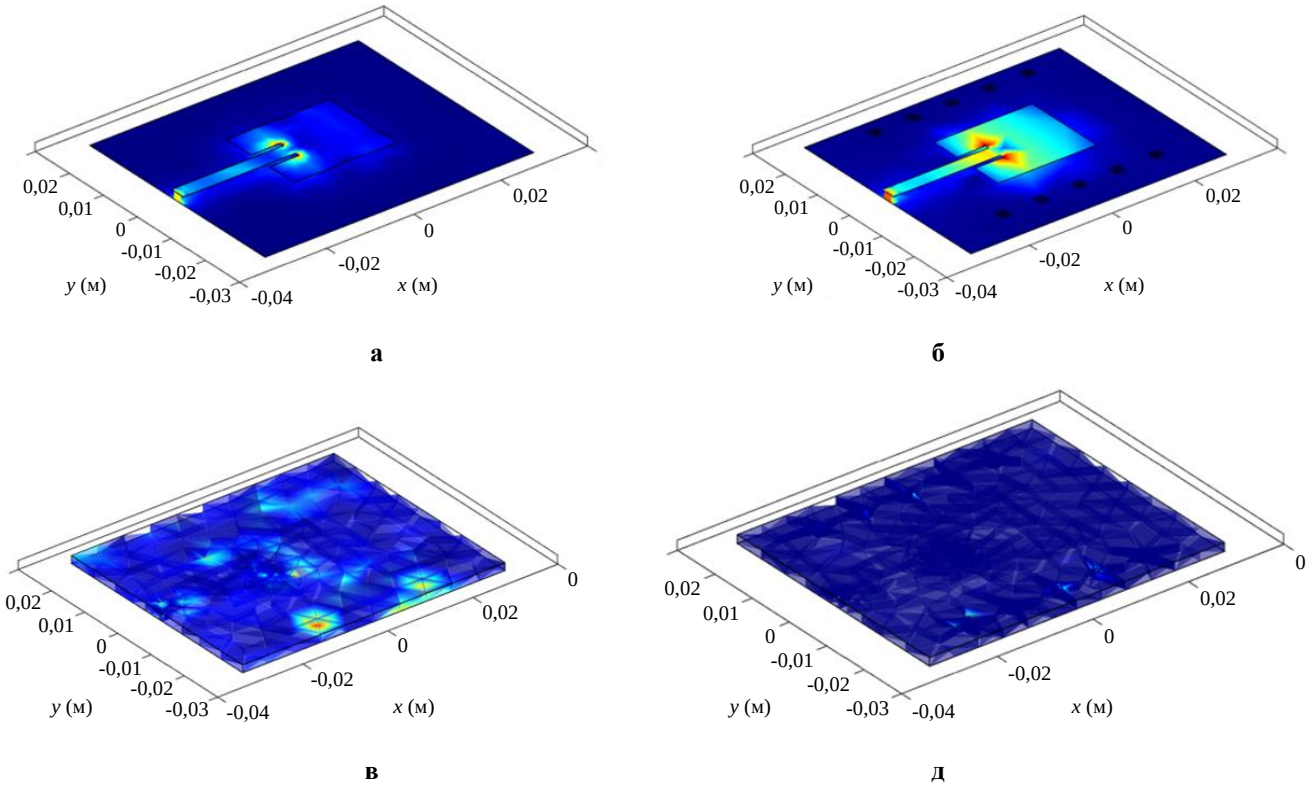


Рис. 10. Распределение тока: а, б – в элементах антенны; в, г – в диэлектрике подложки

Заключение

Таким образом, антенны являются одним из самых распространенных видов датчиков в системах геоэкологического мониторинга, позволяя создать «интерфейс» между передатчиком или приемником и исследуемой средой. Конструкции микрополосковых антенн широко описаны в литературе и дают хорошие результаты на практике, но сами по себе они отличаются низкой эффективностью и ограниченной полосой пропускания, поэтому приходится оптимизировать конструкцию, изменяя ее параметры и улучшая технические характеристики для удовлетворения требований ее практического применения. Один из способов добиться этого – применение метаматериалов. Метаматериалы – это материалы с замечательными электрическими характеристиками. Однако особенности ячеек метаматериала и их массива делает аналитическую разработку результирующих уравнений электромагнитного поля очень сложной и нецелеобразной. Традиционно эту проблему решают путем разработки антенны с помощью множества дорогостоящих в вычислительном отношении и трудоемких электромагнитных симуляций. С появлением доступных библиотек обработки данных с помощью глубоких нейронных сетей и их аппаратной поддержки появилась возможность оптимизировать конструкции антенн за счет разработки соответствующих моделей глубокого машинного обучения, что позволяет избежать ручного поиска оптимальной конструкции.

Поэтому в настоящей работе предложен новый способ поиска оптимальной конструкции CSSR-ячеек для микрополосковой антенны, позволяющий целенаправленно оптимизировать параметры ячеек-резонаторов, значительно улучшающие электрические характеристики антенны. Предлагаемый метод объединяет регрессионную модель, использующую глубокую сеть на основе полносвязных нейронных слоев, с поиском на основе алгоритма условной оптимизации COBYLA для нахождения оптимальных конструктивных параметров ячеек-резонаторов. Такой подход полностью автоматизирует процесс создания микрополосковых антенн с ячейками-резонаторами на основе метаматериалов и позволяет находить параметры CSRR-ячеек, обеспечивающие оптимальный режим работы в целом, и дает максимальный уровень излучения антенны при сохранении полосы пропускания. Небольшой размер CSRR-ячеек открывает возможность применения этой своеобразной конфигурации с целью создания компактных и эффективных микрополосковых антенн.

Список источников

1. Брякин И.В., Бочкарев В.И. Гибридный метод индукционного зондирования для обнаружения подземных кабельных линий и трубопроводов // Электротехнические системы и комплексы. 2019. № 2(43). С. 70-78. doi: 10.18503/2311-8318-2019-2(43)-70-78
2. Enabling Antenna Design with Nano-Magnetic Materials using Machine Learning / A. Gianfagn, M. Swaminathan, P. M. Raj, R. Tummala, G. Antonini // IEEE Nanotechnology Materials and Devices Conference. IEEE, 2015. 5 p. doi: 10.1109/NMDC.2015.7439256
3. Suganthi J., Kavitha T., Ravindra V. Survey on metamaterial antennas // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 1070. No. 1. 12086. doi: 10.1088/1757-899X/1070/1/012086
4. Optimal design of microwave absorber using novel variational autoencoder from a latent space search strategy / H.-I. On, L. Jeong, M. Jung, D.-J. Kang, J.-H. Park, H.-J. Lee // Materials & Design. 2021. Vol. 212. 110266. doi: 10.1016/j.matdes.2021.110266
5. An overview of metamaterials and their achievements in wireless power transfer / K. Sun, R. Fan, X. Zhang,

Z. Zhang, Z. Shi // Journal of Materials Chemistry. 2018. Vol. 6(12). Pp. 2925-2943. doi: 10.1039/C7TC03384B
6. Perfect metamaterial absorber / N.I. Landy, S. Sajuyigbe, J.J. Mock, D.R. Smith, W.J. Padilla // Phys. Rev. Lett. 2008. Vol. 100. 4 p. doi: 10.1103/PhysRevLett.100.207402
7. In-situ growth of SiC nanowires and carbon nanotubes on 3D printed metamaterial structures to enhance electromagnetic wave absorption / H. Mei, W. Yang, X. Zhao, L. Yao, Y. Yao, C. Chen, L. Cheng // Materials & Design. 2021. Vol. 197. 109271. doi: 10.1016/j.matdes.2020.109271
8. Al-Nuaimi M.K., Whittow W.G. Compact microstrip band stop filter using CSRR and CSRR: Design, simulation and results // Proceedings of the Fourth European Conference on Antennas and Propagation. IEEE, 2010. 5 p.
9. So S., Rho J. Designing nanophotonic structures using conditional deep convolutional generative adversarial networks // Nanophotonics. 2019. Vol. 8. Pp. 1255-1261. doi: 10.1515/nanoph-2019-0117
10. Generative Model for the Inverse Design of Metasurfaces / Z. Liu, D. Zhu, S.P. Rodrigues, K.T. Lee, W. Cai // Nano Lett. 2018. Vol. 18. Pp. 6570-6576. doi: 10.1021/acs.nanolett.8b03171
11. Deep learning for topology optimization of 2D metamaterials / H.T. Kollmann, D.W. Abueidda, S. Koric, E. Guleryuz, N.A. Sobh // Materials & Design. 2020. Vol. 196. 109098. doi: 10.1016/j.matdes.2020.109098
12. Balanis C.A. Antenna Theory: Analysis and Design. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons Inc., 2005.
13. Типикин А. Моделирование антенных устройств в Matlab с использованием пакета расширения Antenna Toolbox. М: Солон-Пресс, 2016. 116 с.
14. Касимова А.У., Верзунов С.Н. Обзор и анализ современных методов измерения диэлектрической проницаемости горных пород // Проблемы автоматики и управления. 2022. № 1(43). С. 33-49.
15. URL:http://cbd.minjust.gov.kg/act/view/ru-ru/11510 (дата обращения: 28.04.2022)
16. Vaz R. Optimization of microstrip antenna designs: simulation of CSRR metamaterial cells with machine learning: monograph (Graduate) – Electrical Engineering. Federal University of Tocantins, Palmas, 2019.
17. Simuleon B.V. SIMULIA CST Studio Suite. Pettelaarpark 84 5216 PP‘s-Hertogenbosch, Netherlands: Electromagnetic Field Software. URL:https://www.simuleon.com/simulia-cst-studio-suite/ (дата обращения: 28.04.2022).
18. Sarkar S.B. Design and Analysis of 5.2 GHz Rectangular Microstrip Patch Array Antenna using Split Ring Resonator, 4th International Conference on Signal Processing, Communications and Networking. Chennai, India: IEEE, 2017. doi: 10.1109/ICSCN.2017.8085654
19. Powell M.J.D. A direct search optimization method that models the objective and constraint functions by linear interpolation. In: Advances in Optimization and Numerical Analysis. 1994. Pp. 51-67. doi: 10.1007/978-94-015-8330-5_4
20. Слюсарь В. Метаматериалы в антенной технике: основные принципы и результаты // Первая миля. 2010. № 3-4. С. 44-60.

Поступила в редакцию 30 мая 2022 г.

INFORMATION IN ENGLISH

METHOD FOR OPTIMIZING DESIGN PARAMETERS OF MICROSTRIP ANTENNA CELL-RESONATORS ON THE BASIS OF INTELLIGENT DATA ANALYSIS

Sergey N. Verzunov

Ph.D. (Engineering), Leading Researcher, Laboratory of Information and Measurement Systems, Machinery researching and Automatics Institute of Kyrgyz Republic National Academy of Sciences, verzunov@hotmail.com, https://orcid.org/0000-0003-3130-2776

The designs of microstrip antennas are widely described in the literature and give good results in practice. However, since they are inherently low-efficient and limited in bandwidth, it is often necessary to optimize the design by changing its parameters and improving performance. One way to achieve this is to use metamaterials. However, the features of the metamaterial cells and their array make the analytical development of the electromagnetic field equations very complicated and impractical. Typically, this problem is solved by designing the antenna with many computationally expensive and time-consuming electromagnetic simulations. In this paper, the authors propose a new method for searching the optimal design of resonator cells for a microstrip antenna, which makes it possible to purposefully optimize the parameters of resonator cells, which significantly improve its electrical characteristics. The proposed method combines a regression model using a deep network based on fully connected neural layers with a search based on the COBYLA conditional optimization algorithm to find the optimal design parameters of resonator cells. First, a tensor that defines the parameters of the resonator cells is fed to the input of the neural network, and the network is trained to reduce the difference between the output predicted by the deep neural network and the corresponding electrical parameters of the antenna obtained as a result of a full numerical simulation in the CST MWS program. Next, new parameters of the resonator cells are generated through iterative optimization. This step combines the neural network trained earlier with the optimization algorithm and uses some search strategy to find optimal CSRR cell parameters. This approach fully automates the process of creating microstrip antennas with resonator cells based on metamaterials and allows you to find the parameters of the cells that provide the optimal operating mode in general and gives the maximum level of antenna radiation while maintaining the bandwidth. In this case, the current is redistributed between the substrate and the antenna patch towards the patch, which explains the obtained improvements in the antenna characteristics.

Keywords: metamaterials, microstrip cell antennas, CSSR cells, deep learning, antenna modeling, optimization, COBYLA, Matlab Antenna Toolbox, CST Microwave Studio

REFERENCES

1. Bryakin, I. V., Bochkarev, I. V. Hybrid method of induction sounding for detection of underground cable lines and pipelines. *Elektrotekhnicheskie sistemy i kompleksy* [Electrotechnical systems and complexes], 2019, no. 2(43), pp. 70-78. (In Russian) doi: 10.18503/2311-8318-2019-2(43)-70-78
2. Gianfagn A., Swaminathan M., Raj P.M., Tummala R., Antonini G. Enabling Antenna Design with Nano-Magnetic Materials using Machine Learning. IEEE Nanotechnology Materials and Devices Conference. IEEE, 2015. P. 5. doi: 10.1109/NMDC.2015.7439256
3. Suganthi, T. Kavitha, V. Ravindra Survey on metamaterial antennas. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP, 2021, vol. 1070, no. 1, p. 12086. doi:

10.1088/1757-899X/1070/1/012086
4. On H.-I., Jeong L., Jung M., Kang D.-J., Park J.-H., Lee H.-J. Optimal design of microwave absorber using novel variational autoencoder from a latent space search strategy. Materials & Design, 2021, vol. 212, p. 110266. doi: 10.1016/j.matdes.2021.110266
5. Sun K., Fan R., Zhang X., Zhang Z., Shi Z. An overview of metamaterials and their achievements in wireless power transfer. Journal of Materials Chemistry, 2018, vol. 6, no. 12, pp. 2925–2943. doi: 10.1039/C7TC03384B
6. Landy N.I., Sajuyigbe S., Mock J.J., Smith D.R., Padilla W.J. Perfect metamaterial absorber. Phys. Rev. Lett. 2008, vol. 100, pp. 1–4. doi: 10.1103/PhysRevLett.100.207402
7. Mei H., Yang W., Zhao X., Yao L., Yao Y., Chen C., Cheng L. In-situ growth of SiC nanowires and carbon nanotubes on 3D printed metamaterial structures to enhance electromagnetic wave absorption. Materials & Design. 2021, vol. 197, p. 109271. doi: 10.1016/j.matdes.2020.109271
8. Al-Nuaimi M.K., Whittow W.G. Compact microstrip band stop filter using CSRR and CCSRR: Design, simulation and results. Proceedings of the Fourth European Conference on Antennas and Propagation. IEEE, 2010, pp. 1-5.
9. So S., Rho J., Designing nanophotonic structures using conditional deep convolutional generative adversarial networks. Nanophotonics. 2019, vol. 8, pp. 1255–1261. doi: 10.1515/nanoph-2019-0117
10. Liu Z., Zhu D., Rodrigues S.P., Lee K.T., Cai W. Generative Model for the Inverse Design of Metasurfaces. Nano Lett. 2018, vol. 18, pp. 6570–6576. doi: 10.1021/acs.nanolett.8b03171
11. Kollmann H.T., Abueidda D.W., Koric S., Guleryuz E., Sobh N.A. Deep learning for topology optimization of 2D metamaterials. Materials & Design, 2020, vol. 196, p. 109098. doi: 10.1016/j.matdes.2020.109098
12. Balanis C.A. Antenna Theory: Analysis and Design. John Wiley & Sons Inc., 2005.
13. Tipikin A. *Modelirovanie antennykh ustroistv v Matlab s ispolzovaniem paketa rasshireniya AntennaToolbox* [Modeling antenna devices in Matlab using the Antenna Toolbox extension package]. Moscow, Solon-Press Publ., 2016, 116 p. (in Russian)
14. Kasimova A. U., Verzunov S. N. Review and analysis of modern methods for measuring the dielectric permittivity of rocks, *Problemy avtomatiki i upravleniya*. [Automation and control issues], 2022, no. 1, vol. 43, pp. 33-49. (in Russian)
15. http://cbd.minjust.gov.kg/act/view/ru-ru/11510 (accessed 28 April 2022) (In Russian)
16. Vaz R. Optimization of microstrip antenna designs: simulation of CSRR metamaterial cells with machine learning. Monograph (Graduate) – Electrical Engineering, Federal University of Tocantins, Palmas, 2019.
17. Simuleon B.V. SIMULIA CST Studio Suite. Pettelaarpark 84 5216 PP‘s-Hertogenbosch, Netherlands: Electromagnetic Field Software. 2021. URL: https://www.simuleon.com/simulia-cst-studio-suite/ (accessed 2021 September 24)
18. Sarkar S. B. Design and Analysis of 5.2 GHz Rectangular Microstrip Patch Array Antenna using Split Ring Resonator. 4th International Conference on Signal Processing, Communications and Networking. IEEE, 2017, pp. 1-5. doi: 10.1109/ICSCN.2017.8085654
19. Powell M.J.D. A direct search optimization method that models the objective and constraint functions by linear interpolation. Advances in Optimization and Numerical Analysis. 1994, pp. 51-67. doi: 10.1007/978-94-015-8330-5_4
20. Slyusar V. Metamaterials in antenna technology: basic principles and results, Pervaya Milya. [Last Mile]. (Supplement to the journal "Electronics: Science, Technology, Business"), 2010, no. 3-4, pp. 44-60. (in Russian)

Верзунов С.Н. Способ оптимизации конструктивных параметров ячеек-резонаторов микрополосковых антенн на основе интеллектуального анализа данных // Электротехнические системы и комплексы. 2022. № 3(56). С. 54-64. https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-3(56)-54-64

Verzunov S.N. Method for Optimizing Design Parameters of Microstrip Antenna Cell-resonators on the Basis of Intelligent Data Analysis. *Elektrotekhnicheskie sistemy i kompleksy* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2022, no. 3(56), pp. 54-64. (In Russian). https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-3(56)-54-64

ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ

УДК 621.31 https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-3(56)-65-69

Хазиева Р.Т., Васильев П.И., Афлятунов Р.Р.

Уфимский государственный нефтяной технический университет

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ ИЗОЛЯЦИИ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ПОВЫШЕННЫМ НАПРЯЖЕНИЕМ

В статье авторы исследовали устройство для испытания изоляции электрооборудования повышенным напряжением. Изоляция в электротехнических устройствах является важнейшим элементом конструкции. Электрическая прочность изоляции определяется ее способностью выдерживать длительное номинальное напряжение, на которое рассчитана установка. Но в ряде случаев прочность изоляции может ухудшаться по причине ее увлажнения или в связи с появлением дефектов. Дефектами могут быть воздушные включения в твердом или жидком диэлектрике, которые в дальнейшем создают условия для возникновения частичных разрядов. Рассмотрена существующая на сегодняшний день схема испытаний для определения запаса электрической прочности изоляции. Представлена схема разработанного устройства установки для испытания изоляции на основе единого конструкторско-технологического компонента. Целью работы является исследование зависимости коэффициентов усиления по напряжению от изменения частоты для односекционного и двухсекционного многофункционального интегрированного электромагнитного компонента (МИЭК). Была выдвинута гипотеза, что использование двухсекционного многофункционального интегрированного электромагнитного компонента позволит значительно повысить коэффициент усиления по напряжению по сравнению с использованием односекционного единого конструкторско-технологического компонента. В процессе научного исследования установки для испытания изоляции электрооборудования использовались методы математического моделирования. Представленное устройство обладает меньшими массогабаритными показателями и более эффективными показателями коэффициента усиления по напряжению. В результате математического моделирования показано, что использование двухсекционного многофункционального интегрированного электромагнитного компонента позволяет повысить коэффициент усиления по напряжению до 90, тогда как при использовании односекционного компонента коэффициент усиления по напряжению равен 9. Результаты проведенных исследований подтверждают актуальность и значимость интеграции компонентов с целью снижения массы и габаритов известных устройств.

Ключевые слова: испытание повышенным напряжением, единый конструкторско-технологический компонент, индуктивность, емкость, резонансный контур, интеграция компонентов

ВВЕДЕНИЕ

Изоляция токопроводящих частей играет одну из важных ролей в эксплуатации электрооборудования. Она защищает человека от поражения электрическим током и необходима для нормальной работы электроустановок. Первоочередной задачей является своевременное и качественное определение запаса электрической прочности изоляции [1-4].

Определение запаса прочности изоляции производят путем электрических испытаний повышенным напряжением. Испытания проводятся специальными установками. Эти установки реализуют повышение напряжения выше рабочего в несколько раз. Испытательное напряжение прикладывается к испытываемой установке на время, достаточное для развития разрядов в местных дефектах, вплоть до пробоя [5, 6].

Испытанию изоляции повышенным переменным напряжением должны предшествовать осмотр и оценка состояния изоляции и испытанию подлежит только та изоляция установки, которая прошла визуальный осмотр и испытание выпрямленным напряжением [7-9].

Зачастую установки, которые используются для повышения напряжения, состоят из переносного пульта управления и источника испытательного напряжения. Источник испытательного напряжения включает в себя высоковольтный трансформатор, резисторы и выпрямительные столбы, помещенные в бак, заполненный маслом. Недостатками таких установок являются недостаточная мощность, большие масса и габариты. Также они имеют недостаточную мощность для испытания объектов большой емкости (например, электродвигатели) и невозможностью испытаний на сверхнизкой частоте [10-13]. В **таблице** приведено наиболее широко применяемое на практике электрооборудование с указанием требований по испытанию.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В процессе научного исследования установки для испытания изоляции электрооборудования использовались методы математического моделирования.

Таблица

Нормы испытаний электрооборудования и аппаратов электроустановок потребителей

Наименование аппарата	Испытательное напряжение и время	Мощность испытательной установки
Электрические машины до 1 кВ	от 1 до 1,7 кВ, 1 мин	300 ВА
Электрические машины выше 1 кВ	от 4 до 16 кВ, 1 мин	600 ВА
Кабели до 1 кВ	2,5 кВ, 5 мин	300 ВА
Кабели выше 1 кВ	от 2,5 до 60 кВ, 5 мин	600 ВА

© Хазиева Р.Т., Васильев П.И., Афлятунов Р.Р., 2022

Авторами предлагается разработать устройство испытательной установки на основе двухсекционной структуры единого конструкторско-технологического компонента [14-18]. Эта структура позволит получить большее напряжение, чем при использовании односекционной структуры. Уровень напряжения определяется добротностью резонансного контура. Повышение уровня напряжения разрабатываемой испытательной установки достигается следующими техническими средствами [19-21]:

- работой в резонансном режиме с высокой добротностью колебательного контура;
- трансформацией напряжения;
- каскадным умножением напряжения путем повышения коэффициента усиления по напряжению за счет использования двухсекционной структуры единого конструкторско-технологического компонента.

Снижение массы и габаритов, повышение компактности устройства достигается за счет следующих факторов [22-25]:

- уменьшения емкостного и индуктивного сопротивлений электромагнитных элементов (единого конструкторско-технологического компонента), так как требуемый уровень испытательного напряжения достигается при меньших значениях индуктивности проводящих обкладок и емкости единого конструкторско-технологического компонента;
- исключения из схемы одного из элементов (проволочной обмотки).

Результаты исследования

На **рис. 1** приведена традиционная схема испытания изоляции электрооборудования повышенным напряжением переменного тока. Недостатком устройств, схема которых идентична представленной на **рис. 1**, как было сказано ранее, является недостаточность мощности установки при испытании изоляции повышенным напряжением объектов большой емкости и большие масса и габариты [21, 22].

Известно изобретение, которое устраняет вышеуказанные недостатки установки для испытания изоляции повышенным напряжением [15]. Высоковольтная испытательная установка на основе единого конструкторско-технологического компонента состоит из генераторного блока, резонансного контура, повышающего трансформатора и демодулятора [16]. В указанном устройстве достигается снижение массы и габаритов за счет интеграции резонансного контура и повышающего трансформатора в единый блок с использованием односекционной структуры единого конструкторско-технологического компонента [17]. Для данного схемотехнического решения коэффициент усиления по напряжению (отношение выходного напряжения к входному) будет определяться следующим образом:

$$k_{U1sec} = \frac{1+\alpha^2}{\sqrt{\left(1-\alpha^2\right)^2 + \left(4\alpha\frac{\sqrt{L_1}}{\sqrt{C_1}R_{1н}}\right)^2}},$$

где α – частота в относительных единицах (отношение рабочей частоты (текущей) к резонансной; L_1 – индуктивность проводящей обкладки единого конструкторско-технологического компонента; C_1 – емкость единого конструкторско-технологического компонента; $R_{1н}$ – сопротивление нагрузки.

На **рис. 2** представлена структурная схема разрабатываемого авторами устройства для проведения испытаний повышенным напряжением изоляции электрооборудования на основе двухсекционной структуры единого конструкторско-технологического компонента [15].

Предлагаемое устройство состоит из блока с инвертором и системой управления, двухсекционного единого конструкторско-технологического компонента и демодулятора.

Работает устройство следующим образом. Переменное напряжение питающей сети поступает на выпрямитель. Выпрямленное напряжение сглаживается фильтром и поступает на вход инвертора. Далее сигнал с инвертора усиливается в резонансном контуре. Резонансный контур образован проводящими обкладками единого конструкторско-технологического компонента. Далее в демодуляторе происходит выдерживание сигнала по амплитуде и времени в соответствии с нормами испытаний.

Для расчета коэффициента усиления по напряжению двухсекционного единого конструкторско-технологического компонента справедливо выражение

$$k_{U2sec} = \frac{A}{\sqrt{B}}.$$

$$A = 4\cdot 2{,}845\alpha R_{1н}\sqrt{\frac{C_1}{0{,}5L_1}}\left[4+\left(2{,}845\alpha\right)^2\right];$$

$$B = \left[8-\left(2{,}845\alpha\right)^2\right]^2 4(2{,}845\alpha)^2 R_{1н}{}^2\frac{C_1}{0{,}5L_1} + +24\left(2{,}845\alpha\right)^4.$$

Расчет и исследование свойств МИЭКа в качестве повышающего напряжение элемента проводились в программном комплексе *MathCad*. По результатам моделирования был получен график зависимостей коэффициента усиления по напряжению от изменения частоты в относительных единицах (**рис. 3**) для односекционного (график 1) и двухсекционного (график 2) единого конструкторско-технологического компонента.

Из графиков на **рис. 3** видно, что двухсекционный единый конструкторско-технологический компонент обладает наибольшим коэффициентом усиления по напряжению:

$$k_{U2sec} = 90 > k_{U1sec} = 9.$$

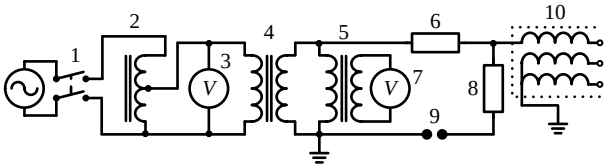


Рис. 1. Схема испытания изоляции электрооборудования повышенным напряжением переменного тока: 1 – автоматический выключатель; 2 – регулировочная колонка; 3, 7 – вольтметр; 4 – трансформатор испытательный; 5 – трансформатор напряжения; 6 – резистор; 8 – резистор для ограничения коммутационных перенапряжений на испытуемой изоляции при пробое разрядника; 9 – разрядник; 10 – испытуемый объект

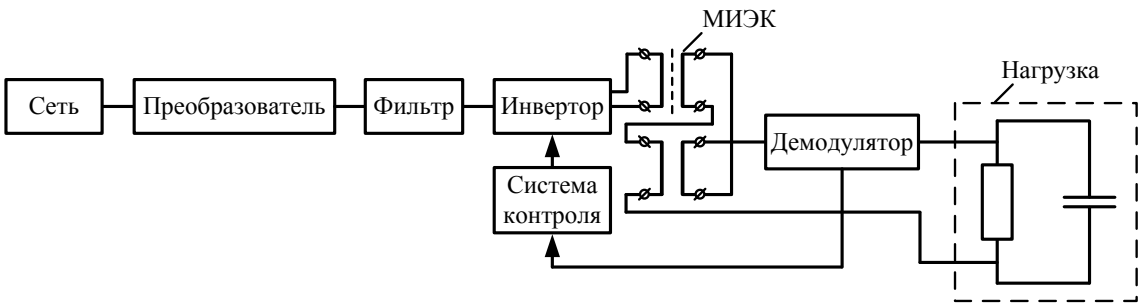


Рис. 2. Структурная схема разрабатываемого устройства для испытания изоляции электрооборудования повышенным напряжением

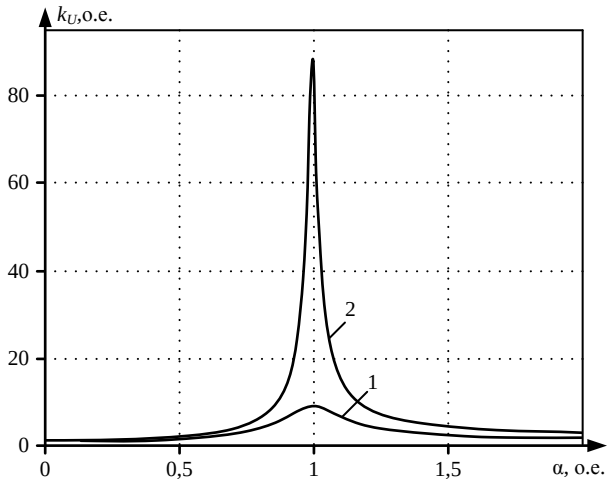


Рис. 3. Зависимости коэффициентов усиления по напряжению от изменения частоты для односекционного (1) и двухсекционного (2) многофункционального интегрированного электромагнитного компонента

Авторами представлена эффективная схема устройства разрабатываемой установки для испытания изоляции электроустановок повышенным напряжением, которая обладает более высоким коэффициентом усиления по напряжению и позволяет снизить массу и габариты известных установок.

Заключение

Таким образом, в результате научных исследований было разработано схемотехническое решение установки для испытания изоляции повышенным напряжением. В результате авторами были доказаны эффективность и целесообразность использования двухсекционной структуры единого конструкторско-технологического компонента испытательной установки в качестве повышающего напряжение элемента. Результаты проведенных исследований подтверждают актуальность и значимость интеграции компонентов с целью снижения массы и габаритов известных устройств.

Работа выполнена при финансовой поддержке стипендии Президента Российской Федерации для молодых учёных–кандидатов наук СП-1132.2022.1.

Список источников

1. Козлов В.К., Киржацких Е.Р. Автономный емкостной источник питания для устройств измерения параметров воздушной линии электропередачи // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2017. Т. 19. № 3-4. С. 61-68.
2. Методика диагностики и идентификации неисправностей обмоток асинхронного двигателя в режиме его функционирования / Р.Г. Мугалимов, А.Р. Мугалимова, Ю.А. Калугин, К.Э. Одинцов // Электротехнические системы и комплексы. 2018. №3(40). С. 70-78. doi: 10.18503/2311-8318-2018-3(40)-70-78
3. Экспериментально-аналитическая идентификация математической модели электромеханического преобразователя постоянного тока с применением метода наименьших квадратов / Н.А. Малёв, А.И. Мухаметшин, О.В. Погодицкий, А.Г. Городнов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2019. Т. 21. № 4. С. 113-122. doi: 10.30724/1998-9903-2019-21-4-113-122
4. Voltage characteristics of electricity supplied by public electricity networks; German version EN 50160:2010/A1:2015. URL: https://www.en-standard.eu/din-en-50160-a3-merkmalederspannung-in-offentlichenelektrizitatsversorgungsnetzen-deutsche-und-englische-fassung-n-50160-2010-pra3-2017/. (дата обращения 21.07.2022)
5. Суслов К.В., Солонина Н.Н., Герасимов Д.О. Современные подходы к оценке качества электрической энергии // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2017. Т. 19. № 7-8. С. 85-93.
6. Конесев С.Г., Мухаметшин А.В., Кириллов Р.В. Выбор схемы ВИУ для работы в резонансном режиме // I Междунар. науч.-техн. конф.: сб. науч. тр. Уфа: УГНТУ, 2013. С. 209-215.
7. IEC 61000-2-2: Electromagnetic Compatibility (EMC); Pt 2-2: Enviroment – Conpatibility levels for low-freguency conducted disturbances and signaling in public low-voltage power supple systems. URL: https://www.vde-verlag.de/standards/0800580/din-en-61000-2-2-vde-0839-2-2-2019-06.html. (дата обращения 21.07.2022)
8. Новые схемотехнические решения резонансной высоковольтной испытательной установки / С.Г. Конесев, А.В. Мухаметшин, Р.Т. Хазиева, Д.А. Стрижев // Инновационные направления развития электропривода, электротехнологий и электрооборудования: межвуз. сб. науч. тр. Уфа: УГНТУ, 2012. С. 178-183.
9. Конесев С.Г., Мухаметшин А.В. Оценка влияния параметров изоляции высоковольтного оборудования на режимы работы испытательной установки // Современные проблемы науки и образования. Электронный научный журнал. 2015. № 2. URL: https://science-education.ru/ru/article/view?id=20794. (дата обращения 21.07.2022)
10. Мухаметова Л.Р., Ахметова И.Г., Стриелковски В. Инновации в области хранения энергии // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2019. Т. 21. № 4. С. 41-47. doi: 10.30724/1998-9903-2019-21-4-33-40.
11. Конесев С.Г., Мухаметшин А.В. Математическое моделирование резонансных режимов испытательной установки // Вести высших учебных заведений Черноземья. 2015. №3. С. 51-55.
12. Performance of Natural Ester as a Transformer Oil in Moisture-Rich Environments / K. Bandara, C. Ekanayake, T. Saha, H. Ma // Energies. 2016. No. 9(4). 258. doi: 10.3390/en9040258.

13. Patsch R. Dielectric Diagnostics of Power Transformers and Cables - Return Voltage Measurements, Theory and Practical Results. VDE High Voltage Technology 2018; ETG-Symposium. URL: https://www.vde-verlag.de/proceedings-de/454807130.html. (дата обращения 21.07.2022)
14. Конесев С.Г., Мухаметшин А.В., Конев А.А. Исследование режимов работы дросселя резонансной испытательной установки // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2016. Т. 12. № 3. С. 5-10.
15. Пат. 132213 Российская Федерация, МПК G01R. Компактная испытательная установка для испытания изоляции электрооборудования повышенным напряжением / Конесев С.Г., Мухаметшин А.В.; заявитель Конесев С.Г. № 2013108529; заявл. 26.02.2013, опубл. 10.09.2013.
16. Пат. 108856 Российская Федерация, МПК G01R 31/06. Компактное устройство для испытания изоляции повышенным напряжением / Конесев С.Г., Хазиева Р.Т., Стрижев Д.А.; заявитель Конесев С.Г. № 2011113264/28; заявл. 06.04.2011, опубл. 27.09.2011.
17. Пат. 2662952 Российская Федерация, МПК G01R. Установка для испытания изоляции электрооборудования повышенным напряжением / Конесев С.Г., Мухаметшин А.В., Конев А.А., Гайнутдинов И.З.; заявитель ООО Научно-инженерный центр «Энергодиагностика». № 2017130067; заявл. 24.08.2017, опубл. 31.08.2018.
18. Конесев С.Г., Хазиева Р.Т. Анализ стабилизационных свойств индуктивно-емкостных преобразователей при различных способах подключения гибридных электромагнитных элементов // Электротехнические системы и комплексы. 2017. №1(34). С. 49-55. doi: 10.18503/2311-8318-2017-1(34)-49-55
19. Данилов А. Современные промышленные датчики тока // Современная электроника. 2004. № 1. С. 26-28.
20. Пат. 156457 Российская Федерация, МПК G01R. Установка для испытания средств защиты / Мухаметшин А.В., Мухаметшин Е.В.; заявитель Мухаметшин А.В.; № 201524718; заявл. 23.06.2015, опубл. 10.11.2015.
21. Shahmaev I.Z., Gaisin B.M., Shiryaev O.V. A new method of taking management decisions at designing and developing electric power systems // 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). IEEE, 2016. doi: 10.1109/ICIEAM.2016.7911000
22. Mudiraj A.N. Improvement of Power Quality by mitigating harmonics in single phase AC distribution // International Conference on Automatic Control and Dynamic Optimization Techniques (ICACDOT). IEEE, 2016. Pp. 83-88. doi: 10.1109/ICACDOT.2016.7877556
23. Антонов А.И. Исследование уровня электромагнитных помех в сети 10/0,4 кВ с силовыми трансформаторами различной мощности при несимметричном характере нагрузки // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2017. Т. 19. № 9-10. С. 65-76.
24. Rajasekhar N.V., Babu M.N. Harmonics reduction and power quality improvement by using DPFC // International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT). IEEE, 2016. Pp. 1754-1758. doi: 10.1109/ICEEOT.2016.7754987
25. Akdeniz E., Bagriyanik M. A knowledge-based decision support algorithm to reduce the impact of transmission system vulnerabilities // International Journal of Electric Power and Energy Systems. 2016. No. 78. Pp. 436-444. doi: 10.1016/j.ijepes.2015.11.041

Поступила в редакцию 02 июня 2022 г.

INFORMATION IN ENGLISH

INSTALLATION FOR TESTING INSULATION OF ELECTRICAL EQUIPMENT WITH INCREASED VOLTAGE

Regina T. Khazieva

Associate Professor, Department of Electrical Engineering and Electrical Equipment of Enterprises, Ufa State Petroleum Technical University, Ufa, Russia, khazievart@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-7075-0363

Petr I. Vasilyev

Teaching Assistant, Department of Electrical Engineering and Electrical Equipment of Enterprises, Ufa State Petroleum Technical University, Ufa, Russia, Petrvasilyev17@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-4961-9149

Radmir R. Aflyatunov

Teaching Assistant, Department of Electrical Engineering and Electrical Equipment of Enterprises, Ufa State Petroleum Technical University, Ufa, Russia, Radmir.afl@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0003-0772-2519

In the article, the authors investigated a device for testing the insulation of electrical equipment with increased voltage. Insulation in electrical devices is an essential structural element. The electrical strength of the insulation is determined by its ability to withstand the continuous rated voltage for which the installation is designed. But in some cases, the strength of the insulation may deteriorate due to its moisture or due to defect development. Defects can be air inclusions in a solid or liquid dielectric, which further create conditions for the occurrence of partial discharges. The current test scheme for determining the insulation electrical strength margin is considered. A diagram of the developed installation for testing insulation based on a single design and technological component is presented. The aim of the work is to study the dependence of the voltage gain on the frequency change for a single-section and two-section multifunctional integrated electromagnetic component (MIEK). A hypothesis was put forward that the use of a two-section multifunctional integrated electromagnetic component will significantly increase the voltage gain compared to the use of a single-section single design-technological component. In the process of scientific research of the installation for testing the electrical equipment insulation, methods of mathematical modeling were used. The presented device has smaller weight and size indicators and more effective voltage gain indicators. As a result of mathematical modeling, it is shown that the use of a two-section multifunctional integrated electromagnetic component makes it possible to increase the voltage gain to 90, while when using a single-section component, the voltage gain is 9. The results of the studies confirm the relevance and significance of component integration in order to reduce the weight and dimensions of the known devices.

Keywords: high voltage testing, single design and technological component, inductance, capacitance, resonant circuit, integration of components

REFERENCES

1. Kozlov V.K., Kirzhatskikh E.R. Autonomous capacitive power supply for devices for measuring parameters of an overhead power transmission line. *Izvestiya bysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki* [Power engineering: research, equipment, technology], 2017, vol. 19, no. 3-4, pp. 63. (In Russian)

2. Mugalimov R.G., Mugalimova A.R., Kalugin Y.A., Odintsov K.E. Methodology for diagnostics and identification of malfunctions of windings of an induction motor in the mode of its operation. *Elektrotekhnicheskie sistemy i kompleksy* [Electrotechnical systems and complexes], 2018, no. 3(40), pp. 70-78. (In Russian) doi: 10.18503/2311-8318-2018-3(40)-70-78
3. Malev N.A., Mukhametshin A.I., Pogoditsky O.V., Gorodnov A.G. Experimental and analytical identification of a mathematical model of an electromechanical DC converter using the method of least squares. *Izvestiya bysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki* [Power engineering: research, equipment, technology], 2019, vol. 21, no. 4, pp. 113-122. (In Russian) doi: 10.30724/1998-9903-2019-21-4-113-122
4. Voltage characteristics of electricity supplied by public electricity networks; German version EN 50160:2010/A1:2015. URL https://www.en-standard.eu/din-en-50160-a3-merkmalederspannung-in-offentlichenelektrizitatsversorgungsnetzen-deutsche-und-englische-fassung-en-50160-2010- pra3-2017/ (accessed 20 December 2018)
5. Suslov K.V., Solonina N.N., Gerasimov D.O. Modern approaches to the assessment of the quality of electrical energy. *Izvestiya bysshikh uchebnykh zavedeniy. Problem energetiki* [Power engineering: research, equipment, technology], 2017, vol. 19, no. 7-8, pp. 85-93. (In Russian)
6. Konesev S.G. The choice of the VIA circuit for operation in the resonant mode. *I Mezhdunar. Nauch.-tekhn. Konf.: sb. Nauch. Tr.* [1st Intern. scientific and technical Conf. Collection of scientific papers]. Ufa, USPTU Publ., 2013, pp. 209-215. (In Russian)
7. IEC 61000-2-2: Electromagnetic Compatibility (EMC); Pt 2-2: Enviroment – Conpatibility levels for low-freguency conducted disturbances and signaling in public low-voltage power supple systems. 2000. 29 p.]. URL: https://www.vde-verlag.de/standards/0800580/din-en-61000-2-2-vde-0839-2-2-2019-06.html (accessed 20 December 2018)
8. Konesev S.G., Mukhametshin A.V., Khazieva R.T., Strizhev D.A. New circuit solutions of the resonant high-voltage test facility. *Innovatsionnye napravleniya razvitiya elektroprivoda, elektrotekhnologiy i elektrooborudovaniya: mezhvuz* [Innovative directions of development of electric drive, electrical technologies and electrical equipment]. Ufa, USPTU Publ., 2012, pp. 178-183. (In Russian)
9. Konesev S.G. Assessment of the influence of insulation parameters of high-voltage equipment on the operating modes of the test facility. *Modern problems of science and education. Electronic scientific journal.* 2015. No. 2. URL: www.science-education.ru/122-20794 - 07.08.2015. (accessed 21 July 2022) (In Russian)
10. Mukhametov L.R., Akhmetova I.G., Strielkowski V. Innovations in the field of energy storage. *Izvestiya bysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki.* [Power engineering: research, equipment, technology], 2019, vol. 21, no. 4, pp. 41-47. (In Russian) doi: 10.30724/1998-9903-2019-21-4-33-40
11. Konesev S.G., Mukhametshin A.V. Mathematical modeling of resonance modes of the test setup. *Vesti vysshikh uchebnykh zavedeniy Chernozemya* [News of higher educational institutions of the Chernozem region], 2015, no. 3, pp. 51-55. (In Russian)
12. Bandara K., Ekanayake C., Saha T., Ma H. Performance of Natural Ester as a Transformer Oil in Moisture-Rich Environments. Energies, 2016, no. 9(4), p. 258. doi: 10.3390/en9040258
13. Patsch, R. Dielectric Diagnostics of Power Transformers and Cables - Return Voltage Measurements, Theory and Practical Results. VDE High Voltage Technology 2018; ETG-Symposium. URL:https://www.vde-verlag.de/proceedings-de/454807130.html (accessed 21 July 2022)
14. Konesev S.G., Mukhametshin A.V., Konev A.A. Investigation of the operating modes of the resonant test facility choke. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye kompleksy i sistemy* [Electrical and information complexes and systems], 2016, vol. 12, no. 3. (In Russian)
15. Konesev S.G., Mukhametshin A.V. *Kompaktnaya ispytatelnaya ustanovka dlya ispytaniya izolyatsii elektrooborudovaniya povyshennym napryazheniem* [Compact test setup for testing insulation of electrical equipment with increased voltage]. Patent RF no. 2013108529, 2013.
16. Konesev S.G., Khazieva R.T., Strizhev D.A. *Kompaktnoe ustroystvo dlya ispytaniya izolyatsii povyshennym napryazheniem* [Compact high voltage insulation tester]. Patent RF no. 2011113264/28, 2011.
17. Konesev S.G., Mukhametshin A.V., Konev A.A., Gainutdinov I.Z. *Ustanovka dlya ispytaniya izolyatsii elektrooborudovaniya povyshennym napryazheniem* [Installation for testing insulation of electrical equipment with increased voltage]. Patent RF no. 2017130067, 2017.
18. Konesev S.G., Khazieva R.T. Analysis of the stabilization properties of inductive-capacitive converters for various methods of connecting hybrid electromagnetic elements. *Elektrotekhnicheskie sistemy i kompleksy* [Electrotechnical systems and complexes], 2017, no. 1(34), pp. 49-55. (In Russian). doi: 10.18503/2311-8318-2017-1(34)-49-55
19. Danilov A. Modern industrial current sensors. *Sovremennaya elektronika* [Modern electronics], 2004, no. 1, pp. 26-28. (In Russian)
20. Mukhametshin A.V., Mukhametshin E.V. *Ustanovka dlya ispytaniya sredstv zashchity* [Installation for testing protection means]. Patent RF no. 201524718, 2015.
21. Shahmaev I.Z., Gaisin B.M., Shiryaev O.V. A new method of taking management decisions at designing and developing electric power systems. 2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). IEEE, 2016, pp. 1-3. doi: 10.1109/ICIEAM.2016.7911000
22. Mudiraj A.N. Improvement of Power Quality by mitigating harmonics in single phase AC distribution. 2016 International Conference on Automatic Control and Dynamic Optimization Techniques (ICACDOT). IEEE, 2016, pp. 83-88. doi: 10.1109/ICACDOT.2016.7877556
23. Antonov A.I. Investigation of the level of electromagnetic interference in a 10/0.4 kV network with power transformers of various capacities with an asymmetric nature of the load. *Izvestiya bysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki* [Power engineering: research, equipment, technology], 2017, vol. 19, no. 9-10, pp. 65-76. (In Russian)
24. Rajasekhar N.V., Babu M.N. Harmonics reduction and power quality improvement by using DPFC. 2016 International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT). IEEE, 2016, pp. 1754-1758. doi: 10.1109/ICEEOT.2016.7754987
25. Akdeniz E, Bagriyanik M. A knowledge-based decision support algorithm to reduce the impact of transmission system vulnerabilities. International Journal of Electric Power and Energy Systems, 2016, no. 78, pp. 436-444. doi: 10.1016/j.ijepes.2015.11.041

Хазиева Р.Т., Васильев П.И., Афлятунов Р.Р. Исследование установки для испытания изоляции электрооборудования повышенным напряжением // Электротехнические системы и комплексы. 2022. № 3(56). С. 65-69. https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-3(56)-65-69

Khazieva R.T., Vasilyev P.I., Aflyatunov R.R. Installation for Testing Insulation of Electrical Equipment with Increased Voltage. *Elektrotekhnicheskie sistemy i kompleksy* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2022, no. 3(56), pp. 65-69. (In Russian). https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-3(556)-65-69

МОНИТОРИНГ, КОНТРОЛЬ И ДИАГНОСТИКА ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

УДК 621.311+621.34.001 https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-3(56)-70-79

Храмшин В.Р.[1], Евдокимов С.А.[1], Гасиярова О.А.[2], Карандаев А.С.[3], Логинов Б.М.[3]

[1] Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова,
[2] ООО НПП «Учтех-Профи», Челябинск
[3] Южно-Уральский государственный университет (НИУ), Челябинск

ОБОСНОВАНИЕ РАЗРАБОТКИ ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА УПРУГОГО МОМЕНТА ГЛАВНОЙ ЛИНИИ КЛЕТИ ПРОКАТНОГО СТАНА

На основании литературного обзора показана актуальность непрерывного контроля состояния электромеханических систем клетей прокатных станов. Подчеркнута целесообразность разработки систем мониторинга упругого момента шпинделей толстолистовых станов. Целью является непрерывный контроль динамических нагрузок главной линии клети с возможностью регистрации усталостных повреждений. Дана характеристика оборудования горизонтальной клети стана 5000 ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (ПАО «ММК»). Названы причины поломок шпинделей и валков, основной из которых является накопление нагружений, обусловленных динамическими перегрузками при захвате раскатов валками. Показаны реальные поломки валка и шпинделя и осциллограммы координат электроприводов в аварийном режиме. Рассмотрена структура системы измерения упругой деформации валопроводов, ранее установленная на стане. Подтверждена эффективность мониторинга упругого момента. Представлены основные принципы создания инновационной телеметрической системы онлайн-мониторинга упругого момента на передающих валах. Сформулированы требования к системе, предложено ее построение по модульному принципу. Основными требованиями являются простота монтажа и индукционное питание измерительного устройства. Дан перечень и обосновано применение модулей, обеспечивающих контроль, передачу и хранение информации. Для измерения упругого момента рекомендовано применение тензорезистов, включенных по схеме сбалансированного моста. Предложено индуктивное питание измерительного блока, установленного на валу, без применения аккумуляторных батарей. Обоснована конфигурация базы данных, включающая характеристическую и текстовую базы, базы данных сигналов тревоги и длительного хранения информации. Представлена «желаемая» структура разрабатываемой системы. Подчеркнута актуальность ее технического исполнения, отмечены преимущества применения для расширения сортамента и оптимизации программ прокатки. Наряду с предотвращением ущерба от аварий, это обеспечит синергетический эффект от ее промышленного внедрения на действующих прокатных станах.

Ключевые слова: прокатная клеть, электромеханическая система, шпиндель, упругий момент, мониторинг, телеметрическая система, концепция, обоснование, структура, модули

ВВЕДЕНИЕ

Необходимым условием реализации концепции «цифровой прокатный стан» является оснащение его оборудования телеметрическими системами мониторинга [1, 2]. Они должны стать основой систем диагностирования технического состояния в онлайн-режиме, что обеспечит создание «умного» производства и будет способствовать переходу металлургической отрасли на инновационные рельсы.

Сложность и стоимость электромеханических систем прокатных станов постоянно увеличиваются. Чтобы обеспечить их эффективность и сохранить работоспособность, важно активно контролировать рабочие нагрузки, регистрировать повреждения и износ критических компонентов. К таким компонентам относятся шпиндели, обеспечивающие передачу крутящего момента от двигателей к рабочим валкам. Несмотря на внешнюю простоту, они относятся к дорогостоящему оборудованию. Задача поддержания их работоспособности особо актуальна для толстолистовых прокатных станов, электромеханические системы которых работают в реверсивном режиме с частыми ускорениями и торможениями. Постоянные динамические режимы приводят к преждевременному износу оборудования, что приносит предприятию существенный ущерб [3, 4]. Поэтому, наряду с измерением динамических нагрузок, назначением системы мониторинга является контроль состояния оборудования, предупреждение аварий либо выяснение причин в случае, если авария произошла. Сопутствующей задачей является прогнозирование срока службы электромеханической системы главного привода клети.

Авторами [5] утверждается, что «прокатный стан является основным оборудованием для производства продукции, от его эффективности и надежности зависят возможности предприятия. Повреждение системы главного привода напрямую влияет на производство и приводит к огромным потерям». Аналогичный вывод сделан в [6]: «шпиндель прокатного стана всегда подвергается воздействию окружающей среды, усталостной нагрузке из-за момента при периодическом вращении, из-за этого существует вероятность поломки». В [7] отмечается, что «эксплуатация прокатных станов связана со значительным износом шпинделей, редукторов и подшипников. На них сложно реализовать цифровые диагностические инструменты из-за тяжелых условий эксплуатации». Основной причиной низкой долговечности элементов главных линий клетей станов горячей прокатки являются высокие динамические (ударные) нагрузки, возникающие при захвате раскатов валками. Здесь под термином «раскат» понимается промежуточный продукт между заготовкой (слябом) и готовым продуктом (полосой либо листом).

© Храмшин В.Р., Евдокимов С.А., Гасиярова О.А., Карандаев А.С., Логинов Б.М., 2022

Проблемы ограничения динамических нагрузок прокатных станов рассматривали многие отечественные и зарубежные ученые. В числе публикаций последних лет следует выделить работы [8, 9], а также [10, 11], посвященные мониторингу динамических нагрузок и прогнозированию ресурса электрического и механического оборудования. Достаточно подробно этот вопрос исследован в диссертациях [12, 13]. В статье [14] предлагается использовать угловые и радиальные зазоры в целях диагностики износа приводных механизмов, осуществляемой путем анализа переходных процессов. Однако для решения этих вопросов необходимо, прежде всего, иметь возможность «видеть» динамический момент на шпинделе. Поэтому актуальной научно-практической задачей является разработка телеметрических измерительных систем упругого момента. Авторским коллективом представленной публикации накоплен значительный опыт внедрения систем мониторинга оборудования прокатных станов. Отдельные результаты опубликованы в [15–17].

В работе [5] представлены «многопрофильное исследование и разработка интеллектуальной системы контроля остаточного срока полезного использования для станов горячей прокатки». Приведен подробный анализ диагностических систем. В [18] также выполнен анализ известных систем мониторинга динамических нагрузок. Разработан «цифровой телеметрический измеритель на основе тензодатчиков с бесконтактным питанием, который может применяться не только на прокатных станах, но и в других отраслях промышленности в составе стационарных систем мониторинга нагрузок». Сделан вывод, что «для условий прокатного производства наиболее приемлемым является тензометрическая схема с передачей цифровых данных по радиоканалу частотно-модулированным сигналом».

По результатам проведенного литературного обзора сделан вывод: в известных публикациях рассматриваются принципы мониторинга упругих моментов с помощью телеметрических систем, однако информация о структурах и аппаратном составе этих систем, как правило, не приводится. Поэтому задача разработки и подробного рассмотрения системы онлайн-мониторинга упругого момента на шпинделе прокатного стана является актуальной. В конкретном случае она решается для реверсивной клети стана 5000 ПАО «ММК» (далее – стан 5000). Представленная публикация посвящена обоснованию принципов ее построения.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Фотография клети стана 5000 представлена на **рис. 1**, характеристика, сортамент стана и описание силового оборудования приведены в [13]. В [12] рассмотрены результаты моделирования и экспериментальных исследований динамических режимов. Основные технические характеристики оборудования клети приведены в **таблице**. Электроприводы верхнего и нижнего валков выполнены индивидуальными на основе синхронных двигателей с частотным регулированием скорости. Установлены двигатели мощностью 12 МВт, обеспечивающие номинальный момент 1,91 МН·м.

Рис. 1. Движение металла по рольгангу на выходе клети стана 5000

Таблица

Характеристики реверсивной прокатной клети стана 5000

Наименование компонента	Наименование характеристики	Значение или описание
Прокатные валки	Диаметр рабочих валков Длина рабочих валков	1210-1110 мм 5300 мм
	Диаметр опорных валков Длина опорных валков	2300-2100 мм 4950 мм
	Скорость рабочих валков при максимальном диаметре валка	(0-3,17)/7,30 м/с
	Максимально допустимое усилие прокатки Максимальное усилие на цилиндрах HGC при давлении 300 бар со стороны поршня, 30 бар со стороны штока	120 МН Более 140 МН
Главный привод	Тип	Спаренный
	Мощность главного привода	2×12 МВт
	Частота вращения вала двигателя	(0-60)/115 об/мин
	Номинальный крутящий момент	2×1,91 МН·м
	Максимальный крутящий момент при прокатке	2×3,82 МН·м (200% от ном.)
	Максимальный крутящий момент перегрузки (двигатель)	2×4,23 МН·м (225% от ном.)
	Крутящий момент при отключении двигателя	2×5,25 МН·м (275% от ном.)

Вход раскатов в клеть осуществляется на относительно небольшой заправочной скорости (в диапазоне от 2 до 5 м/с), далее после формирования «лыжи» осуществляется разгон до установившейся скорости прокатки. Масса заготовки составляет 30 и более тонн, исходная толщина 300-350 мм. Абсолютные обжатия в первых проходах – до 30 мм. Очевидно, что задание в клеть заготовки, обладающей большой инерцией, при указанных обжатиях приводит к значительным (часто недопустимым) динамическим нагрузкам. Кроме того, на динамические показатели оказывают влияние условия захвата, которые определяются рядом факторов, в частности соотношением линейных скоростей валков и раската [19, 20]. Влияние настройки электроприводов

на динамические процессы исследовано в [21]. Значительное негативное влияние на их качество оказывают зазоры в механических соединениях шпинделей [22].

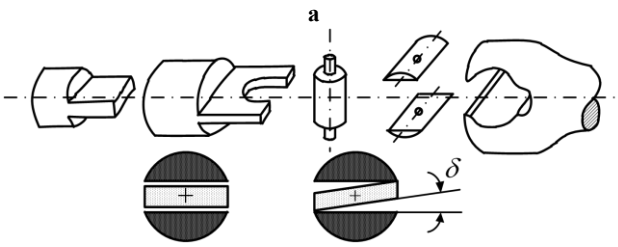
Исследования показали, что амплитудные значения упругого момента на шпинделе при входе металла в клеть могут превышать установившийся момент прокатки в 3–3,5 раза. Это приводит к накоплению усталостных нагрузок и разрушениям головок шпинделей и шеек валков. С учетом того, что момент прокатки заготовок «тяжелого» сортамента составляет до 200% номинального момента двигателя (согласно **таблице**, это уровень ограничения), указанное превышение составляет 600–700%. В [23] на основе анализа большого количества проходов на стане компании Rolled Products Inc. (США) при прокатке различных марок стали сделан вывод, что амплитуды динамического момента могут достигать 1200%. С целью сокращения количества поломок на стане 5000 установлены пороговые значения аварийной системы: 6500 кН·м – для предупреждения персонала и 8000 кН·м – для торможения быстрым остановом. Эти параметры превышают значения, приведенные в **таблице**.

Характеристика шпинделей

В главной линии установлены шпиндели выдвижного типа, фотография показана на **рис. 2, а** [13]. Непосредственно сочленение валка со шпинделем осуществляется с помощью головки специальной конструкции (**рис. 2, б**), которая крепится к рабочему валу. Аналогичная головка смонтирована со стороны двигателя. На этом же рисунке схематично показано замыкание углового зазора δ. Если зазор разомкнут, то при захвате раската валками происходит его замыкание, сопровождающееся механическим ударом и колебаниями упругого момента в шпинделе. Наиболее сильно динамические удары проявляются на стороне клети. Это вызвано большими массами вращающегося валка и перемещаемого слитка.

Непосредственно динамические удары, возникающие при захвате, редко приводят к поломкам и аварийным остановам стана. Их вероятными причинами являются разовые либо накопленные циклы перегрузок по крутильному моменту. К сожалению, наиболее частыми авариями являются поломка головки шпинделя (**рис. 3, а**) и поломка валка (**рис. 3, б**). Устранение их последствий связано с длительными простоями и значительными затратами.

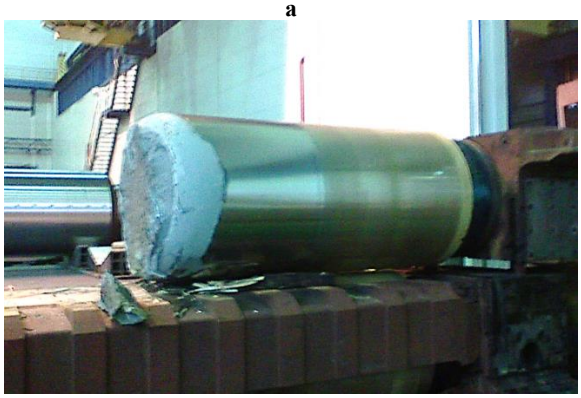
а



б

Рис. 2. Фотография шпинделя (а) и изображение деталей шпиндельного соединения (б)

а



б

Рис. 3. Поломки шпинделя (а) и валка (б) клети стана 5000

Причинами усталостных разрушений являются колебательные процессы моментов в динамических режимах. Это подтверждают осциллограммы, представленные на **рис. 4**, на которых зафиксирована авария, вызванная поломкой шейки нижнего валка клети в режиме захвата [12]. Захват происходит в момент времени t_1, далее в момент t_2 электромагнитный момент двигателя нижнего валка достигает уровня ограничения 4200 кН·м. Непосредственно поломка происходит в момент времени t_3, что видно по снижению момента нижнего двигателя от 4200 до 500 кН·м. Электропривод верхнего валка пытается «в одиночку» прокатать заготовку, но его усилий недостаточно, привод переходит в режим отсечки по моменту. Контур регулирования скорости размыкается, возникают медленно затухающие колебания скорости, обусловленные упругостью валопровода. Задание скорости двигателя аварийно снижается по сигналу от задатчика интенсивности (описание системы автоматического регулирования скорости приведено в [24]).

Представленные осциллограммы подтверждают колебательные свойства системы «электропривод-валок». В обычной ситуации колебания накладываются на ударный процесс замыкания зазоров, что приводит к увеличению амплитуды момента.

Осциллограммы подтверждают, что в предаварийной ситуации электроприводы валков переходят в режим ограничения. Очевидно, что в этом случае кратно возрастают динамические моменты на шпинделях.

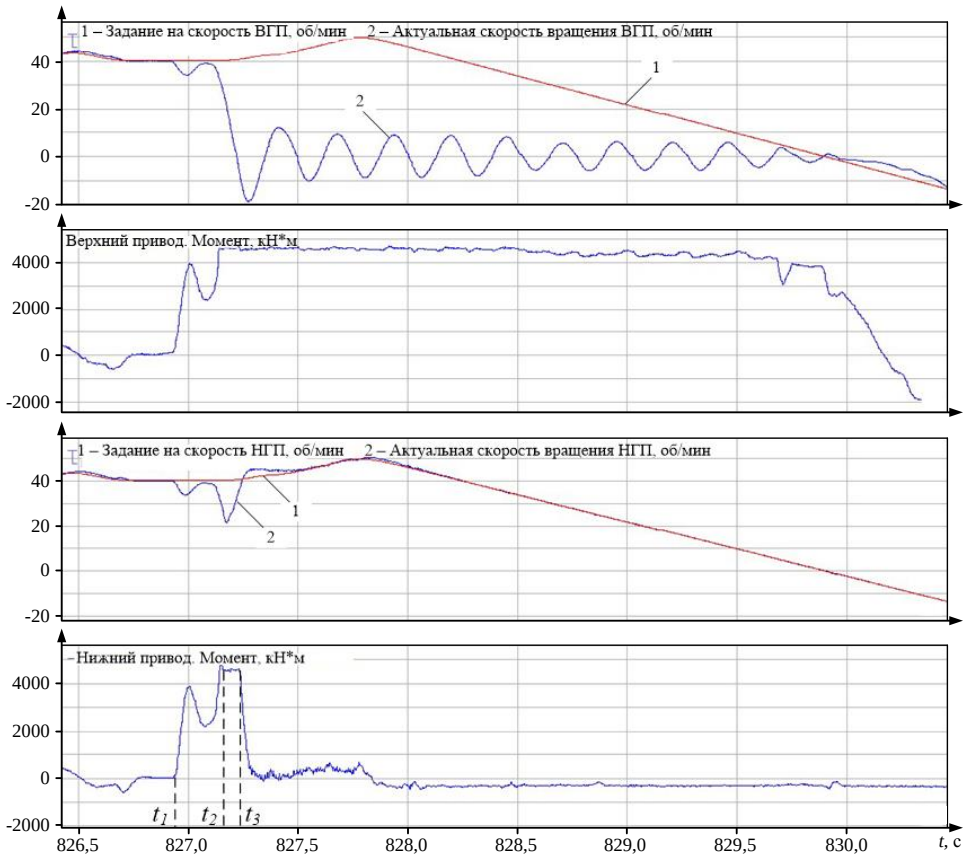


Рис. 4. Осциллограммы моментов и скоростей электроприводов при аварийной поломке шейки нижнего валка

Однако дать их оценку не представляется возможным в связи с отсутствием системы мониторинга упругого момента. Кроме того, динамическим режимам, как правило, предшествуют колебания упругих моментов с нарастающей амплитудой. Поэтому возможность их оперативного контроля позволит разработать мероприятия по предотвращению аварий.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Ниже приводится обоснование принципов построения телеметрической системы мониторинга упругого момента, предварительно дается характеристика системы, ранее установленной на стане.

Характеристика системы компании MANNER

Система измерения упругой деформации «MANNER TG28TE», разработанная фирмой MANNER (Германия), была смонтирована на стане в 2011 г. Структура системы приведена на **рис. 5**. Однако ее эксплуатация была непродолжительной, основными причинами явилась необходимость повторной установки датчиков после каждой замены шпинделей.

На **рис. 6** представлены осциллограммы моментов на валах верхнего и нижнего шпинделей, а также осциллограммы крутильных колебаний, полученные с помощью этой системы.

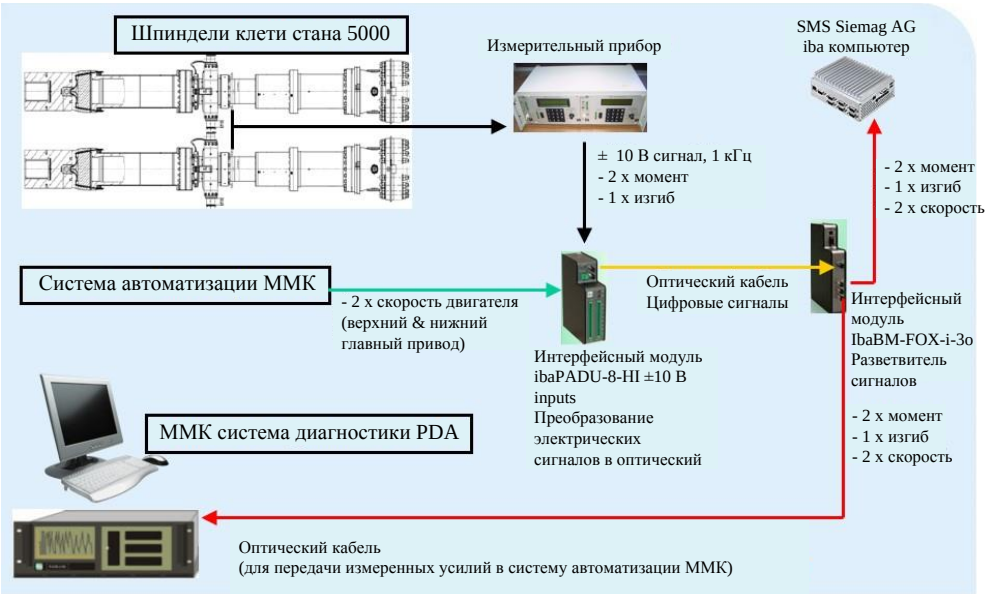


Рис. 5. Структура информационно-измерительной системы фирмы MANNER

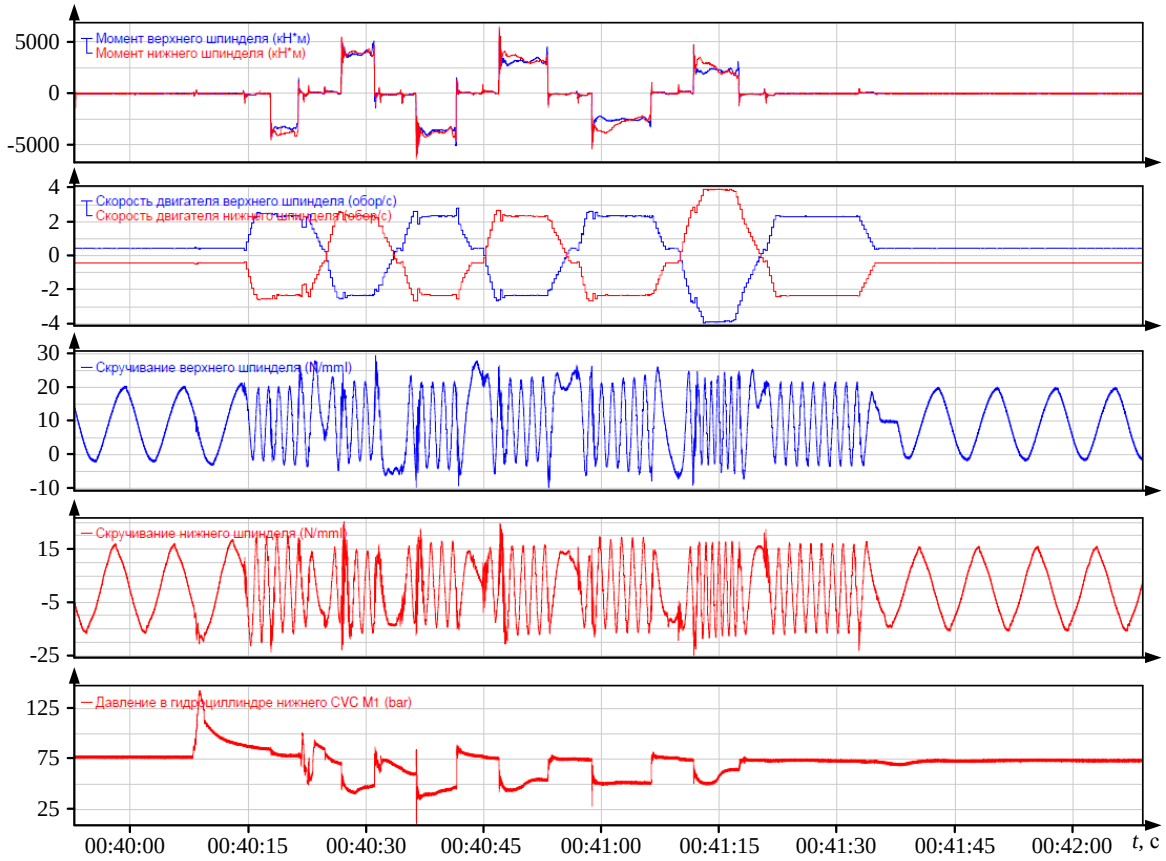


Рис. 6. Осциллограммы упругих моментов на валах шпинделей верхнего и нижнего валков горизонтальной клети, снятые системой «MANNER TG28TE»

Эти и другие осциллограммы подтверждают, что амплитуда динамического момента, наряду с ударным приложением нагрузки, определяется упругими свойствами механической передачи. На них прослеживаются затухающие колебания моментов, при этом максимальные значения наблюдаются на первом пике после захвата металла. Как показано в [25], амплитуда колебательных процессов может иметь значительно большие значения, чем максимум составляющей момента, вызванного непосредственно ударным замыканием зазора.

В целом работа системы подтвердила эффективность непрерывного измерения упругого момента. При этом вывод о целесообразности онлайн-контроля крутильных колебаний был неоднозначным. Это связано со сложностью физической интерпретации и использования этого параметра в диагностических целях. В связи с выходом из строя данной системы была поставлена задача разработки и внедрения аналогичной системы «собственными силами». Основным требованием было обеспечение относительно простого монтажа измерительной аппаратуры и безбатарейное питание. Это должно повысить надежность и продолжительность ее эксплуатации.

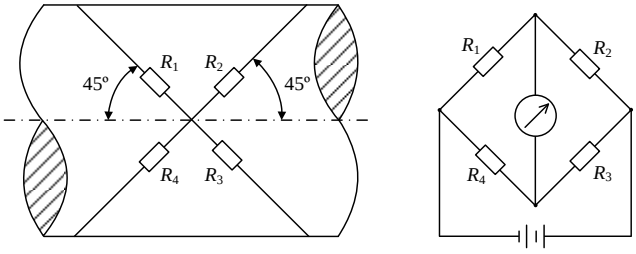
Обоснование принципа построения онлайн-системы

На основании анализа известных разработок в качестве прототипа была принята система онлайн-мониторинга шпинделей прокатного стана с индивидуальным электроприводом валков [5]. Принципы получения, передачи и хранения данных в этой разработке приняты за основу для создаваемой системы. Преимуществом является бесконтактный метод измерения крутящего момента с индукционным источником, что обеспечивает стабильное питание и длительную непрерывную работу.

Система должна представлять собой открытую распределенную структуру, в которой используется архитектура удаленного мониторинга состояния на основе режима полевой шины. Она должна включать в себя следующие модули: сбора сигналов, сетевой связи, сервера базы данных, контроля состояния и сигнализации, обработки и анализа сигналов, клиент-серверный модуль.

Модуль сбора сигналов

Точки измерения крутящего момента должны располагаться на валах шпинделей в выбранных местах. В направлении 45° к оси выходного вала наклеиваются четыре тензорезистора, образующих мостовую испытательную схему (**рис. 7**). Через онлайн-устройство телеметрии крутящего момента выходные сигналы моста передаются на встроенный модуль сбора данных, а затем после их обработки – на удаленный сервер данных посредством USB-интерфейса.



а **б**

Рис. 7. Схема расположения тензорезисторов (а) и их подключение по мостовой схеме (б)

Бесконтактный контроль крутящего момента на основе индукционного источника питания

Принцип работы датчика крутящего момента радиотелеметрического типа (**рис. 8**) заключается в усилении напряжения от тензодатчиков и преобразовании их в частотные сигналы, которые после модуляции передаются на приемник [23]. Усиленное напряжение преобразуется в сигнал эквивалентной частоты (20-100 кГц), который модулируется на несущей частоте. Во избежание взаимного влияния телеметрических систем, установленных на двух валах клети, они должны иметь разные несущие частоты. Частотно-модулированный сигнал передается вращающейся антенной, прикрепленной к валу. Приемная (статическая) антенна находится на расстоянии до 1 м от передающей. От статической антенны сигнал может быть передан через коаксиальный кабель к блоку воспроизведения, который демодулирует его в аналоговый сигнал напряжением ~10 В. На **рис. 8** измерительный блок питается от аккумуляторов, которые крепятся на валах. При установке бесконтактных датчиков крутящего момента имеет место индуктивный источник питания.

Таким образом, при использовании метода есть два способа питания вращающейся цепи – это питание от специальной батареи и применение индукционного источника питания. Датчик крутящего момента с питанием от батареи может работать относительно короткое время, поэтому плохо применим для длительного непрерывного мониторинга. Датчик крутящего момента с индукционным питанием, напротив, обладает необходимой энергией, которая передается посредством электромагнитной связи вращающейся и статической катушек. Такой источник обеспечивает долгосрочное стабильное питание и непрерывную работу системы без необходимости замены батарей. Поэтому датчик с таким питанием целесообразно использовать в разрабатываемой системе.

Модуль обработки и анализа сигналов предназначен для вычисления заданных функций. Как правило, выполняется анализ сигналов во временной и частотной областях. Предварительная обработка включает их фильтрацию и усиление (подобные операции производятся в большинстве систем диагностического мониторинга [26]). В расширенном варианте диагностирование должно обеспечить автоматизированный временной анализ, при необходимости – анализ формы и спектра сигнала, а также моделирование, расчет износа и усталостной долговечности.

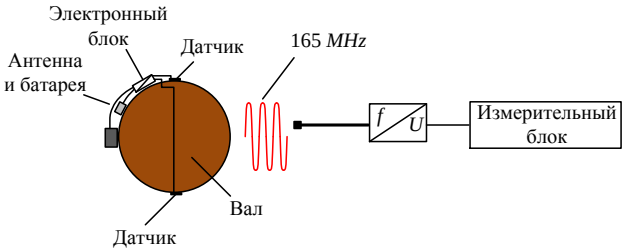


Рис. 8. Принцип передачи сигнала от измерительного моста

Модуль контроля состояния и сигнализации предназначен для отображения диагностической информации в реальном времени и оповещения о событиях.

Данные мониторинга должны содержать сигналы крутящего момента, усилий, скорости прокатки и других технологических параметров (при необходимости). Модуль выполняет их сопоставление с пороговыми значениями, при превышении которых система должна обеспечить отображение аварийных сигналов и их импортирование во внутреннюю базу данных.

Модуль сервера базы данных

Поскольку объем каждой выборки на месте велик, а их «внутренние связи» сложны, необходимо организовать хранение данных со всех точек измерения. При разработке программного обеспечения должна быть принята стандартная технология подключаемых модулей, которая позволяет относительно легко формировать и поддерживать систему данных. Для правильного хранения и управления информационными потоками предлагается разработать базы данных, перечисленные ниже.

Обычная база данных разделена на характеристическую и текстовую базы. Первая предназначена для хранения пикового и среднего значений крутящего момента и усилия прокатки. Текстовая база данных предназначена для хранения информации в режиме реального времени в непрерывном процессе, чтобы облегчить анализ состояния.

База данных сигналов тревоги: когда значения измеряемых величин выходят за пределы уровней тревоги, все параметры сохраняются в реальном времени. В случае полной загрузки базы должны автоматически выполняться резервное копирование и очистка. Также возможно предусмотреть применение облачных технологий хранения информации. Это целесообразно для случая, когда разрабатываемая система мониторинга будет являться частью системы онлайн-контроля более высокого уровня, например цеховой или заводской систем.

База данных истории: измеренные либо вычисленные характеристики могут храниться в течение, например, одного года для обеспечения запросов и сравнительного анализа. В этом случае один год является единицей резервного копирования данных.

Обобщенная структура информационно-измерительной системы, организованной на основе перечисленных модулей, представлена на **рис. 9**. Она принята за основу при создании аналога для стана 5000. Очевидно, что принцип ее построения может быть применен для устройств мониторинга состояния другого промышленного оборудования. Авторский коллектив имеет большой опыт разработки систем мониторинга состояния трансформаторов электросталеплавильных агрегатов [27–29]. Опыт, накопленный при их внедрении, может быть использован при разработке программного обеспечения разрабатываемой системы.

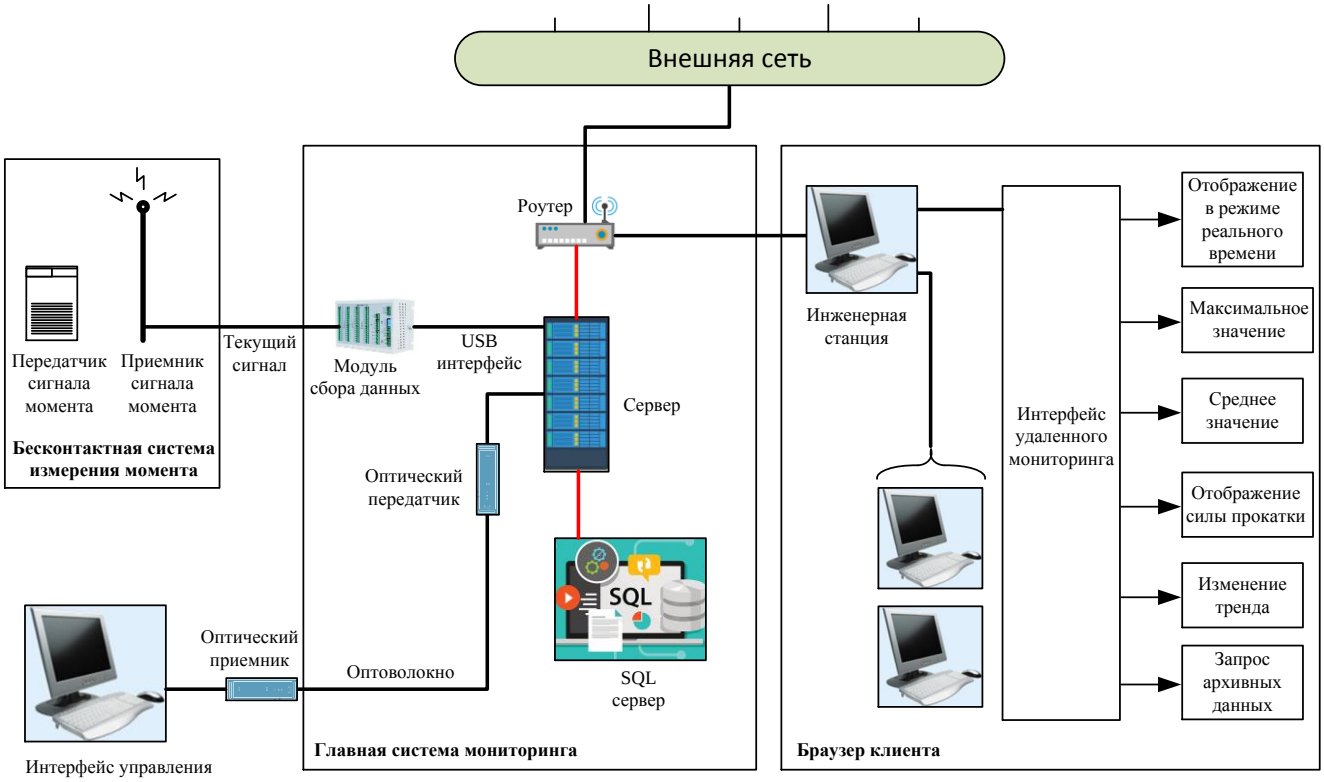


Рис. 9. Структура, поясняющая принцип передачи и обработки данных в создаваемой системе

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Реализация системы мониторинга поможет предотвратить катастрофический ущерб от аварий и сократить расходы от непредвиденных простоев. Вместе с тем, благодаря онлайн-мониторингу и анализу сигналов крутящего момента можно получить максимальные, минимальные и средние значения крутящего момента в процессе прокатки.

На основе их анализа можно настроить модель прогнозирования крутящего момента. После сопоставления расчетных значений с результатами испытаний могут быть оптимизированы программы и параметры прокатки (скорости, обжатия и др.). Это необходимо для улучшения ритма прокатки, увеличения производительности и защиты оборудования стана. Полученную информацию также целесообразно использовать при освоении новых сортаментов проката. В этом заключается синергия применения разработанной системы.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Совершенствование автоматизированных электроприводов и диагностика силового электрооборудования / И.А. Селиванов, А.С. Карандаев, С.А. Евдокимов, В.Р. Храмшин, А.А. Шеметова, А.С. Евдокимов, А.А. Лукин, А.Ю. Андрюшин, П.В. Шиляев, В.В. Головин, А.А. Титов, С.Е. Мостовой, С.А. Петряков // Известия вузов. Электромеханика. 2009. № 1. С. 5-11.
2. Разработка и внедрение интеллектуальных систем диагностирования технического состояния электрического оборудования / С.И. Лукьянов, А.С. Карандаев, С.А. Евдокимов, А.С. Сарваров, М.Ю. Петушков, В.Р. Храмшин // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2014. № 1. С. 129-136.
3. Согласование скоростей взаимосвязанных электроприводов клетей черновой группы прокатного стана / А.А. Радионов, В.Р. Храмшин, И.Ю. Андрюшин, В.В. Галкин, А.Н. Гостев // Труды VII Международной (XVIII Всероссийской) научно-технической конференции по автоматизированному электроприводу. Иваново: Ивановский государственный энергетический университет, 2012. С. 652-657.
4. Алгоритм расчета скоростных и нагрузочных режимов электроприводов клетей прокатного стана при прокатке толстых полос / В.В. Галкин, А.С. Карандаев, В.В. Головин, А.А. Радионов, В.Р. Храмшин, В.Р. Гасияров, О.А. Залогин // Известия ТулГУ. Технические науки. 2010. №3-2. С. 12-17.
5. Hou Y., Kong J.Y., Wang X.D. Research on Online Monitoring for the Main Drive System of Rolling Mill. Applied Mechanics and Materials. 2011. Vol. 127. Pp. 444-448. doi: 10.4028/www.scientific.net/amm.127.444
6. Kim E.S. Fatigue life evaluation of spindle of rolling mill using ADINA structure and WINLIFE. Journal of Mechanical Science and Technology. 2020. No. 34. 3991-3996. doi: 10.1007/s12206-020-2209-6
7. Model Based Monitoring of Dynamic Loads and Remaining Useful Life Prediction in Rolling Mills and Heavy Machinery / P. Krot, I. Prykhodko, V. Raznosilin, R. Zimroz // In: Advances in Asset Management and Condition Monitoring. Smart Innovation, Systems and Technologies, 2020. Vol. 166. Pp. 399-416. doi: 10.1007/978-3-030-57745-2_34
8. Shin N., Shin K., Bae J. A study on the health monitoring of hot rolling mill // 46th Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation. 2019. URL:https:www.iastatedigitalpress.com/qnde/article/id/8686/ (дата обращения 21.07.2022)
9. Shin K.Y., Kwon W.K. Development of Smart Condition Monitoring and Diagnosis System for Tandem Cold Rolling Mills in Iron and Steel Manufacturing Processes // 18th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS). PyeongChang, Korea (South), 2018. Pp. 1568-1572.
10. Ohlert J., Sprock A., Sudau P. Digitalization in hot and cold rolling mills // Mat. Sci. Forum. 2016. Vol. 854. Pp. 215-224. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.854.215
11. Krot P.V. Hot rolling mill drive train dynamics: torsional vibration control and backlash diagnostics // Millennium Steel China. Annual Issue. 2009. Pp. 91-95. URL:https:www.researchgate.net/publication/202044159_Hot_rolling_mill_drive_train_dynamics_torsional_vibration_contr

ol_and_backlashes_diagnostics (дата обращения 21.07.2022)
12. Логинов Б.М. Ограничение динамических нагрузок электроприводов горизонтальной клети толстолистового прокатного стана: дис. … канд. техн. наук / Логинов Борис Михайлович. Челябинск, 2019. 164 с.
13. Гасияров В.Р. Совершенствование электротехнических систем реверсивной клети толстолистового прокатного стана: дис. … докт. техн. наук / Гасияров Вадим Рашитович. Челябинск, 2021. 358 с.
14. Krot P.V. Nonlinear Vibrations and Backlashes Diagnostics in the Rolling Mills Drive Trains // Proc. of 6th EUROMECH Nonlinear Dynamics Conference (ENOC. St. Petersburg, Russia, 2008. Pp 360-365. doi:10.13140/2.1.3353.1840
15. Information and Measurement System for Control of Technical State of Asynchronous Electric Motors with Group Supply from Frequency Converter / A.A. Radionov, S.A. Evdokimov, A.S. Karandaev, V.R. Khramshin // 12th International Conference on Actual Problems of Electronic Insrument Engineering (APEIE-). Novosibirsk, 2014. Vol. 1. Pp. 280-285. doi: 10.1109/APEIE.2014.7040897
16. Development and industrial introduction of systems for monitoring technical state of the rolling mills' electrical equipment / V.R. Khramshin, A.S. Evdokimov, S.A. Evdokimov, A.S. Karandaev // IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EIConRusNW). St. Petersburg, Russia, 2015. doi: 10.1109/eiconrusnw.2015.7102264
17. Новые технические решения в электроприводах и системах регулирования технологических параметров станов горячей прокатки / А.С. Карандаев, В.Р. Храмшин, И.Ю. Андрюшин, В.В. Головин, П.В. Шиляев, С.А. Петряков, А.А. Лукин // Известия ТулГУ. Технические науки. 2010. №3-2. С. 34-40.
18. Крот П.В. Телеметрические системы мониторинга динамических нагрузок в линиях привода прокатных станов // Вибрация машин: измерение, снижение, защита: научно-технический и производственный сборник статей. Донецк: ДонНТУ, 2008. Вып. 1. С. 46-53.
19. Артюх В.Г. Основы защиты металлургических машин от поломок: монография. Мариуполь: Издат. группа «Университет», 2015. 288 с.
20. Limitation of Dynamic Loads of the Mechatronic System of the Rolling Stand / A.A. Radionov, B.M. Loginov, K.E. Odintsov, O.A. Gasiyarova // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). Sochi, Russia, 2022. Pp. 1157-1162. doi: 10.1109/ICIEAM54945.2022.9787233
21. Dynamic Load Limitation in Electromechanical Systems of the Rolling Mill Stand during Biting / A.A. Radionov, V.R. Gasiyarov, A.S. Karandaev, D.Yu. Usatiy, V.R. Khramshin // IEEE 11th International Conference on Mechanical and Intelligent Manufacturing Technologies (ICMIMT). Cape town, South Africa, 2020. doi: 10.1109/ICMIMT49010.2020.9041192
22. Developing Digital Observer of Angular Gaps in Rolling Stand Mechatronic System / O.A. Gasiyarova, A.S. Karandaev, I.N. Erdakov, B.M. Loginov, V.R. Khramshin // Machines. 2022. 10. 141. doi: 10.3390/machines10020141
23. Report on Torque Measurements and Process - ACIDA...Musterbericht - ACIDA Torque Measurement Services by ACIDA GmbH Report on Torque Measurements and Process Analyses at the Heavy. ACIDA GmbH. URL:https:www.vdocuments.site/report-on-torque-measurements-and-process-acidamusterbericht-acida-torque.html?page=1 (дата обращения 21.07.2022)
24. Экспериментальное определение параметров двухмассовой электромеханической системы прокатного стана / А.С. Карандаев, А.А. Радионов, Б.М. Логинов, О.А. Гасиярова, Е.А. Гартлиб, В.Р. Храмшин // Известия вузов. Электромеханика. 2021. Т. 64. № 3. С. 24-35. doi:10.17213/0136-3360-2021-3-24-35
25. Dynamic Torque Limitation Principle in the Main Line of a Mill Stand: Explanation and Rationale for Use / V.R. Gasiyarov, V.R. Khramshin, S.S. Voronin, T.A. Lisovskaya, O.A. Gasiyarova // Machines. 2019. 7(4). 76. doi: /10.3390/machines7040076
26. Partial Discharge Monitoring Data: Statistical Processing to Assessment Transformer Condition / O.I. Karandaeva, I.M. Yachikov, E.A. Khramshina, N.N. Druzhinin // IEEE Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice (PEAMI). IEEE, 2019. Pp. 139-143. doi: 10.1109/PEAMI.2019.8915407
27. Diagnostic Functions of a System for Continuous Monitoring ofthe Technical Condition of the Transformers of Arc Steelmaking Furnaces / A.S. Karandaev, S.A. Evdokimov, V.R. Khramshin, R.A. Lednov // Metallurgist. 2014. Vol. 58. No. 7-8. Pp. 655-663. doi: 10.1007/s11015-014-9972-5
28. System for Real-Time Monitoring of the Technical State of a Transformer on an Ultrahigh-Power Electric-Arc Steelmaking Furnace / A.S. Karandaev, S.A. Evdokimov, V.R. Khramshin, A.A. Sarlybaev // Metallurgist. 2014. Vol. 58. No. 9-10. Pp. 872-879. doi: 10.1007/s11015-015-0010-z
29. Monitoring Technical State of the Power Transformers Is a Necessary Condition of the Smart-Grid Technology Introduction within the Industrial Electric Networks / V.R. Khramshin, S.A. Evdokimov, An.A. Nikolaev, Ar.A. Nikolaev, A.S. Karandaev // IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EIConRusNW). St. Petersburg, Russia, 2015. Pp. 214-220. doi: 10.1109/EIConRusNW.2015.7102265

Поступила в редакцию 01 июня 2022 г.

INFORMATION IN ENGLISH

FEASIBILITY STUDY OF THE ELASTIC MOMENT TELEMETRIC MONITORING SYSTEM AT THE MAIN LINE ROLLING STAND

Vadim R. Khramshin

D.Sc. (Engineering), Professor, Department of Industrial Electric Power Supply, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, hvrmgn@gmail.com, https://orcid.org/ 0000-0003-0972-2803

Sergey A. Evdokimov

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Department of Electronics and Microelectronics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Olga A. Gasiyarova

Design Engineer, LLC Scientific and Production Enterprise "Uchtekh-Profi", Chelyabinsk, Russia.

Boris M. Loginov

Ph.D. (Engineering), Master's Degree Student, Department of Mechatronics and Automation, South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia, lb18@yandex.ru.

Alexander S. Karandaev

D.Sc. (Engineering), Professor, Chief Researcher, South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia, askaran@mail.ru.

The literature review was used to prove the urgency of the electromechanical system state continuous monitoring at rolling stands. It was pointed out that a monitoring system must be developed to control the spindle elastic moment at plate rolling mills. The main purpose is to provide continuous monitoring of dynamic loads at the main line stand, which can detect fatigue damage. The paper gives the characteristics of the horizontal stand equipment at 5000 mill, PJSC "Magnitogorsk Iron and Steel Plant" (PJSC "MMK"). The main causes of spindles and roll failures were enumerated, the main one being load accumulation caused by dynamic overloads during the strip gripping by the rolls. The paper shows the real roll and spindle failures and electric drive oscillograph records in the operating emergency conditions. The measuring system of roll elastic deformation previously installed at the mill was considered. The efficiency of the elastic moment monitoring was proved. The main principles of the innovative telemetric on-line monitoring system of the elastic moment at the transfer rolls were introduced. Requirements to the system were developed and it was proposed to design it according to the modular approach. The main requirements were the ease of installation and the induction feeding of the measuring device. The paper listed and justified the application of modules providing data control, transfer and storage. To measure the elastic moment, it was recommended to apply resistance strain gauges switched in accordance with the balanced bridge scheme. It was proposed to use induction feeding of the measuring device installed at the shaft without any electric batteries. The paper justified the database structure, which includes the characteristic and the text databases, alarm signals databases and databases for long storage of information. The paper also showed the proposed layout of the developed system. The authors pointed out the relevance of its technical implementation and the advantages of its application provided by the product range extension and rolling mode optimization. It will also make it possible to prevent the damage caused by failures and provide the synergistic effect due to its implementation at the operating rolling mills.

Keywords: rolling stand, electromechanical system, spindle, elastic moment, monitoring, telemetric system, concept, feasibility, structure, modules

REFERENCES

1. Selivanov I.A., Karandaev A.S., Evdokimov S.A., Khramshin V.R., Shemetova A.A., Evdokimov A.S., Lukin A.A., Andryushin A.Yu., Shilyaev P.V., Golovin V.V., Titov A.A., Mostovoy S.E., Petryakov S.A. Automatic electric drive improvement and electrical power equipment diagnostics. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika* [Russian Electromechanics], 2009, no. 1, pp. 5-11. (In Russian)
2. Lukyanov S.I., Karandaev S.I., Evdokimov S.A., Sarvarov A.S., Petushkov M.Yu., Khramshin V.R. Development and introduction of intelligent systems for electrical equipment state diagnostics. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Bulletin of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2014, no. 1, pp. 129-136. (In Russian)
3. Radionov A.A., Khramshin V.R., Andryushin I.Yu., Galkin V.V., Gostev A.N. Electric drive speed matching at roughing train of a rolling mill. *Trudy VII Mezhdunarodnoy (XVIII Vserossiyskoy) naucho-tekhnicheskoy konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu* [Proceedings of VII International (XVIII All-Russian) scientific and technical conference on automatic electric drive]. Ivanovo, Ivanovo State Power University Publ., 2012, pp. 652-657. (In Russian)
4. Galkin V.V., Karandaev A.S., Golovin V.V., Radionov A.A., Khramshin V.R., Gasiyarov V.R., Zalogin O.A. Algorithm for calculation of load modes at rolling stand electric drives during plate rolling. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie Nauki*. [Proceedings of Tula State University. Engineering Sciences], 2010, no. 3-2, pp. 12-17. (In Russian)
5. Hou Y., Kong J.Y., WangX.D. Research on Online Monitoring for the Main Drive System of Rolling Mill. Applied Mechanics and Materials, 2011, vol. 127, pp. 444-448. doi: 10.4028/www.scientific.net/amm.127.444
6. Kim E.S. Fatigue life evaluation of spindle of rolling mill using ADINA structure and WINLIFE. Journal of Mechanical Science and Technology, 2020, 34, 3991-3996. doi: 10.1007/s12206-020-2209-6
7. Krot P., Prykhodko I., Raznosilin V., Zimroz R. Model Based Monitoring of Dynamic Loads and Remaining Useful Life Prediction in Rolling Mills and Heavy Machinery. Advances in Asset Management and Condition Monitoring. Smart Innovation, Systems and Technologies, 2020, vol. 166, pp. 399-416. doi: 10.1007/978-3-030-57745-2_34
8. Shin N., Shin K., Bae J. A study on the health monitoring of hot rolling mill. 46th Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation. 2019. URL: https:www.iastatedigitalpress.com/qnde/article/id/8686/ (accessed 21 July 2022)
9. Shin K.Y., Kwon W.K. Development of Smart Condition Monitoring and Diagnosis System for Tandem Cold Rolling Mills in Iron and Steel Manufacturing Processes. 18th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS). IEEE, 2018, pp. 1568-1572.
10. Ohlert J., SprockA., Sudau P. Digitalization in hot and cold rolling mills. Mat. Sci. Forum. Trans Tech Publications, 2016, vol. 854, pp. 215-224. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.854.215
11. Krot P.V. Hot rolling mill drive train dynamics: torsional vibration control and backlash diagnostics. Millennium Steel China. Annual Issue. 2009. Pp. 91-95. URL: https:www.researchgate.net/publication/202044159_Hot_rolling_mill_drive_train_dynamics_torsional_vibration_control_and_backlashes_diagnostics(accessed 21 July 2022)
12. Loginov B.M. *Ogranichenie dinamicheskikh nagruzok elektroprivodov gorizontalnoy kleti tolstolistovogo prokatnogo stana*. Kand. Diss. [Electric drive dynamic load limiting at a horizontal stand of the plate rolling mill. Kand. Diss.]. Chelyabinsk, 2019. 164 p.
13. Gasiyarov B.R. *Sovershenstvovanie elektrotekhnicheskikh system reversivnoy kleti tolstolistovogo prokatnogo stana. Doct. Diss.* [Improvement of electro technical systems in a convertible stand at a plate rolling mill. Doct. Diss.]. Chelyabinsk, 2021. 358 p.
14. Krot P.V. Nonlinear Vibrations and Backlashes Diagnostics in the Rolling Mills Drive Trains. Proc. of 6th EUROMECH Nonlinear Dynamics Conference (ENOC). St. Petersburg, Russia, 2008. Pp 360-365. doi:10.13140/2.1.3353.1840
15. Radionov A.A., Evdokimov S.A., Karandaev A.S., Khramshin V.R. Information and Measurement System for Control of Technical State of Asynchronous Electric Motors with Group Supply from Frequency Converter. 12th International

Conference on Actual Problems of Electronic Insrument Engineering (APEIE). IEEE, 2014, vol. 1, pp. 280-285. doi: 10.1109/APEIE.2014.7040897
16. Khramshin V.R., Evdokimov A.S., Evdokimov S.A., Karandaev A.S. Development and industrial introduction of systems for monitoring technical state of the rolling mills' electrical equipment. IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EIConRusNW). IEEE, 2015. doi: 10.1109/eiconrusnw.2015.7102264
17. Karandaev A.S., Khramshin V.R., Andryushin I.Yu., Golovin V.V., Shilyaev P.V., Petryakov S.A., Lukin A.A. New technical solutionsin electric drives and in control systems of operating parameters at hot rolling mills. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie Nauki*. [Proceedings of Tula State University. Engineering Sciences], 2010, no. 3-2, pp. 34-40. (In Russian)
18. Krot P.V. Telemetric monitoring systems of dynamic loads in rolling mill drive lines. *Vibratsiya mashin: izmerenie, snizhenie, zashchita: nauchno-tekhnicheskiy i proizvodstvennyi sbornik statey* [Machine vibration: measuring, reduction, protection: collection of scientific, technical and industrial papers]. Donetsk, DonNTU Publ., 2008, iss. 1, pp. 46-53. (In Russian)
19. Artyukh V.G. *Osnovy zashchity metallurgicheskikh mashin ot polomok* [Fundamentals of metallurgical machines protection from failures]. Mariupol, Publishing group «University», 2015. 288 p. (In Russian)
20. Radionov A.A., Loginov B.M., Odintsov K.E., Gasiyarova O.A. Limitation of Dynamic Loads of the Mechatronic System of the Rolling Stand. International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). IEEE, 2022, pp. 1157-1162. doi: 10.1109/ICIEAM54945.2022.9787233
21. Radionov A.A., Gasiyarov V.R., Karandaev A.S., Usatiy D.Yu., Khramshin V.R. Dynamic Load Limitation in Electromechanical Systems of the Rolling Mill Stand during Biting. IEEE 11th International Conference on Mechanical and Intelligent Manufacturing Technologies (ICMIMT). IEEE, 2020. doi:10.1109/ICMIMT49010.2020.9041192
22. Gasiyarova O.A., Karandaev A.S., Erdakov I.N., Loginov B.M., Khramshin V.R. Developing Digital Observer of Angular Gaps in Rolling Stand Mechatronic System. Machines. 2022. 10. 141. doi: 10.3390/machines10020141
23. Report on Torque Measurements and Process - ACIDA...Musterbericht – ACIDA Torque Measurement Services by ACIDA GmbH Report on Torque Measurements and Process Analyses at the Heavy. ACIDAGmbH. URL: https:www.vdocuments.site/report-on-torque-measurements-and-process-acidamusterbericht-acida-torque.html?page=1 (accessed 21 July 2022)
24. Karandaev A.S., Radionov A.A., Loginov B.M. Gasiyarova O.A., Gartlib E.A., Khramshin V.R. Experimental calculation of two-mass electromechanical system parameters at a rolling mill. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika* [Russian Electromechanics], 2021, vol. 64, no. 3, pp. 24-35. doi: 10.17213/0136-3360-2021-3-24-35. (In Russian)
25. Gasiyarov V.R., Khramshin V.R., Voronin S.S., Lisovskaya T.A., Gasiyarova O.A. Dynamic Torque Limitation Principle in the Main Line of a Mill Stand: Explanation and Rationale for Use. Machines, 2019, 7(4), 76. doi: /10.3390/machines7040076
26. Karandaeva O.I., Yachikov I.M., Khramshina E.A., Druzhinin N.N. Partial Discharge Monitoring Data: Statistical Processing to Assessment Transformer Condition. IEEE Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice (PEAMI). IEEE, 2019, pp. 139-143. doi: 10.1109/PEAMI.2019.8915407
27. Karandaev,A.S. Evdokimov S.A., Khramshin V.R., Lednov R.A. Diagnostic Functions of a System for Continuous Monitoring of the Technical Condition of the Transformers of Arc Steelmaking Furnaces. Metallurgist, 2014, vol. 58, no. 7-8, pp. 655-663. doi: 10.1007/s11015-014-9972-5
28. Karandaev A.S., Evdokimov S.A., Khramshin V.R., Sarlybaev A.A. System for Real-Time Monitoring of the Technical State of a Transformer on an Ultrahigh-Power Electric-Arc Steelmaking Furnace. Metallurgist, 2014, vol. 58, no. 9-10. pp. 872-879. doi:10.1007/s11015-015-0010-z
29. Khramshin V.R., Evdokimov S.A., Nikolaev An.A., Nikolaev Ar.A., Karandaev A.S. Monitoring Technical State of the Power Transformers Is a Necessary Condition of the Smart-Grid Technology Introduction within the Industrial Electric Networks. IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EIConRusNW). IEEE, 2015, pp. 214-220. doi: 10.1109/EIConRusNW.2015.7102265

Обоснование разработки телеметрической системы мониторинга упругого момента главной линии клети прокатного стана / В.Р. Храмшин, С.А. Евдокимов, О.А. Гасиярова, А.С. Карандаев, Б.М. Логинов // Электротехнические системы и комплексы. 2022. № 3(56). С. 70-79. https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-3(56)-70-79

Khramshin V.R., Evdokimov S.A., Gasiyarova O.A., Loginov B.M., Karandaev A.S. Feasibility Study of the Elastic Moment Telemetric Monitoring System at the Main Line Rolling Stand . *Elektrotekhnicheskie sistemy i kompleksy* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2022, no. 3(56), pp. 70-79. (In Russian). https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-3(56)-70-79

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Афлятунов Радмир Рифович – ассистент, кафедра электротехники и электрооборудования предприятий, Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия, Radmir.afl@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0003-0772-2519

Васильев Петр Игоревич – ассистент, кафедра электротехники и электрооборудования предприятий, Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия, Petrvasilyev17@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-4961-9149

Верзунов Сергей Николаевич – канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник, лаборатория информационно-измерительных систем, Институт машиноведения и автоматики Национальной академии наук Кыргызской Республики, Бишкек, Кыргызская Республика, verzunov@hotmail.com, https://orcid.org/0000-0003-3130-2776

Гасиярова Ольга Андреевна – инженер-конструктор, ООО НПП «Учтех-Профи», Челябинск, Россия.

Гилемов Ильдар Галиевич – аспирант, кафедра автоматизированного электропривода и мехатроники, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия, gilemov.ig@outlook.com, https://orcid.org/0000-0002-2481-3378

Губин Павел Юрьевич – ассистент, кафедра автоматизированных электрических систем, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия, my@gubinpy.ru, https://orcid.org/0000-0002-3736-652X

Евдокимов Сергей Алексеевич – канд. техн. наук, доцент, кафедра электроники и микроэлектроники, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.

Ерохин Петр Михайлович – д-р техн. наук, профессор, профессор исследователь, кафедра автоматизированных электрических систем, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия, petr_erohin@bk.ru

Карандаев Александр Сергеевич – д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник, Южно-Уральский государственный университет (НИУ), Челябинск, Россия, askaran@mail.ru

Линьков Сергей Александрович – канд. техн. наук, доцент, кафедра автоматизированного электропривода и мехатроники, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия, xx_linkov@rambler.ru, https://orcid.org/0000-0002-0774-3910

Логинов Борис Михайлович – канд. техн. наук, магистрант, кафедра мехатроники и автоматизации, Южно-Уральский государственный университет (НИУ), Челябинск, Россия, lb18@yandex.ru.

Лымарь Алексей Борисович – старший преподаватель, кафедра автоматизированного электропривода и мехатроники, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия, lymar.alexei@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-2783-3662

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

Мухлынин Никита Дмитриевич – канд. техн. наук, доцент, кафедра автоматизированных электрических систем, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия, nd.mukhlynin@urfu.ru, https://orcid.org/0000-0002-2065-3231

Николаев Александр Аркадьевич – канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой, кафедра автоматизированного электропривода и мехатроники, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия, aa.nikolaev@magtu.ru, https://orcid.org/0000-0001-5014-4852

Омельченко Евгений Яковлевич – д-р техн. наук, профессор, кафедра автоматизированного электропривода и мехатроники, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия, Momentum2@yandex.ru

Паздерин Андрей Владимирович – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой, кафедра автоматизированных электрических систем, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия, a.v.pazderin@urfu.ru, https://orcid.org/0000-0003-4826-2387

Радионов Андрей Александрович – д-р техн. наук, профессор, кафедра автоматика и управление, Московский политехнический университет, Москва, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия, radionov.mail@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-3914-4429

Светлаков Максим Сергеевич – студент, кафедра автоматизированного электропривода и мехатроники, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия, smsko987@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-7288-8262

Танич Василий Олегович – доцент, кафедра автоматизированного электропривода и мехатроники, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия, Shift-91@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-0098-6431

Тащилин Валерий Александрович – канд. техн. наук, доцент, ведущий инженер, доцент, кафедра автоматизированных электрических систем, Уральский федеральный университет имени первого Президента России

Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия, v.a.tashchilin@urfu.ru, https://orcid.org/0000-0001-8763-3705

Хазиева Регина Тагировна – доцент, кафедра электротехники и электрооборудования предприятий, Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия, khazievart@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-7075-0363

Храмшин Вадим Рифхатович – д-р техн. наук, профессор, кафедра электроснабжения промышленных предприятий, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия, hvrmgn@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-0972-2803

Цзин Тао – канд. техн. наук, преподаватель, факультет механики и электротехники, Китайский университет Цзиляна, Ханчжоу, Провинция Чжэцзян, Китай, jingtao19940214@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-1371-1031

Шакиров Михаил Маратович – магистрант, кафедра автоматизированных электрических систем, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия, m.m.shakirov@inbox.ru, https://orcid.org/0000-0002-8192-8112

Уважаемые коллеги!

Приглашаем Вас опубликовать статьи в журнале «*Электротехнические системы и комплексы*».

Журнал «Электротехнические системы и комплексы» основан в 1996 году на базе международного сборника научных трудов, в котором публиковались статьи студентов, аспирантов и ученых, как из России, так и из-за рубежа. Начиная с 2014 года «Электротехнические системы и комплексы» выпускается как журнал с периодичностью четыре номера в год.

С февраля 2016 г. 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.

Журнал публикует работы по следующим научным специальностям:

1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки);

2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации (технические);

2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические науки);

2.4.1. Теоретическая и прикладная электротехника (технические науки);

2.4.2. Электротехнические комплексы и системы (технические науки);

2.4.3. Электроэнергетика (технические науки);

2.4.4. Электротехнология и электрофизика (технические науки).

Журнал публикует научные работы по следующим рубрикам:

- теория и практика автоматизированного электропривода;
- электро- и теплоэнергетика;
- электроснабжение;
- энерго- и ресурсосбережение;
- промышленная электроника, автоматика и системы управления;
- электротехнологии в промышленности;
- информационное, математическое и программное обеспечение технических систем;
- мониторинг, контроль и диагностика электрооборудования.

Публикация статей является бесплатной.

Статьи, направленные в адрес журнала, проходят обязательное научное рецензирование и редактирование. Несоответствие материалов требованиям к статьям может служить поводом для отказа в публикации.

Статья должна быть набрана в шаблоне, который размещен на сайте журнала esik.magtu.ru в разделе «Руководство для авторов». Там же находится инструкция по его заполнению, в которой приведены требования к оформлению статей.

Авторы статьи должны гарантировать, что их работа публикуется впервые. Если элементы рукописи ранее были опубликованы в другой работе (статье, монографии, автореферате и т.д.), в том числе на другом языке, авторы обязаны сослаться на более раннюю работу. При этом они обязаны указать, в чем существенное отличие новой работы от предыдущей и, вместе с тем, выявить ее связь с результатами исследований и выводами, представленными в предыдущей работе. Дословное копирование собственных работ или ее элементов более чем на 30 % и их перефразирование не приемлемы!

Пакет подаваемых документов (отправляется по электронной почте ecis.red@gmail.com):

- рукопись, оформленная в соответствии с приведенными ниже требованиями;
- анкета (в электронном виде);
- экспертное заключение о возможности опубликования;
- лицензионный договор, подписанный одним автором от коллектива в двух экземплярах;
- согласие на обработку персональных данных на каждого автора.