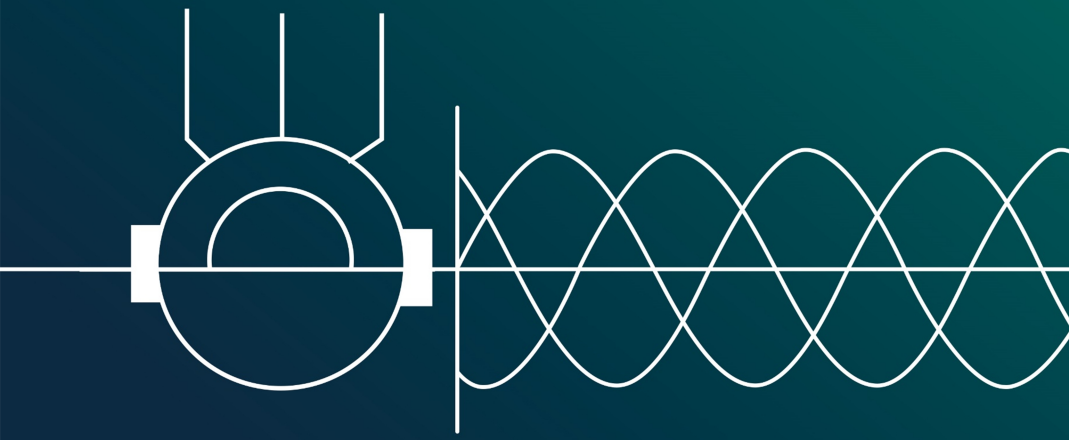
ЭлСиК

ISSN 2311-8318
ISSN (online) 2658-3151

ЭЛЕКТРО-ТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

№ 2(55)
2022 г.



Электротехнические системы и комплексы

Издается с января 1996 г. № 2(55), Июнь 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,
МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, 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 28.06.2022. Заказ 171. Тираж 500 экз.
Цена свободная.

ELECTROTECHNICAL SYSTEMS AND COMPLEXES

PUBLISHED SINCE JAN., 1996 NO. 2(55), JUNE, 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), NMSTU, Magnitogorsk, 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: 28.06.2022. Order 171. Circulation: 500.
Open price.

СОДЕРЖАНИЕ

Теория и практика автоматизированного электропривода **4**

Соловьев В.А., Дубовик М.Е.
Электропривод на базе машины двойного питания с улучшенными энергетическими характеристиками 4

Чуприна Н.В., Пугачев А.А.
Моделирование системы векторного управления тяговым синхронным двигателем с постоянными магнитами 10

Сенцов Е.В., Мещеряков В.Н.
Создание нейросетевого наблюдателя скорости для повышения динамической стабильности системы векторного бездатчикового управления 18

Букреев В.Г., Шандарова Е.Б., Быстров Е.А., Перевощиков Ф.В.
Верификация модели прототипа асинхронного электропривода специального насосного агрегата 25

Промышленная электроника, автоматика и системы управления **32**

Черный С.П., Соловьев В.А., Бузикаева А.В., Сухоруков С.И.
Один из подходов к моделированию двухкаскадной нечеткой системы управления электроприводом постоянного тока с двухзонным регулированием скорости 32

Парсункин Б.Н., Андреев С.М., Сухоносова Т.Г.
Адаптивное поисково-динамическое управление подачей природного газа в дутье доменной печи 40

Электро- и теплоэнергетика **47**

Валиев Р.Т., Ерохин П.М., Паздерин А.В.
Обзор методов динамической визуализации состояния электроэнергетических систем на основе синхронизированных векторных измерений 47

Электроснабжение **55**

Корнилов Г.П., Газизова О.В., Абдулвелеев И.Р., Лыгин М.М., Бочкарев А.А.
Повышение энергетической эффективности заводских электростанций металлургических предприятий 55

Мониторинг, контроль и диагностика электрооборудования **62**

Королёв Н.А., Жуковский Ю.Л., Котелева Н.И.
Наблюдатель состояния подшипников асинхронного двигателя по компонентам векторов Парка тока и напряжения 62

Краткие сообщения **71**

Варганова А.В., Новоселов В.И.
Алгоритм поиска оптимальной точки подключения к внешним источникам электроэнергии в системах электроснабжения с распределенной генерацией 71

Панова Е.А., Сабирова Р.Р., Новиков И.В.
Комбинированная схема замещения двухцепной ЛЭП с двумя грозотросами 77

Сведения об авторах **82**

CONTENT

Theory and Practice of Automated Electric Drive **4**

Solovyev V.A., Dubovik M.E.
Electric Drive Based on Dual-Power Machines with Improved Energy Characteristics 4

Chuprina N.V., Pugachev A.A.
Simulation of Traction Permanent Magnet Synchronous Motor Vector Control System 10

Sentsov E.V., Meshcheryakov V.N.
Neural Network Speed Observer Development to Improve the Dynamic Stability of a Sensorless Vector Control System 18

Bukreev V.G., Shandarova E.B., Bystrov E.A., Perevoshchikov F.V.
Verification of Induction Motor Drive Prototype Model for Special Pumping Unit 25

Power Electronics, Automation and Control Systems **32**

Cherniy S.P. Solovyev V.A., Buzikaeva A.V., Sukhorukov S.I.
Approach to Simulation of Two-Stage Fuzzy DC Drive Control System with Two-Zone Speed Control 32

Parsunkin B.N., Andreev S.M., Sukhonosova T.G.
Adaptive Search-Dynamic Control of Natural Gas Supply in Blast Furnace 40

Power Engineering **47**

Valiev R.T., Erokhin P.M., Pazderin A.V.
Dynamic Visualization Methods of Electric Power System State Based on Synchronized Vector Measurements 47

Electric Power Supply **55**

Kornilov G.P., Gazizova O.V., Abdulveleev I.R., Lygin M.M., Bochkarev A.A.
Improving the Energy Efficiency of Industrial Power Plants at Metallurgical Enterprises 55

Monitoring, Diagnostics and Control of Electric Equipment **62**

Korolev N.A., Zhukovski Yu.L., Koteleva N.I.
Bearing State Monitoring Device for an Asynchronous Motor by the Current and Voltage Park Vector Components 62

Brief Communication **71**

Varganova A.V., Novoselov V.I
Algorithm for Searching the Optimal Point of Connection to External Power Sources in Distributed Generation Power Supply Systems 71

Panova E.A., Sabirova R.R., Novikov I.V.
Combined Equivalent Circuit of a Double-Circuit Power Transmission Line with Two Lightning Cables 77

Information About the Authors **82**

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

УДК 62-523.2 https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-2(55)-4-9

Соловьев В.А., Дубовик М.Е.

Комсомольский-на-Амуре государственный университет

ЭЛЕКТРОПРИВОД НА БАЗЕ МАШИНЫ ДВОЙНОГО ПИТАНИЯ С УЛУЧШЕННЫМИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

Одним из приоритетных направлений в развитии энергетики является повышение энергоэффективности в электротехнических системах, в частности в электроприводах переменного тока. Повышение коэффициента полезного действия, а также уменьшение массогабаритных показателей систем электроприводов высокой мощности приводит к значительному сокращению капитальных затрат. На сегодняшний день ведется множество исследований и разработок систем энергоэффективных электроприводов. В статье предлагается альтернативный способ реализации электропривода переменного тока на базе машины двойного питания (МДП) с непосредственным преобразователем частоты (НПЧ). Наличие второго канала управления в МДП позволяет расширить функциональные возможности при управлении электроприводом. Цель исследования состоит в оценке энергоэффективности НПЧ на базе трансформатора с вращающимся магнитным полем (ТВМП) при его использовании в рассматриваемом электроприводе. В статье приведено описание основных элементов рассматриваемого электропривода, обосновано решение по использованию альтернативного варианта реализации преобразователя частоты на базе НПЧ и ШИМ-преобразователя с промежуточным звеном. Авторами статьи предложена и рассмотрена возможность использования ТВМП в качестве такого промежуточного звена. При составлении математического описания ТВМП были использованы основные методы теории дифференциальных уравнений. Представлена функциональная схема такого электропривода, на основе которой построена имитационная модель в *Simulink*. Для сравнительного анализа выполнено моделирование системы управления с трехфазным НПЧ и системы с НПЧ на базе ТВМП. По результатам моделирования проведен гармонический анализ выходного напряжения преобразователя частоты. В заключении представлены основные преимущества такого электропривода над классическими вариантами.

Ключевые слова: машина двойного питания, непосредственный преобразователь частоты, широтно-импульсная модуляция, трансформатор с вращающимся магнитным полем, гармонический анализ.

ВВЕДЕНИЕ

Современные известные системы электроприводов переменного тока сконструированы для широкого спектра выполняемых задач и сильно различаются как по целевому применению, так и по своему исполнению. Под исполнением подразумеваются особенности конструкции системы электропривода и входящие в нее элементы. На сегодняшний день одним из основных видов регулируемого электропривода является электропривод по системе преобразователь частоты – двигатель. Ее широкое применение обусловлено относительно широким диапазоном и высокой точностью регулирования [1, 2]. Однако такой электропривод обладает существенными недостатками. Наличие промежуточного звена постоянного тока приводит к увеличению массогабаритных показателей системы, а двукратное преобразование энергии приводит к снижению КПД такого преобразователя [3]. Кроме того реализация таких систем электропривода на большую мощность связана с использованием высоковольтных ПЧ, а это дополнительно приводит к увеличению массогабаритных показателей, снижению надежности и увеличению стоимости таких систем.

Ослабить вышеперечисленные недостатки возможно, если в качестве приводного двигателя использовать машину двойного питания (МДП). Данное решение обосновано тем, что использование машины двойного питания целесообразно в приводах высокой мощности с относительно небольшим диапазоном регулирования. Примеры такого использования описаны в электроприводах с машиной двойного питания в судовых валогенераторных установках и генераторных подстанциях [4]. Отличительная особенность МДП состоит в том, что при ее управлении могут быть использованы два канала регулирования: первый – по цепи статора, второй – по цепи ротора. На **рис. 1** приведена функциональная схема электропривода на базе МДП [5, 6].

На **рис. 1** обозначены: ДН1, ДН2 – датчики напряжений статора и ротора; ДТ1, ДТ2 – датчики тока в цепи статора и ротора; 1 – машина двойного питания; Т – согласующий трансформатор; ЗДС – задатчик скорости; ДС – датчик скорости; ДТФ – датчик тригонометрических функций угла изображающего вектора напряжения системы; РУ – регулирующее устройство; ПЧ – преобразователь частоты; К1 – ключ, переключающий синхронный и асинхронный режимы работы.

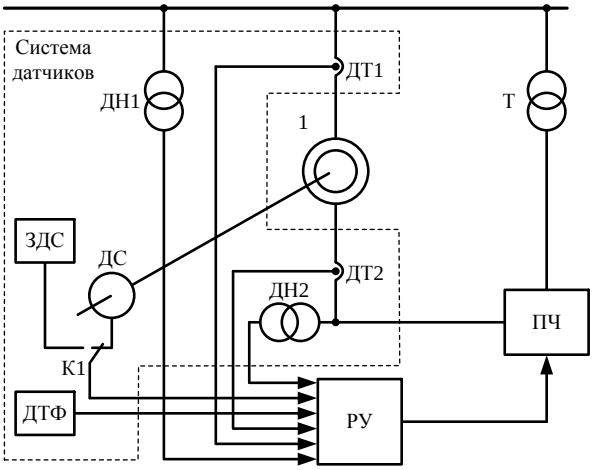


Рис. 1. Функциональная схема электропривода на базе МДП

© Соловьев В.А., Дубовик М.Е., 2022

Для любой электрической машины нормальный установившийся режим существует в том случае, если магнитные потоки, созданные статорными и роторными токами, оказываются в пространстве взаимно неподвижными при произвольном значении угловой скорости ротора [3]. Из этого условия следует также, что МДС, создающие указанные магнитные потоки или изображающие векторы токов и напряжений статора и ротора, также должны быть взаимно неподвижными. Данное условие записывается следующим образом:

$$\omega = \omega_f \pm \omega_r, \quad (1)$$

где ω_f – частота напряжения статора; ω_r – частота напряжения ротора; ω – угловая скорость вращения ротора.

Поскольку скорость вращения ротора МДП пропорциональна алгебраической сумме частот напряжений статора и ротора, то данное техническое решение позволяет в высокомощном электроприводе с небольшим диапазоном регулирования использовать ПЧ невысокого напряжения, в силу того что у двигателей высокого напряжения (от 6 кВ) напряжение на роторе намного ниже такового на статоре. Это, в свою очередь, приводит к уменьшению капитальных затрат.

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЧАСТОТЫ

Как уже было выше отмечено, классические преобразователи частоты с промежуточным звеном обладают относительно низким КПД и большими массогабаритными показателями [3]. Учитывая, что применение МДП целесообразно в первую очередь для высокомощных электроприводов с невысоким диапазоном регулирования, то в качестве регулируемого преобразователя эффективнее использовать непосредственный преобразователь частоты. Из-за однократного преобразования энергии НПЧ обладают высоким КПД, а отсутствие промежуточного звена снижает их стоимость и массогабаритные показатели. Помимо этого, достоинствами НПЧ является возможность автономного регулирования напряжения и тока, а коммутация силовых ключей может осуществляться естественным путем [7].

Стоит отметить, что основным недостатком НПЧ остается искаженная форма выходного напряжения из-за высокого содержания в ней гармоник высшего порядка. Это приводит к дополнительным потерям энергии, ударным нагрузкам на валу двигателя и перенапряжениям в электрических цепях с управляющими элементами. Такая форма напряжения обусловлена тем, что НПЧ ее формирует непосредственно из участков синусоид напряжения сети.

Известно, что коэффициент гармоник становится тем выше, чем выше частота выходного напряжения НПЧ по отношению к частоте напряжения сети и чем меньше фазность преобразователя [3, 7]. В связи с этим для ослабления вышеуказанного недостатка авторами предложено использовать вместо трехфазного НПЧ многофазный. Это решение позволит уменьшить содержание вредных гармоник и тем самым улучшит форму выходного напряжения.

К ВОПРОСУ О ВЫБОРЕ ТРАНСФОРМАТОРА

Использование многофазного НПЧ возможно с наличием источника многофазного напряжения. На **рис. 1** между сетью и ПЧ расположен согласующий трансформатор Т, который является трехфазным источником питания для преобразователя. Данную проблему можно решить, если вместо классического трехфазного трансформатора использовать многофазный трансформатор с вращающимся магнитным полем (ТВМП).

При этом в качестве источника переменного напряжения первичной цепи ТВМП можно использовать источник постоянного напряжения с управляемым коммутатором. Это позволяет исключить привязку к трехфазной сети переменного тока, уменьшить массогабаритные показатели первичной цепи ТВМП и расширить функциональные возможности при формировании входного напряжения. В качестве примера на **рис. 2** приведена схема двухфазно-пятифазного ТВМП. Источником питания для такого ТВМП может выступать ШИМ-преобразователь. Схема такого подключения изображена на **рис. 2**.

Выбор нестандартного количества фаз вторичного напряжения ТВМ связано с демонстрацией возможности построения НПЧ с ТВМП на любое произвольное количество фаз и оценкой влияния нестандартного количества фаз на уровень высших гармоник выходного напряжения.

Принцип работы такой системы заключается в следующем. Входы ШИМ-преобразователя 3 и 4 подключаются к источнику постоянного напряжения. Первая (положительная группа) 1 (ключи 5-8) и вторая (отрицательная) группа 2 (ключи 9-12) работают последовательно в выпрямительном и инверторном режимах и формируют двухфазное переменное напряжения. Фазы этого напряжения со сдвигом в 90° подаются на первичные обмотки ТВМП 13 и 14, тем самым формируя вращающееся магнитное поле в магнитопроводе 15. Это поле, в свою очередь, формирует на выходе ТВМП в каждой обмотке *A, B, C, D, E* переменное напряжение той же частоты, сдвинутое на угол $\varphi = 360°/5 = 72°$. К выходам *A, B, C, D, E* может быть подключен пятифазный НПЧ.

Решение по реализации системы управления с использованием ТВМП может расширить функциональные возможности электропривода, поскольку появляется дополнительный канал регулирования на входе ТВМП.

Несмотря на то, что использование ТВМП в электроприводах широко не распространено, работы по конструированию и исследованию ТВМП известны за рубежом [8, 9].

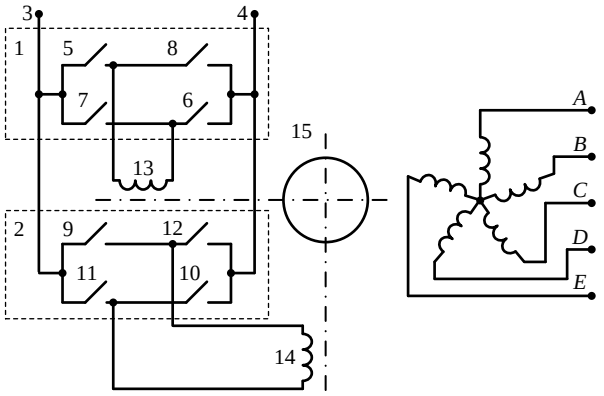


Рис. 2. Схема подключения ТВМП

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ТВМП

Система уравнений (2), отражающая основные электрофизические процессы в ТВМП, основывается на уравнениях электрического баланса напряжений в контурах первичных и вторичных обмоток трансформатора. Конечный расчет необходимых параметров для дальнейшего использования такого математического описания сводится к расчету взаимных и собственных индуктивностей между обмотками ТВМП.

$$
\begin{cases}
U_1 = r_1' i_1' + L_{11}' \dfrac{di_1'}{dt} + L_{12}' \dfrac{di_2'}{dt} + M_{11} \dfrac{di_1''}{dt} + \\
+M_{12} \dfrac{di_2''}{dt} + M_{13} \dfrac{di_3''}{dt} + M_{14} \dfrac{di_4''}{dt} + M_{15} \dfrac{di_5''}{dt}; \\
U_2 = r_2' i_2' + L_{21}' \dfrac{di_1'}{dt} + L'_{22} \dfrac{di_2'}{dt} + M_{21} \dfrac{di_1''}{dt} + \\
+M_{22} \dfrac{di_2''}{dt} + M_{23} \dfrac{di_3''}{dt} + M_{24} \dfrac{di_4''}{dt} + M_{25} \dfrac{di_5''}{dt}; \\
-R_1 i_1'' = r_1'' i_1'' + L_{11}'' \dfrac{di_1''}{dt} + L_{12}'' \dfrac{d_2''}{dt} + L_{13}'' \dfrac{di_3''}{dt} + \\
+L_{14}'' \dfrac{di_4''}{dt} + L_{15}'' \dfrac{di_5''}{dt} + M_{11} \dfrac{di_1'}{dt} + M_{21} \dfrac{di_2'}{dt}; \\
-R_2 i_2'' = r_2'' i_2'' + L_{21}'' \dfrac{di_1''}{dt} + L_{22}'' \dfrac{di_2''}{dt} + L_{23}'' \dfrac{di_3''}{dt} + \\
+L_{24}'' \dfrac{di_4''}{dt} + L_{25}'' \dfrac{di_5''}{dt} + M_{12} \dfrac{di_1'}{dt} + M_{22} \dfrac{di_2'}{dt}; \\
-R_3 i_3'' = r_3'' i_3'' + L_{31}'' \dfrac{di_1''}{dt} + L_{32}'' \dfrac{di_2''}{dt} + L_{33}'' \dfrac{di_3''}{dt} + \\
+L_{34}'' \dfrac{di_4''}{dt} + L_{35}'' \dfrac{di_5''}{dt} + M_{13} \dfrac{di_1'}{dt} + M_{23} \dfrac{di_2'}{dt}; \\
-R_4 i_4'' = r_4'' i_4'' + L_{41}'' \dfrac{di_1''}{dt} + L_{42}'' \dfrac{di_2''}{dt} + L_{43}'' \dfrac{di_3''}{dt} + \\
+L_{44}'' \dfrac{di_4''}{dt} + L_{45}'' \dfrac{di_5''}{dt} + M_{14} \dfrac{di_1'}{dt} + M_{24} \dfrac{di_2'}{dt}; \\
-R_5 i_5'' = r_5'' i_5'' + L_{51}'' \dfrac{di_1''}{dt} + L_{52}'' \dfrac{di_2''}{dt} + L_{53}'' \dfrac{di_3''}{dt} + \\
+L_{54}'' \dfrac{di_4''}{dt} + L_{55}'' \dfrac{di_5''}{dt} + M_{15} \dfrac{di_1'}{dt} + M_{25} \dfrac{di_2'}{dt}.
\end{cases}
\qquad (2)
$$

В системе (2) обозначены величины: $L'_{11},\ldots, L'_{22}$ – взаимные индуктивности между первичными обмотками, здесь цифрами в индексе указаны номера соответствующих первичных обмоток, поэтому $L'_{12},\ldots, L'_{21}$ и т.д.; $M_{11},\ldots, M_{25}$ – взаимные индуктивности между первичными и вторичными обмотками, здесь первая цифра в индексе – номер первичной обмотки, а вторая цифра – номер вторичной обмотки, поэтому $M_{12} \neq M_{21}$; $L''_{11},\ldots, L''_{55}$ – взаимные индуктивности между вторичными обмотками, причем $L''_{12} = L''_{21}$ и т.д.; U_1, U_2 – напряжения, прикладываемые к первичным обмоткам; r'_1, r'_2, $r''_1,\ldots, r''_5$ – активные сопротивления первичных и вторичных обмоток соответственно; $R_1,\ldots, R_5$ – активные сопротивления нагрузки на вторичных обмотках; i'_1, i'_2, $i''_1,\ldots, i''_5$ – токи первичных и вторичных обмоток соответственно.

Расчет индуктивностей ТВМП можно осуществить теоретическими методами, представленными в источнике [10]. Для этих расчетов должны быть известны геометрические размеры и электрофизические параметры сердечника и обмоток трансформатора. Далее на основе расчетных данных можно составить имитационную модель в среде *Simulink* и использовать для дальнейшего исследования.

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Имитационная модель системы управления включает в себя три основных звена – ШИМ-преобразователь, двухфазно-пятифазный ТВМП и пятифазный НПЧ. ШИМ-преобразователь, модель которого представлена на **рис. 3**, реализован на полностью управляемых ключах *T*'1-*T*'4. Управляющие импульсы формируются блоком *pulse_shaper*_1. На **рис. 3** приведена модель 1 группы ключей. Управление ключами осуществляется по традиционному методу пересечения треугольного и синусоидального сигналов управления. Выходное напряжение ШИМ-преобразователя представлено на **рис. 4**.

Ограничение вычислительной возможности при компьютерном моделировании системы управления обусловило использовать масштабирование по частоте. В связи с этим моделирование результатов было осуществлено при частотах напряжения в 10 раз меньше – 5 Гц на входе НПЧ и 2,5 Гц на выходе НПЧ. Таким образом, частота вращения магнитного поля ТВМП равна также 5 Гц.

Выходное напряжение ШИМ-преобразователя 5 Гц поступает на вход первичных обмоток ТВМП и формирует вращающееся магнитное поле. Модель ТВМП (**рис. 5**) включает в себя датчики напряжений, подключенные к фазам вторичных обмоток трансформатора. Первичные обмотки трансформатора обозначены 1 и 2, вторичные обмотки – *A, B, C, D, E*. Датчики напряжений *U*1, *U*2, *UA, UB, UC, UD, UE* и токов *I*1, *I*2, *IA, IB, IC, ID, IE* измеряют мгновенные значения токов и напряжений первичных и вторичных обмоток ТВМП. Это позволяет исследовать вольт-амперные характеристики трансформатора при нагрузочном и холостом режимах. Расчетные значения индуктивностей внесены в блок *TWMP_MR*.

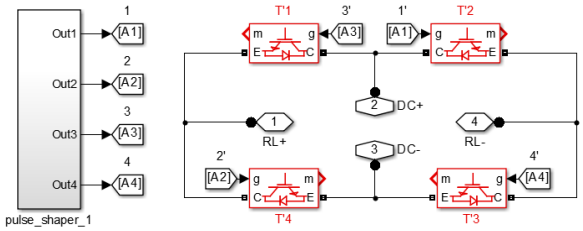


Рис. 3. Имитационная модель ШИМ-преобразователя

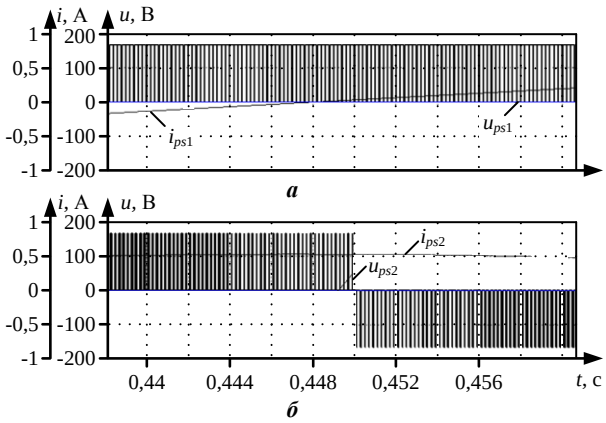


Рис. 4. Осциллограммы тока и напряжения на выходе ШИМ-преобразователя: а – для первой обмотки ТВМП; б – для второй обмотки ТВМП (u_{ps1} – напряжение первой фазы, u_{ps2} – напряжение второй фазы, i_{ps1} – ток первой фазы, i_{ps2} – ток второй фазы)

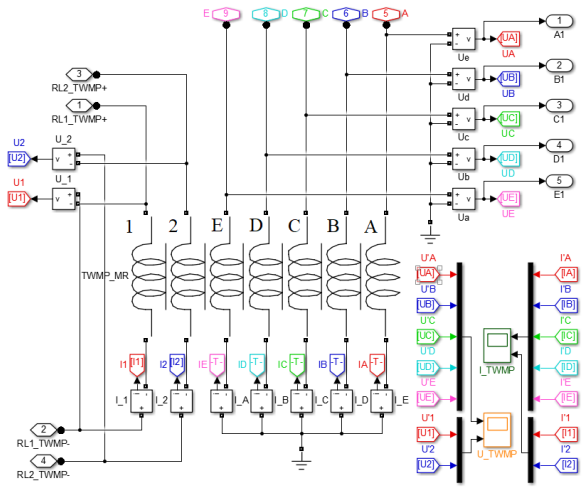


Рис. 5. Имитационная модель ТВМП

Выходы вторичных обмоток *A*, *B*, *C*, *D*, *E* подключаются к входам модели НПЧ, представленной на **рис. 6**. Вышеприведенная общая модель НПЧ состоит из трех пятифазных НПЧ, представленных в каждом блоке отдельно и подключенных к общему выходу ТВМП (7-11). Каждый из блоков (5*fv*2-1, 5*fv*2-2, 5*fv*2-3) представляет пятифазный НПЧ, формирующий одну фазу синусоидального напряжения.

Модель пятифазного НПЧ представлена на **рис. 7** и отображает внутреннюю структуру блоков 5*fv*2-1, 5*fv*2-2, 5*fv*2-3. В каждом из трех таких блоков формируемое выходное синусоидальное напряжение сдвинуто на 120° относительно выходных напряжений других блоков. Таким образом, на выходах *A*+, *A*-, *B*+, *B*-, *C*+, *C*- комплексного пятифазно-трехфазного НПЧ (см. **рис. 6**) формируется трехфазное синусоидальное напряжение. Выходы такого пятифазно-трехфазного НПЧ подключаются к роторной трехфазной цепи МДП.

Исследование системы управления ШИМ-ТВМП-НПЧ осуществлялось на активно-индуктивную нагрузку непосредственным образом без применения емкостных фильтров. Это позволяет качественно провести гармонический анализ выходных напряжений трансформатора и НПЧ.

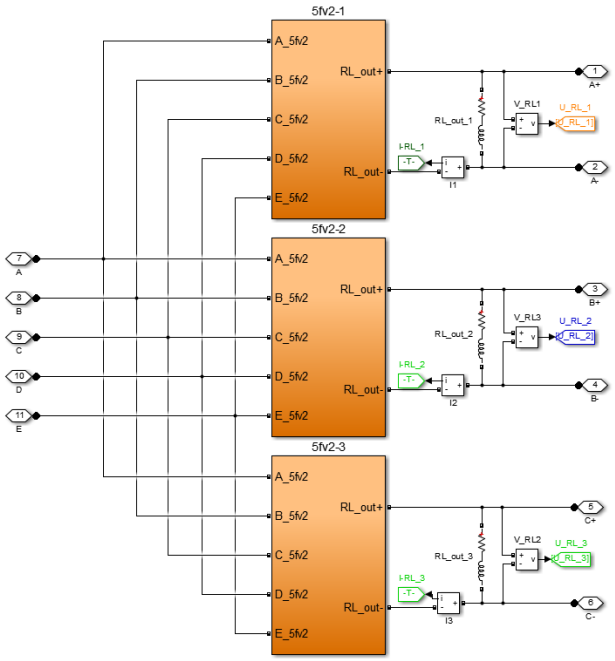


Рис. 6. Имитационная общая модель НПЧ

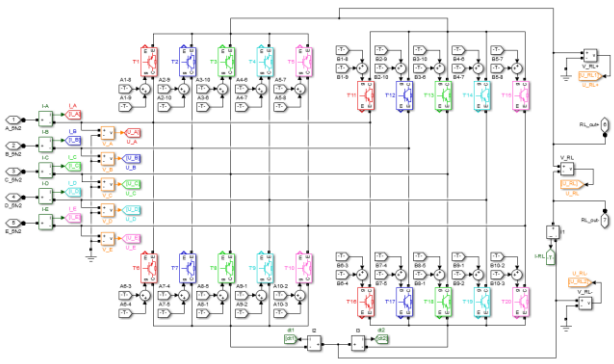


Рис. 7. Имитационная модель пятифазного НПЧ

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Сравнительный гармонический анализ выходного напряжения осуществлялся между двумя системами. Первая система включает в себя пятифазно-трехфазный НПЧ, вход которого подключен к выходам двухфазно-трехфазного ТВМП, подключенного к сети постоянного напряжения через ШИМ-преобразователь (ШИМ-ТВМП-НПЧ). Вторая система – классическая, с использованием трехфазного НПЧ при питании от классического трехфазного трансформатора по системе (Т-НПЧ).

Следует отметить, что частота выходного напряжения НПЧ ограничивается на уровне 40% от частоты входного напряжения. При моделировании был взят уровень 50%, чтобы оценить стабильность работы исследуемой системы. На **рис. 8** и **9** представлены осциллограммы токов и напряжений для первой и второй систем.

На **рис. 8** и **9** обозначены u_A, u_B, u_C и i_A, i_B, i_C – выходные напряжения с блоков 5*fv*2-1, 5*fv*2-2, 5*fv*2-3 соответственно. Имитационная модель трехфазного НПЧ составлена аналогичным образом в виде трех блоков и классического трехфазного трансформатора. Гармонический анализ полученных результатов представлен в **табл. 1** и **2**.

За базовую гармонику взята гармоника питающего напряжения с частотой 2,5 Гц. Под уровнем гармоник подразумевается отношение амплитуды текущей гармоники к амплитуде базовой гармоники, выраженное в процентах. Фазовый сдвиг показывает сдвиг между текущей гармоникой и базовой.

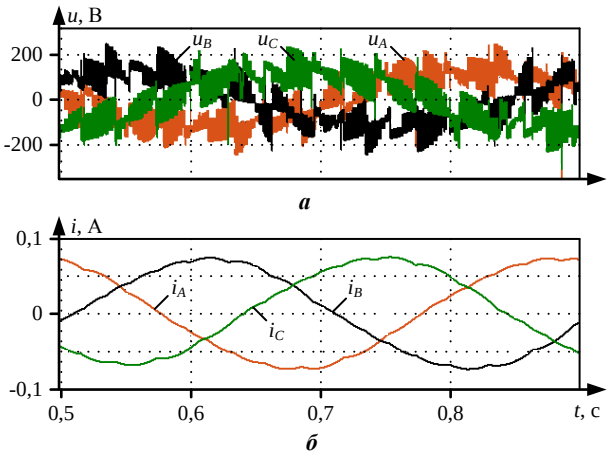


Рис. 8. Осциллограммы выходных токов и напряжений пятифазно-трехфазного НПЧ

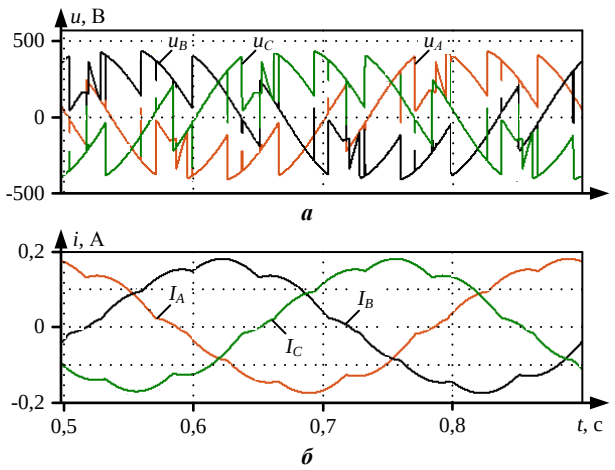


Рис. 9. Осциллограммы выходных токов и напряжений трехфазного НПЧ

Таблица 1

Результаты гармонического анализа кривой выходного напряжения u_A трехфазного НПЧ

Номер гармоники	Частота гармоники, Гц	Уровень гармоники по отношению к базовой, %	Фазовый сдвиг, град
0	0	0,01	270
1	2,5	100,00	69,7
2	5	0,01	-56,5
3	7,5	2,48	229,8
4	10	0,02	-66,1
5	12,5	4,52	208,7
6	15	0,02	-76,9
7	17,5	22,84	-27,4
8	20	0,01	259,5
9	22,5	27,74	113,4
10	25	0,00	76,7

Таблица 2

Результаты гармонического анализа кривой выходного напряжения u_A пятифазного НПЧ

Номер гармоники	Частота гармоники, Гц	Уровень гармоники по отношению к базовой, %	Фазовый сдвиг, град
0	0	0,01	270
1	2,5	100,00	69,7
2	5	0,13	-56,5
3	7,5	6,3	229,8
4	10	0,07	-66,1
5	12,5	1,52	208,7
6	15	0,04	-76,9
7	17,5	1,57	-27,4
8	20	0,04	259,5
9	22,5	2,14	113,4
10	25	0,05	76,7

Гармонический анализ результатов моделирования показывает, что для системы с пятифазным НПЧ уровень третьей гармоники кривой выходного напряжения в два с половиной раза выше, чем у системы с трехфазным НПЧ. Однако у трехфазного НПЧ наблюдается высокий уровень 5, 7, 9-й гармоник – 4,5, 23, 28% соответственно от базового уровня. В то время как уровень гармоник того же порядка у пятифазного НПЧ многократно ниже.

Коэффициент гармоник для системы с классическим трехфазным трансформатором и трехфазным НПЧ, рассчитанный на основании экспериментальных данных (см. **табл. 1**), равен $K_Г$ = 0,36. Коэффициент гармоник для системы с ТВМП и пятифазным НПЧ, рассчитанный на основании экспериментальных данных (см. **табл. 2**), равен $K_Г$ = 0,07.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании вышеизложенного можно утверждать, что использование НПЧ на базе ТВМП позволит:

– снизить массогабаритные показатели электропривода;

– расширить диапазон частот выходного напряжения НПЧ;

– обеспечить двусторонний свободный обмен энергии между источником питания и роторной цепью;

– снизить коэффициент гармоник выходного напряжения НПЧ, что скажется на улучшении энергетических показателей электропривода;

– путем выбора конкретной фазности вторичной цепи ТВМП воздействовать на уровень соответствующей гармоники кривой выходного напряжения НПЧ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Осипов О.И. Частотно-регулируемый асинхронный электропривод. М.: Издательство МЭИ, 2004. 80 с.
2. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. М.: Академия, 2006. 272 с.
3. Тиристорные преобразователи частоты в электроприводе / Бернштейн А.Я., Гусяцкий Ю.М., Кудрявцев А.В., Сарбатов Р.С. М.: Энергия, 1980. 328 с.
4. Хватов О.С., Тарпанов И.А., Кобяков Д.С. Дизель-генераторная электростанция с вентильным генератором по схеме машины двойного питания // Вестник Астраханского государственного технического университета. Морская техника и технология. 2020. № 3. С. 82-90. doi: 10.24143/2073-1574-2020-3-82-90
5. Шакарян Ю.Г. Асинхронизированные синхронные машины. М.: Энергоатомиздат, 1984. 192 с.
6. Ботвинник М.М., Шакарян Ю.Г. Управляемая машина переменного тока. М.: Наука, 1969. 140 с.
7. Фираго Б.И., Готовский Б.С., Лисс З.А. Тиристорные циклоконверторы. М.: Наука и техника, 1973. 296 с.
8. Pat. CN104103412A, IPC H01F27/08, H01F27/28. Polyphase transformer adopting rotating magnetic field principle / Yueliang Y., Zhou Y.; Shanghai wind new energy technology co ltd, applic. 01.04.13, public. 15.10.14, pp. 5.
9. Pat. CN108987080A, IPC H01F27/29; H01F38/18. Rotating magnetic field power transformer / Jiancheng B., Leitao S., Caixia W., Miao Z.; applic. 30.07.18, public. 11.12.18, pp. 7.
10. Цейтлин Л.А., Калатаров П.Л. Расчет индуктивностей. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1986. 488 с.

Поступила в редакцию 24 января 2022 г.

INFORMATION IN ENGLISH

ELECTRIC DRIVE BASED ON DUAL-POWER MACHINES WITH IMPROVED ENERGY CHARACTERISTICS

Vyacheslav A. Solovyev

D.Sc. (Engineering), Professor, Electric Drive and Automation of Industrial Installations Department, Komsomolsk-on-Amur State Technical University, Komsomolsk-on-Amur, Russia, epapu@knastu.ru, https://orcid.org/0000-0001-7930-0601

Mikhail E. Dubovik

Postgraduate student, Electric Drive and Automation of Industrial Installations Department, Komsomolsk-on-Amur State Technical University, Komsomolsk-on-Amur, Russia, mihail.dubovik@bk.ru, https://orcid.org/0000-0002-7092-1409

One of the priority directions in the development of power engineering is to increase energy efficiency in electrical systems, in particular, in AC electric drives. An increase in the efficiency coefficient as well as a decrease in the weight and size indicators of high-power electric drive systems lead to a significant reduction in capital costs. To date, a lot of research and development of energy-efficient electric drive systems is underway. The article suggests an alternative method of implementing an alternating current electric drive based on a dual-power machine (DPM) with a direct frequency converter (DFC). The article describes the main elements of the electric drive under consideration, justifies the decision to use an alternative implementation of a frequency converter based on an DFC and a PWM converter with an intermediate link. The authors proposed and considered the possibility of using a transformer with a rotating magnetic field (RMF) The article describes the main elements of the electric drive under consideration, justifies the decision to use an alternative implementation of a frequency converter based on an DFC and a PS converter with an intermediate link. The authors proposed and considered the possibility of using a transformer with a rotating magnetic field (RMF) as such an intermediate. A functional diagram of such an electric drive is presented, on the basis of which a simulation model is built in Simulink. For a comparative analysis, a control system simulation with a three-phase DFC and a system with a DFC based on RMF was performed. Based on the simulation results, a harmonic analysis of the output voltage of the frequency converter was carried out. In conclusion, the main advantages of such an electric drive over the classical variants are presented.

Keywords: dual power machine, amplitude of the rotor voltage vector, dynamic mode, dual power machine stability.

REFERENCES

1. Osipov O.I. *Chastotno-reguliruemyi asinkhronnyi elektroprivod* [Frequency-controlled asynchronous electric drive]. Moscow, Publishing house of MPEI, 2004. 80 p. (In Russian)
2. Sokolovsky G.G. *Elektroprivody peremennogo toka s chastotnym regulirovaniem* [Alternating current electric drives with frequency control]. Moscow, Academy Publ., 2006. 272 p. (In Russian)
3. Bernstein A.Ya., Gusyatsky Yu.M., Kudryavtsev A.V., Sarbatov R.S. *Tiristornye preobrazovateli chastoty v electroprivode* [Thyristor frequency converters in an electric drive]. Moscow, Energiya Pbl., 1980. 328 p. (In Russian)
4. Khvatov O.S., Tarpanov I.A., Kobyakov D.S. Diesel generator power plant with a valve generator according to the scheme of a dual-power machine. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Morskaya tekhnika i tekhnologiya* [Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Marine engineering and technology], 2020, no. 3, pp. 82-90. doi: 10.24143/2073-1574-2020-3-82-90 (In Russian)
5. Shakaryan Yu. G. *Asynkhronizirovannye sinkhronnye mashiny* [Asynchronous synchronous machines]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1984. 192 p. (In Russian)
6. Botvinnik M.M., ShakaryanYu.G. *Upravlyaemaya mashina peremennogo toka* [Controlled alternating current machine]. Moscow, Nauka Publ., 1969. 140 p. (In Russian)
7. Firago B.I., Gotovsky B.S., Liss Z.A. *Tiristornye tsiklokonvertory* [Thyristor cycloconverters]. Moscow, Science and Technology Publ., 1973. 296 p. (In Russian)
8. Yueliang Y., Zhou Y.; Polyphase transforme radopting rotating magnetic field principle. Pat. CN104103412A, IPCH01F27/08, H01F27/28.
9. Jiancheng B., Leitao S., Caixia W., Miao Z. Rotatingmag netic field power transformer. Pat. CN108987080A, IPC H01F27/29; H01F38/18.
10. Tseitlin L.A., Kalantarov P.L. *Raschet induktivnostey* [Calculation of inductances]. Leningrad, Energoatomizdat. Leningrad Publishing House, 1986. 488 p. (In Russian)

Соловьев В.А., Дубовик М.Е. Электропривод на базе машины двойного питания с улучшенными энергетическими характеристиками // Электротехнические системы и комплексы. 2022. № 2(55). С. 4-9. https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-2(55)-4-9

Solovyev V.A., Dubovik M.E. Electric Drive Based on Dual-Power Machines with Improved Energy Characteristics. *Elektrotekhnicheskie sistemy i kompleksy* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2022, no. 2(55), pp. 4-9. (In Russian). https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-2(55)-4-9

УДК 621.314.5 https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-2(55)-10-17

Чуприна Н.В., Пугачев А.А.

Брянский государственный технический университет

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ВЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЯГОВЫМ СИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

В последние годы в регулируемых электроприводах переменного тока наблюдается устойчивая тенденция к более широкому использованию разновидностей синхронных двигателей. Обзор отечественных и зарубежных исследований показал, что для тяговых электроприводов перспективным вариантом является синхронный двигатель с постоянными магнитами (СДПМ). Анализ систем управления показал, что наиболее целесообразным является применение системы векторного управления. В данной статье поставлена задача разработки математической модели электропривода с СДПМ и системой векторного управления для ее последующей реализации средствами программного комплекса *Matlab*. Для достижения поставленной задачи использованы методы теории электропривода, теории автоматического управления, аналитического и численного решения уравнений, компьютерного моделирования. На основании эквивалентной схемы замещения СДПМ и преобразований Парка-Горева синтезированы уравнения и структурные или функциональные схемы основных элементов электропривода с системой векторного управления. Показана значимость выбора расположения осей d и q после преобразования Парка-Горева. В силовом канале электропривода использован двухуровневый автономный инвертор частоты с алгоритмами пространственно-векторной модуляции. Проанализирована возможность интеграции системы векторного управления во внешний контур системы управления тягового электропривода рельсового подвижного состава, регулирующей скольжение или силу тяги. Подробно описана реализация электропривода, содержащего двигатель мощностью 133 кВт, с помощью элементов библиотеки *Simulink*; рассчитаны и приведены числовые значения параметров всех функциональных блоков, зависящих от типа применяемого двигателя. Приведены основные результаты моделирования переходных режимов, анализ которых показал адекватность разработанной модели. Установлено, что применение системы векторного управления СДПМ позволяет получить высокие быстродействие и точность регулирования момента и частоты вращения.

Ключевые слова: синхронный двигатель, постоянные магниты, система векторного управления, тяговый электропривод, эквивалентная схема замещения, преобразования Парка-Горева, моделирование.

ВВЕДЕНИЕ

Традиционно долгое время при разработке тяговых электроприводов для железнодорожного транспорта в качестве тяговых двигателей принимались двигатели постоянного тока (тепловозы ТЭМ18, 2ТЭ25К, 2ТЭ70 и др.; электровозы ЭП1, ЭП2К, 2ЭС4К, 2ЭС5К и др.), в последние полтора-два десятка лет на смену им постепенно стали приходить асинхронные двигатели (тепловозы 2ТЭ25А, 2ТЭ35А; электровозы 2ЭС5, ЭС10, ЭП10, ЭП20), что связано в первую очередь с лучшими эксплуатационными и массогабаритными показателями. Так, на пассажирском двухсистемном электровозе ЭП10 производства ООО «НЭВЗ» применяются асинхронные тяговые двигатели типа НТА-1200 с мощностью в продолжительном режиме 1170 кВт и массой 2350 кг; на пассажирском электровозе переменного тока ЭП1 используются тяговые двигатели постоянного тока типа НБ-520В с мощностью в продолжительном режиме 750 кВт и массой около 4288 кг [1]. При разности мощностей в 420 кВт, двигатель НТА-1200 имеет массу на 1938 кг меньше, чем двигатель НБ-520В. Меньшие массогабаритные показатели позволяют облегчить компоновку колесно-моторного блока локомотива.

Совершенствование работы электроприводов и улучшение их энергетических и тяговых характеристик проходит за счет разработки новых систем управления электроприводов и алгоритмов управления преобразователями электроэнергии [2, 3]. В большинстве систем управления основной принцип заключен в наиболее полном использовании магнитного потока тягового двигателя на каждой позиции контроллера машиниста при текущей частоте вращения и моменте сопротивления [4, 5]. Вместе с этим наблюдается приближение к пределу возможных вариантов оптимизации работы тяговых электроприводов с асинхронными двигателями, не говоря уже о двигателях постоянного тока.

В связи с этим становится актуальной задача использования новых типов двигателей для решения тяговых задач. Одним из наиболее перспективных вариантов является применение синхронных двигателей с постоянными магнитами (СДПМ), активному внедрению которых в регулируемый электропривод способствовали открытия и разработки в области магнитных и редкоземельных материалов [6]. При сравнении СДПМ с асинхронными двигателями можно выделить их следующие основные преимущества [7-9]:

1. Коэффициент полезного действия в среднем на 1-2% (а в некоторых случаях 3-5%) выше в 80% рабочего диапазона изменения частоты вращения и момента сопротивления.

2. Более высокая удельная мощность (в среднем от 30 до 35%), что приводит к уменьшенным массогабаритным показателям (разница может составлять 25%).

3. Уменьшение потребности охлаждения ротора из-за отсутствия каких-либо обмоток (за исключением случаев с пусковой обмоткой).

4. Возможность реализации электрического торможения даже на очень низких частотах вращения.

Эти преимущества СДПМ по сравнению с асинхронными двигателями позволяют разработчикам и конструкторам тягового подвижного состава делать выбор в пользу этих двигателей. Применение тяговых

© Чуприна Н.В., Пугачев А.А., 2022

СДПМ также возможно в безредукторных приводах. Это позволяет увеличить их надежность, уменьшить шум и вибрации.

Результаты испытаний скоростных электропоездов *TGV* и *AGV* производства *Alstom Transport* (Франция) показали, что экономия энергии при применении СДПМ может достигать 15% в сравнении с асинхронными двигателями [10]. Результаты испытаний маневрового тепловоза серии *HD300* (мощность дизеля 242 кВт) производства *Japan Freight Railway* (Япония) с тяговыми СДПМ показали, что затраты топлива уменьшились на 36% по сравнению с тепловозами с асинхронными двигателями [11].

Таким образом, исследование тяговых электроприводов с СДПМ становится актуальным. В данной статье решена задача исследования основных характеристик СДПМ с системой векторного управления посредством моделирования электропривода в программном комплексе *Matlab* на основании разработанного математического описания в двухфазной системе координат.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

Математическую модель СДПМ целесообразно представлять в системе координат *dq*, жестко закреплённой на роторе и вращающейся с частотой вращения ротора. Такая система координат удобна тем, что электрические переменные двигателя относительно статора являются синусоидальными, в то же время эти переменные принимают постоянное значение в установившемся режиме относительно ротора. Кроме того, использование системы координат *dq* удобно для синтеза системы управления электроприводом.

Для перехода из системы координат *ABC* в систему *dq* применим преобразования Парка-Горева. Первоначальное расположение осей *dq* в преобразовании Парка-Горева показано на **рис. 1, а**. Угол положения ротора $\theta_э$ является углом между осью *A* трехфазной системы и осью *d* двухфазной вращающейся системы координат. Связь между электрическими переменными двигателя (например, напряжения статора) в трехфазной системе координат *ABC* и системой координат *dq* для трехфазного СДПМ в матричной форме выполняется через матрицу [*T*] следующим образом:

$$[u]_{dq} = [T][U]_{ABC}, \tag{1}$$

$$[T] = \frac{2}{3}\begin{bmatrix} \cos\theta_э & \cos\left(\theta_э - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_э + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin\theta_э & -\sin\left(\theta_э - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_э + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}. \tag{2}$$

Обратное преобразование Парка-Горева можно представить как

$$[u]_{ABC} = [T]^{-1}[u]_{dq}, \tag{3}$$

$$[T]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos\theta_э & -\sin\theta_э & 1 \\ \cos\left(\theta_э - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_э - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\theta_э + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_э + \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix}. \tag{4}$$

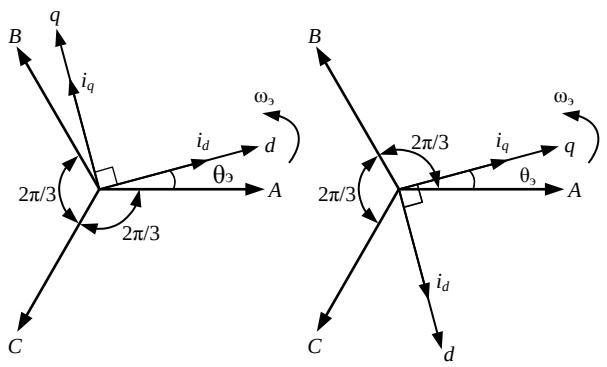
В последнее время все чаще для математического моделирования стали применять преобразование Парка-Горева, в котором ось *q* опережает ось *d* на угол, равный 90° [7]. Соответствующее расположение осей представлено на **рис. 1, б.** В данном случае угол $\theta_э$ является углом между осью *A* и осью *q*. Для такого преобразования в матричном произведении (1) и (3) матрицы [*T*] и $[T]^{-1}$, представленные в (2) и (4) соответственно, принимают следующий вид:

$$[T] = \frac{2}{3}\begin{bmatrix} \cos\theta_э & \cos\left(\theta_э - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_э + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin\theta_э & \sin\left(\theta_э - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta_э + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}. \tag{5}$$

$$[T]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos\theta_э & \sin\theta_э & 1 \\ \cos\left(\theta_э - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta_э - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\theta_э + \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta_э + \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix}. \tag{6}$$

Для преобразования Парка-Горева, в котором ось *q* опережает ось *d* на 90°, в матрицах, представленных в (5) и (6), отсутствуют отрицательные знаки в сравнении с матрицами (2) и (4). Также такое преобразование более удобно для синтеза системы векторного управления, так как максимальная фазовая индукция возникает в нулевой момент времени, когда $\theta_э$=0.

Исходя из особенностей конструкции [12] и выбранного расположения осей *dq* (**рис. 1, б**), эквивалентная схема замещения СДПМ представлена на **рис. 2** в осях *dq*. Отметим, что магнитный поток постоянных магнитов, установленных на роторе, совпадает с осью *q*, что отражено введением дополнительной составляющей противоЭДС $\omega_э\psi_m$.



а б

Рис. 1. Расположение осей *d* и *q* после преобразования Парка-Горева (оси *A* и *d* совпадают в начальный момент времени (а), оси *A* и *q* совпадают в начальный момент времени (б))

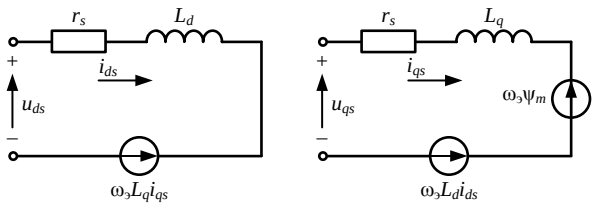


Рис. 2. Эквивалентная схема замещения СДПМ в осях *dq*

Анализируя **рис. 2**, математическую модель СДПМ в системе координат *dq* в скалярной форме можно представить в виде уравнений электрического равновесия:

$$u_{ds} = r_s i_{ds} + \frac{d\psi_{ds}}{dt} - \omega_э \psi_{qs}; \quad (7)$$

$$u_{qs} = r_s i_{qs} + \frac{d\psi_{qs}}{dt} - \omega_э \psi_{ds}, \quad (8)$$

где u_{ds} – составляющая напряжения статора по оси *d*; u_{qs} – составляющая напряжения статора по оси *q*; r_s – активное сопротивление статора; i_{ds} – составляющая тока статора по оси *d*; i_{qs} – составляющая тока статора по оси *q*; ψ_{ds} – составляющая потокосцепления статора по оси *d*; ψ_{qs} – составляющая потокосцепления статора по оси *q*; $\omega_э$ – электрическая частота вращения ротора.

Потокосцепления, представленные в уравнениях (7) и (8), можно представить:

$$\psi_{ds} = L_d i_{ds} + \psi_m; \quad (9)$$

$$\psi_{qs} = L_q i_{qs}, \quad (10)$$

где L_d – составляющая индуктивности статора по оси *d*; L_q – составляющая индуктивности статора по оси *q*; ψ_m – потокосцепление, образуемое постоянными магнитами.

На основании уравнений (9), (10) напряжения u_{ds} и u_{qs}, представленные в (7) и (8), принимают следующий вид:

$$u_{ds} = r_s i_{ds} + \frac{dL_d i_{ds}}{dt} + \frac{d\psi_m}{dt} - \omega_э L_q i_{qs}$$

или

$$u_{ds} = r_s i_{ds} + \frac{dL_d i_{ds}}{dt} - \omega_э L_q i_{qs}; \quad (11)$$

$$u_{qs} = r_s i_{qs} + \frac{dL_q i_{qs}}{dt} + \omega_э L_d i_{ds} + \omega_э \psi_m$$

или

$$u_{qs} = r_s i_{qs} + \frac{dL_q i_{qs}}{dt} + \omega_э \left(L_d i_{ds} + \psi_m \right). \quad (12)$$

Электромагнитный момент, создаваемый СДПМ, определяется так:

$$M = \frac{3}{2} p_n \left[\psi_m i_{qs} + \left(L_d - L_q \right) i_{ds} i_{qs} \right], \quad (13)$$

где p_n – число пар полюсов.

В случае равенства индуктивностей по осям *d* и *q* (это происходит при равномерности воздушного зазора между статором и ротором в двигателе, например при отсутствии ярко выраженных полюсов на роторе) реактивный момент двигателя в уравнении (13) отсутствует, то есть

$$M = \frac{3}{2} p_n \psi_m i_{qs}. \quad (14)$$

Уравнение механического движения СДПМ:

$$M = M_c + J \frac{d\omega}{dt} + B_m \omega, \quad (15)$$

где *J* – момент инерции двигателя и нагрузки; B_m – постоянный коэффициент вязкого трения; M_c – момент сопротивления; ω – механическая частота вращения ротора двигателя, $\omega = \omega_э / p_n$.

На **рис. 3** представлена структурная схема СДПМ, разработанная по уравнениям (11)–(15).

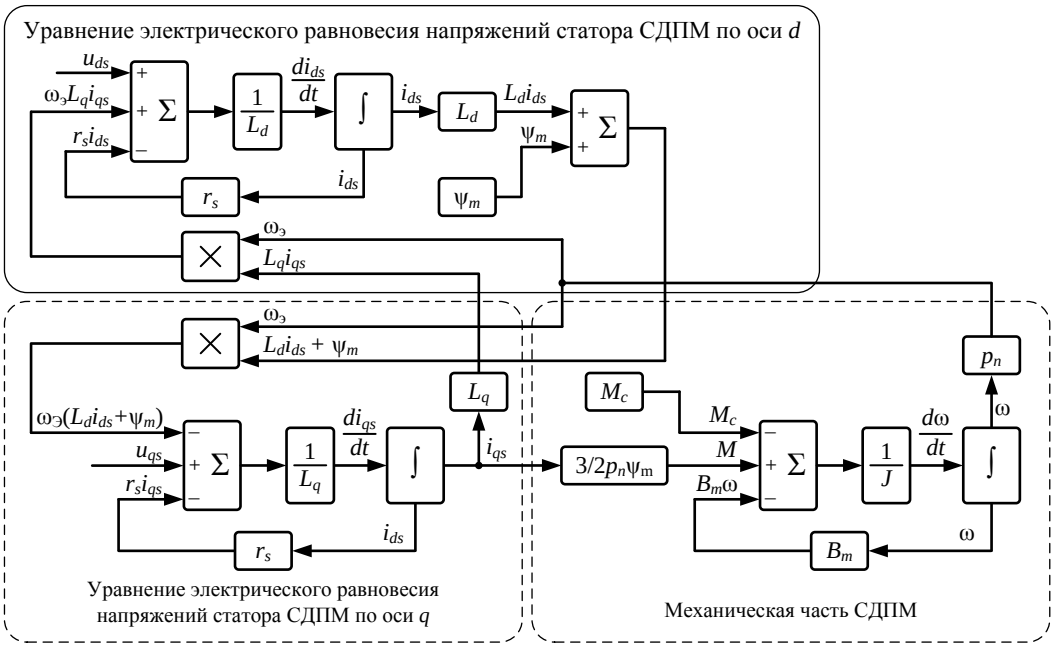


Рис. 3. Структурная схема СДПМ с круглым ротором

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ ВЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ

Отличительной особенностью СДПМ от асинхронного двигателя является невозможность пуска от сети без пусковой короткозамкнутой обмотки. Наличие демпферной обмотки в СДПМ лишает его основных преимуществ, связанных с массогабаритными показателями. Для работы без пусковой обмотки необходима система управления с обратной связью по положению ротора. Современный тяговый электропривод по большей части выполняется с применением различных систем управления, имеющих обратные связи.

В электроприводе наибольшее распространение получили две системы управления: скалярная и векторная. Скалярные системы управления реализуют функциональную зависимость между напряжением и частотой тока статора. Данные системы управления достаточно просто реализуются и не требуют наличия обратных связей, но обладают невысокими показателями качества регулирования момента, что критично для реализации силы тяги в режимах юза и боксования. Наибольшее распространение такие системы управления получили в электроприводах вспомогательных агрегатов локомотивов. Для тягового электропривода наиболее предпочтительными являются векторные системы управления.

На основании работ [13-16] можно сделать вывод, что в электроприводах переменного тока, в том числе в электроприводе с СДПМ, достаточно широкое применение нашла система векторного управления с принудительной ориентацией по магнитному потоку ротора. При таком управлении необходима информация о положении вектора потока ротора, для получения желаемых характеристик требуется выполнять ортогональное позиционирование вектора тока статора по отношению к вектору потока ротора, причем таким образом, чтобы $i_{ds} = 0$. На **рис. 4** представлена структурная схема системы векторного управления тягового электропривода с ориентацией по магнитному полю ротора.

Силовой канал тягового электропривода, представленного на **рис. 4**, подключен к синхронному генератору (СГ), генерирующему трехфазное напряжение U_A, U_B, U_C, и состоит из: трехфазного диодного выпрямителя (ТДВ), звена постоянного тока (ЗПТ), формирующего постоянное напряжение U_{dc}, автономного инвертора напряжения (АИН) и СДПМ.

Для организации обратной связи по частоте вращения (положению) применен энкодер (*BR*), сигнал от которого поступает на блок вычисления угла и частоты вращения (БВУС), который преобразует импульсный сигнал энкодера в сигналы частот вращения ω, $\omega_э$ и угла $\theta_э$, совместимые с системой управления. В качестве регулятора частоты вращения ($Wp\omega$), формирующего задание тока $i_{qs,з}$, и регуляторов тока по соответствующим осям (Wpi_d и Wpi_q), формирующих задания напряжения $u_{ds,з}$ и $u_{qs,з}$, применены пропорционально-интегральные регуляторы, методика выбора и расчета которых хорошо известна и неоднократно апробирована не только для СДПМ, но и для асинхронных двигателей [17].

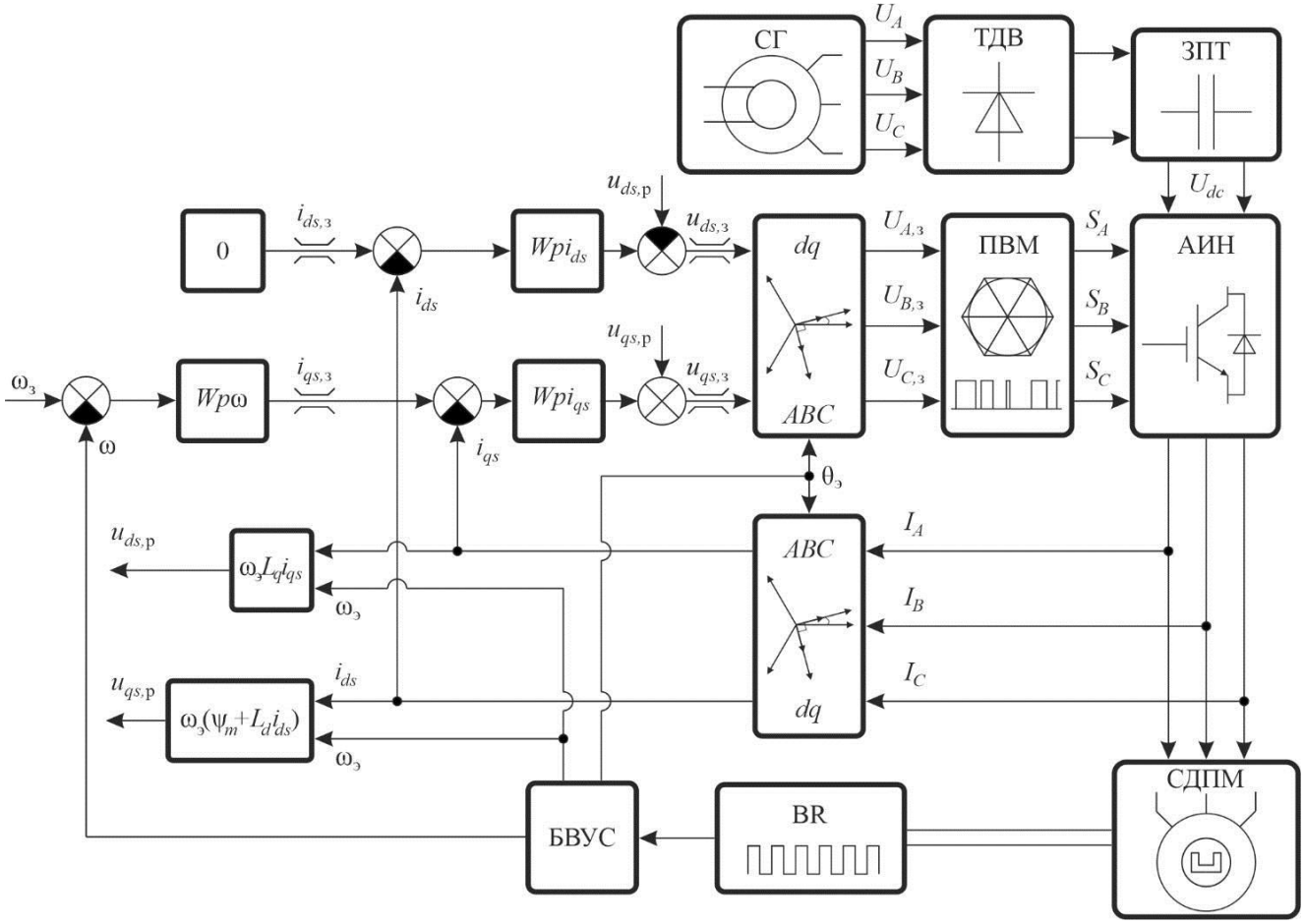


Рис. 4. Структурная схема векторного управления тягового электропривода с ориентацией по полю

Передаточная функция пропорционально-интегрального регулятора:

$$W_{\theta}(p) = k + \frac{1}{\tau_{и} p}, \quad (16)$$

где τ_u – постоянная времени интегрирования; k – коэффициент усиления.

Для корректной работы системы векторного управления осуществлены прямые преобразования Парка-Горева (*ABC-dq*) на основании уравнений (1) и (5), а также обратные (*dq-ABC*) на основании уравнений (1) и (6).

Для уменьшения взаимного влияния контуров регулирования тока друг на друга из двух уравнений (11) и (12) нужно исключить последнее слагаемое, для чего в систему управления введены блоки, формирующие напряжения развязки ($u_{ds,р} = \omega_э L_q i_{qs}$ – для контура регулирования тока i_{ds}, $u_{qs,р} = \omega_э(\psi_m + L_d i_{ds})$ – для контура регулирования тока i_{qs}).

Для управления АИН использованы алгоритмы пространственно-векторной модуляции (ПВМ), математическое описание которых и их реализация в *Matlab* подробно рассмотрена в [18] и в данной статье не приводятся.

Отметим, что предложенная структура системы векторного управления хорошо интегрируется во внешний контур системы управления тягового электропривода рельсового подвижного состава, который осуществляет регулирование одного из тяговых параметров, например скольжения или силы тяги [19]. В этом случае задание тока $i_{qs,з}$ формируется исходя из условия реализации защиты от возникновения режимов юза и боксования, а также свободной мощности дизеля (при наличии). Единственное изменение в структуре системы векторного управления (**рис. 3**) коснется замены регулятора частоты вращения *Wpω* на регулятор проскальзывания колес.

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА В MATLAB

Модель СДПМ соответствует выражениям (12), (14), (15) (см. структурную схему на **рис. 3**). Для реализации модели СДПМ использованы элементы *Gain, Integrator, Product, Sum* из библиотеки *Simulink*. Номинальные параметры СДПМ: P = 133 кВт, ω = 314 рад/с, p_n = 2, U_{dc} = 540 В, r_s = 0,013 Ом, L_d = 0,0008673 Гн, L_q = 0,0008673 Гн.

Учитывая высокое разрешение современных импульсных датчиков, сигнал обратной связи по частоте вращения (положения) реализован с помощью элемента *Gain*, коэффициент обратной связи *равен* единице. Коэффициент обратной связи по токам также равен единице.

Регуляторы собраны на элементах *Gain, Integrator* (с включенным параметром *Limit, Limit* = ±600 – для регулятора частоты вращения *Wpω*, *Limit* = ±310 – для регуляторов тока Wpi_d и Wpi_q), *Product, Sum*. Значения параметров регуляторов следующие: $\tau_{u,\omega}$ = 350, k_ω = 80 – для регулятора частоты вращения *Wpω*; $\tau_{u,id}$ = 100, k_{id} = 100 – для регулятора тока Wpi_d; $\tau_{u,iq}$ = 100, k_{iq} = 150 – для регулятора тока Wpi_q. Все ограничения в системе управления (см. **рис. 4**) реализованы на элементе *Saturation* из библиотеки *Simulink*, предельные значения установлены в ±600 для тока $i_{qs,з}$, в ±310 для напряжений $u_{ds,з}$ и $u_{qs,з}$.

С учетом приведенных в предыдущих двух разделах статьи выражений (1), (5), (6) и структурной схемы на **рис. 4** разработка модели прямых и обратных преобразований Парка-Горева и блоков, формирующих напряжения развязки, затруднений не вызывает. Реализация полупроводниковых преобразователей силового канала электропривода рассмотрена в [18]. Частота коммутации ключей АИН – 8 кГц.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

На **рис. 5** представлены осциллограммы основных электромеханических параметров электропривода, полученные в результате компьютерного моделирования.

Математическое моделирование тягового электропривода проводилось при постоянной нагрузке, равной M_c=420 Н·м. В качестве задания на частоту вращения СДПМ были приняты следующие значения: $\omega_{з1}$=100 рад/с, $\omega_{з2}$=200 рад/с, $\omega_{з3}$=314 рад/с (изменения задания происходят в моменты времени 0 с, 0,04 с и 0,08 с соответственно). Частота вращения СДПМ принимает значения ω_1=98,1 рад/с, ω_2=198,7 рад/с, ω_2=313,9 рад/с (**рис. 5, а**). Очевидно, что с увеличением частоты вращения ошибка регулирования уменьшается, что качественно совпадает с аналогичными результатами применения системы векторного управления для асинхронного двигателя.

Система управления настроена на поддержание тока статора i_{ds}=0, при этом ток i_{qs} является единственной моментообразующей составляющей вектора тока статора. Изменение значения тока статора i_{ds} необходимо для обеспечения работы электропривода во второй зоне регулирования частоты вращения. Ограничению тока статора на уровне 600 А соответствует ограничение момента $M_м$=640 Н·м. В соответствии с **рис. 5, б, в** система векторного управления обеспечивает высокодинамичное регулирование тока статора i_{qs} и, соответственно, момента СДПМ; быстродействие контура момента составляет 1,89 мс, что в полной мере соответствует требованиям, предъявляемым к тяговому электроприводу рельсового подвижного состава для предотвращения возникновения режимов юза и боксования. Для электропривода с асинхронным двигателем такое быстродействие контура момента может быть получено в результате применения системы прямого управления моментом.

Зависимости фазных токов от времени (**рис. 5, г**) подтверждают адекватность выполненного моделирования.

Проверка работоспособности разработанной системы векторного управления и ее модели также была осуществлена при моделировании СДПМ посредством элемента *PMSM* из библиотеки *SimPowerSystems*. Результаты моделирования полностью совпали с результатами, приведенными на **рис. 5**.

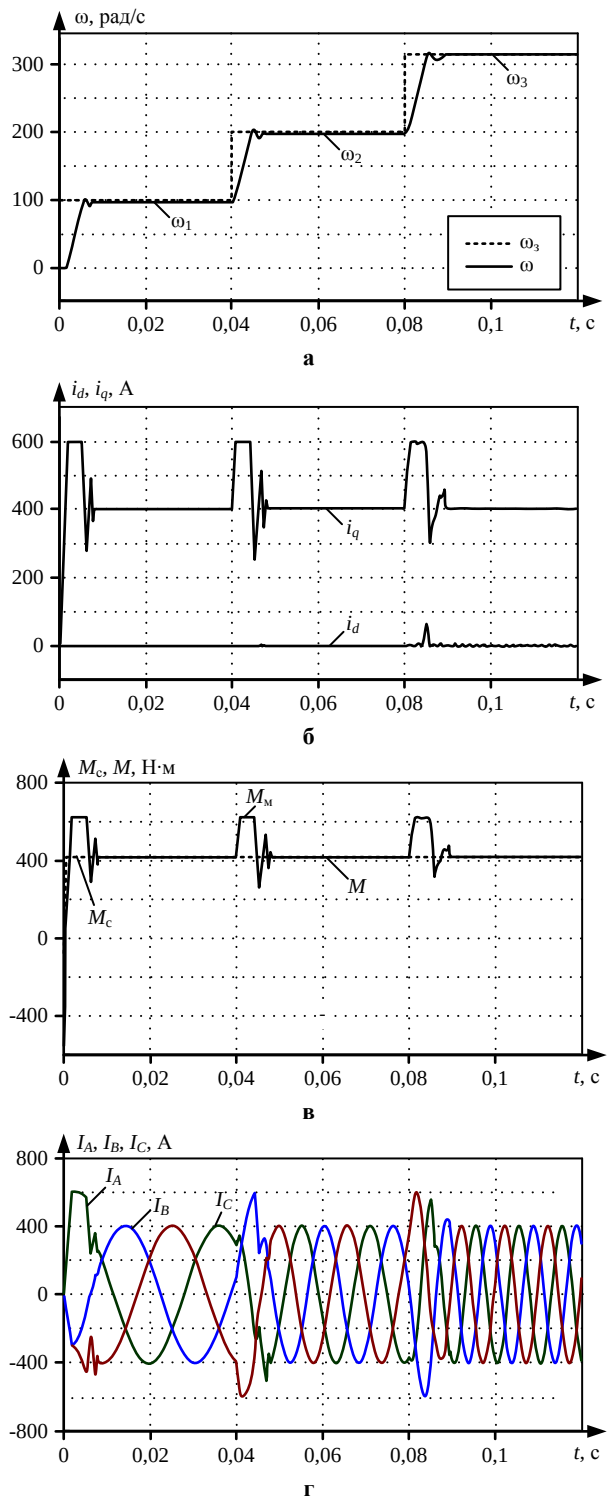


Рис. 5. Осциллограммы частоты вращения ротора СДПМ (а), токов статора i_d и i_q (б), электромагнитного момента и момента сопротивления (в), токов статора I_A, I_B, I_C (г)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье разработана математическая модель электропривода, содержащего СДПМ и автономный инвертор напряжения с пространственно-векторной широтно-импульсной модуляцией. Для управления СДПМ синтезирована система векторного управления, рассчитаны значения параметров регуляторов частоты вращения и токов статора, выбраны их предельные величины. Математическая модель, представленная в виде уравнений и структурных схем, была реализована средствами *Matlab Simulink*. В результате моделирования электропривода с двигателем мощностью 133 кВт установлено, что быстродействие контура момента составило 1,89 мс, что позволяет рекомендовать электропривод с СДПМ в качестве тягового для рельсовых транспортных средств. Дальнейшим направлением исследования станет разработка системы совместного управления СДПМ разных колесных пар одной тележки локомотива как тяговой подвижной единицы, обеспечивающей энергоэффективность в установившихся (квазиустановившихся) режимах работы и защиту от проскальзывания в режимах пуска и торможения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анализ и систематизация систем электропривода тягового подвижного состава / А.С. Космодамианский, В.И. Воробьев, А.А. Пугачев, С.Г. Волохов // Мир транспорта и технологических машин. 2013. № 2(41). С. 46-53.
2. Анучин А.С. Системы управления электроприводов: учебник для вузов. М.: Издательский дом МЭИ, 2015. 373 с.
3. Козярук, А.Е., Рудаков В.В. Современное и перспективное алгоритмическое обеспечение частотно-регулируемых электроприводов. СПб.: С.-Петерб. электротехн. компания, 2004. 128 с.
4. Thanga R.C., Srivastava S.P., Agarwal P. Energy efficient control of three-phase induction motor - a review // International Journal of Computer and Electrical Engineering. 2009. Vol. 1 (1). Pp. 61-70. doi: 10.7763/IJCEE.2009.V1.10
5. Hill R.J. Traction drives and inverters // Railway Electrification Infrastructure and Systems. 2007. Pp. 185-196. doi: 10.1049/IC.2007.1652
6. Matsuoka K. Development Trend of the Permanent Magnet Synchronous Motor for Railway Traction // IEEJ Trans. 2007. Vol. 2. Pp. 154-161. doi: 10.1002/tee.20121
7. Simulation of a permanent magnet synchronous motor using Matlab-Simulink / A. Apte, R. Walambe, V. Joshi, K. Rathod, J. Kolhe // Annual IEEE India Conference (INDICON). 2014. Pp. 1-5. doi: 10.1109/INDICON.2014.7030469.
8. Comparison of Interior Permanent Magnet Motor Topologies for Traction Applications / Y. Yang, S. Castano, R. Yang, M. Kasprzak, B. Bilgin, A. Sathyan, H. Dadkhah, A. Emadi // IEEE Trans. Topologies for Traction Applications. 2017. Vol. 3(1). Pp. 86-97. doi: 10.1109/TTE.2016.2614972
9. Nagamani C., Somanatham R. Design and Analysis of Traction Drive System for Hybrid Locomotives using 5-phase Permanent Magnet Synchronous Motors as Traction Motors // Journal on Electrical Engineering. 2016. Vol. 10(2). Pp. 27-45. doi: 10.26634/jee.10.2.8324
10. Dhir S, Marinov M., Worsley D. Application of the analytic hierarchy process to identify the most suitable manufacturer of rail vehicles for High Speed 2 // Case Studies on Transport Policy. 2015. Vol 3(4). Pp. 431-448. doi: 10.1016/j.cstp.2015.08.004
11. Кузнецова И.А. Оценка технико-энергетической эффективности работы маневровых тепловозов путем моделирования рабочих процессов оборудования в режимах эксплуатации: дис. … канд. техн. наук. 05.22.07 / Кузнецова Ирина Алексеевна. Москва, 2018.
12. Vector control of a permanent magnet synchronous motor / R.K. Sharma, V. Sanadhya, L. Behera S. Bhattacharya // India Conference. 2008. Vol. 1. Pp. 81-86. doi: 10.1109/INDCON.2008.4768805
13. Виноградов А.Б. Развитие теории и практическая реализация векторных электроприводов переменного тока с микропроцессорным управлением: дис. … д-ра. техн. наук. 05.09.03 / Виноградов Анатолий Брониславович. Иваново, 2011.

14. Мещеряков В.Н., Данилов В.В. Повышение энергоэффективности асинхронного электропривода с векторным управлением за счет регулирования продольной составляющей тока статора при неполной статической нагрузке // Электротехнические системы и комплексы. 2018. №3(40). С. 4-11. https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-3(40)-4-11
15. Control strategy for synchronous homopolar motor in traction applications / M. Lashkevich, A. Anuchin, D. Aliamkin, F. Briz // 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON). 2017. Pp. 6607-6611. doi: 10.1109/IECON.2017.8217153
16. An Q., Wang G., Sun L. A Fault-Tolerant Operation Method of PMSM Fed by Cascaded Two-Level Inverters // 7th International Power electronics and motion control conference (IPEMC). 2012. Pp. 1310-1313. doi: 10.1109/IPEMC.2012.6259047
17. Терехов В.М., Осипов О.И. Системы управления электроприводов. М.: Академия, 2005. 304 с.
18. Моделирование электропривода переменного тока с алгоритмами пространственно-векторной модуляции / Н.В. Чуприна, С.В. Седых, А.А. Пугачев, В.П. Маклаков // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2022. №1(15). С. 80-88. doi: 10.30987/2658-6436-2022-1-80-88
19. Повышение энергоэффективности тяговых электроприводов с асинхронными двигателями и системой векторного управления / Ю.М. Иньков, А.С. Космодамианский, А.А. Пугачев, С.В. Морозов // Электротехника. 2021. № 9. С. 10-15. doi: 10.3103/S1068371221090066

Поступила в редакцию 25 февраля 2022 г.

INFORMATION IN ENGLISH

SIMULATION OF TRACTION PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR VECTOR CONTROL SYSTEM

Nikolay V. Chuprina

Postgraduate student, Teaching Assistant, Industrial Electronics and Electrical Engineering Department, Bryansk State Technical University, Russia, Bryansk, nikochuprina212@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0001-8915-0926

Alexander A. Pugachev

D.Sc. (Engineering), Associate Professor, Head of Department, Industrial Electronics and Electrical Engineering Department, Bryansk State Technical University, Russia, Bryansk, alexander-pugachev@rambler.ru, https://orcid.org/0000-0002-1836-0923

There is a strong trend in the AC electric drives for the vast implementation of different kind of synchronous motors for the last decades. The brief survey of researches and investigations has shown that the most suitable and feasible type of synchronous motor for the traction purpose in the railway vehicles is a permanent magnet synchronous motor (PMSM). Based upon the analyses of AC electric motors control systems, one can conclude that the vector control system satisfies the most requirements for the traction electric drives. The purpose set in the present article is to develop a mathematical model of PMSM electric drive with vector control system. The Matlab software is used for the developed mathematical model verification. To reach the purpose, the techniques of electric drive theory, control systems engineering, analytic and numerical evaluations of algebraic and differential equations, computer simulation are implicated. The equations and topologies of main functional units of electric drive with vector control system are synthesized by means of PMSM equivalent circuit application and Park-Gorev transformations. The relevance of choice for the displacement of *d* and *q* axes after Park-Gorev transformation is highlighted. The two-level voltage source inverter controlled by space-vector pulse-width modulation is introduced in the power subsystem of the electric drive. The possibility of vector system control integration in the outer loop controlling the slip or adhesion forces of the railway vehicle traction electric drive is pondered over. The implementation of electric drive with the 133 kW PMSM is shown in details by means of elements from *Matlab Simulink* library. The basic parameters of the main functional units, including controllers and regulators, depending on type and characteristics of the applied motor are calculated. The results of electric drive simulation in transient modes are presented. The results show the adequacy of developed model. Also, it is obvious that the implementation of PMSM vector control system makes it possible to achieve high-speed performance and precise control of both motor torque and speed.

Keywords: synchronous motor, permanent magnets, vector control system, traction electric drive, equivalent circuit, Park-Gorev transformations, modeling.

REFERENCES

1. Kosmodamianskij A.S., Vorobiev V.I., Pugachev A.A., Volokhov S.G. Analysis and systematization of electric drive systems of traction rolling stock. *Mir transporta i texnologicheskikh mashin* [World of transport and technological machines], 2013, no. 2 (41), pp. 46 – 53. (In Russian)
2. Anuchin A.S. *Sistemy upravleniya elektroprivodov* [Electric drive control systems]. Moscow, Publishing house of MPEI, 2015. 373 p. (In Russian)
3. Kozyaruk, A.E., Rudakov V.V. *Sovremennoe i perspektivnoe algoritmicheskoe obespechenie chastotno-reguliruemykh elektroprivodov* [Modern and perspective algorithmic support of frequency-controlled electric drives]. Saint Petersburg, Saint Petersburg electrical engineering company Publ., 2004. 128 p. (In Russian)
4. Thanga R.C., Srivastava S.P., Agarwal P. Energy efficient control of three-phase induction motor - a review. International Journal of Computer and Electrical Engineering, 2009, vol. 1(1), pp. 61-70. doi: 10.7763/IJCEE.2009.V1.10
5. Hill R.J. Traction drives and inverters. Railway Electrification Infrastructure and Systems, 2007, pp. 185-196. doi: 10.1049/IC.2007.1652
6. Matsuoka K. Development Trend of the Permanent Magnet Synchronous Motor for Railway Traction. IEEJ Trans, 2007, vol. 2, pp. 154–161. doi: 10.1002/tee.20121
7. Apte A., Walambe R., Joshi V., Rathod K., Kolhe J. Simulation of a permanent magnet synchronous motor using Matlab-Simulink. Annual IEEE India Conference (INDICON). IEEE, 2014, pp. 1-5. doi: 10.1109/INDICON.2014.7030469
8. Yang Y., Castano S., Yang R., Kasprzak M., Bilgin B., Sathyan A., Dadkhah H., Emadi A. Comparison of Interior Permanent Magnet Motor Topologies for Traction Applications. IEEE Trans. Topologies for Traction Applications, 2017, vol. 3(1), pp. 86–97. doi: 10.1109/TTE.2016.2614972
9. Nagamani, C., Somanatham, R. Design and Analysis of Traction Drive System for Hybrid Locomotives using 5-phase Permanent Magnet Synchronous Motors as Traction

Motors //Journal on Electrical Engineering, 2016, vol. 10(2), pp. 27-45. doi: 10.26634/jee.10.2.8324

10. Dhir S, Marinov M., Worsley D. Application of the analytic hierarchy process to identify the most suitable manufacturer of rail vehicles for High Speed 2. Case Studies on Transport Policy, 2015, vol. 3(4), pp. 431-448. doi: 10.1016/j.cstp.2015.08.004
11. Kuznetsova I.A. *Otsenka tekhniko-energeticheskoj effektivnosti raboty manevrovyh teplovozov putem modelirovaniya rabochih processov oborudovaniya v rezhimah ekspluatacii. Kand. Diss.* [Evaluation of the technical and energy efficiency of shunting diesel locomotives by modeling equipment workflows in operating modes. Kand. Diss.]. Moscow, 2018. 168 p. (In Russian)
12. Sharma R.K., Sanadhya V., Behera L., Bhattacharya S. Vector control of a permanent magnet synchronous motor. India Conference, 2008, vol. 1, pp. 81-86. doi: 10.1109/INDCON.2008.4768805
13. Vinogradov A.B. *Razvitie teorii i prakticheskaya realizatsiya vektornyh elektroprivodov peremennogo toka s mikroprocessornym upravleniem. Doct. Diss.* [Development of the theory and practical implementation of vector AC drives with microprocessor control. Doct. Diss.]. Ivanovo, 2011. 339 p. (In Russian)
14. Meshheryakov V.N., Danilov V.V. Increase of Energy Efficiency for Induction Motor with Vector Control by Means of Regulation of Flux-Generation Component of Stator Current at Half Static Load. *Elektrotekhnicheskie sistemy i kompleksy* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2018, no. 3(40), pp. 4-11. https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-3(40-4-11) (In Russian)
15. Lashkevich M., Anuchin A., Aliamkin D., Briz F. Control strategy for synchronous homopolar motor in traction applications. 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. IECON 2017, 2017, pp. 6607-6611. doi: 10.1109/IECON.2017. 8217153
16. An Q., Wang G., Sun L. A Fault-Tolerant Operation Method of PMSM Fed by Cascaded Two-Level Inverters. 7th International Power electronics and motion control conference (IPEMC), 2012, pp. 1310-1313. doi: 10.1109/IPEMC.2012.6259047
17. Terekhov V.M., Osipov O.I. *Sistemy upravleniya elektroprivodov* [Electric drive control systems]. Moscow, Academy Publ., 2005. 304 p. (In Russian)
18. Chuprina N.V., Sedykh S.V., Pugachev A.A., Maklakov V.P. Simulation of ac electric drive with space-vector modulation algorithms. *Avtomatizatsiya i modelirovanie v proektirovanii i upravlenii* [Automation and modeling in design and management], 2022, no. 1 (15), pp. 80-88. doi:10.30987/2658-6436-2022-1-80-88 (In Russian)
19. InkovYu.M., Kosmodamianskij A.S., Pugachev A.A., Morozov S.V. Efficiency Increasing of Traction Electric Drives with Induction Motors and Vector Control System. *Elektrotekhnika* [Electrical engineering], 2021, no. 9, pp. 10-15. doi: 10.3103/S1068371221090066 (In Russian)

Чуприна Н.В., Пугачев А.А. Моделирование системы векторного управления тяговым синхронным двигателем с постоянными магнитами // Электротехнические системы и комплексы. 2022. № 2(55). С. 10-17. https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-2(55)-10-17

Chuprina N.V., Pugachev A.A. Simulation of Traction Permanent Magnet Synchronous Motor Vector Control System. *Elektrotekhnicheskie sistemy i kompleksy* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2022, no. 2(55), pp. 10-17. (In Russian). https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-2(55)-10-17

УДК 62-503.57 https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-2(55)-18-24

Сенцов Е.В., Мещеряков В.Н.

Липецкий государственный технический университет

СОЗДАНИЕ НЕЙРОСЕТЕВОГО НАБЛЮДАТЕЛЯ СКОРОСТИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ СТАБИЛЬНОСТИ СИСТЕМЫ ВЕКТОРНОГО БЕЗДАТЧИКОВОГО УПРАВЛЕНИЯ

В работе рассматривается вопрос влияния показаний наблюдателей скорости на систему векторного управления асинхронным двигателем. Приведена классификация применяемых методов бездатчикового управления. Осуществлен анализ преимуществ и недостатков наиболее распространенных структур построения наблюдателей скорости. Разработаны и созданы математические модели отдельных наблюдателей в программном пакете *Matlab Simulink*. Проведены испытания работы полученных моделей в различных режимах, получены данные о динамике работы привода. Сделаны выводы о работе наблюдателей, основанных на классическом математическом аппарате, в ситуациях, связанных с изменением каких-либо параметров управляемого объекта. В качестве инструмента, способного нивелировать недостатки классических наблюдателей, рассматривается концепция нейросетей. Проведен анализ нейроструктур, подходящих для задач управления сложными динамическими объектами. В качестве нейрорегулятора применен элемент библиотеки *Neural Network Toolbox* (*Deep Learning Toolbox*) – *Predictive Controller*. Построена модель с использованием нейроструктуры в качестве наблюдателя. Детально описан процесс интеграции данных и наладки параметров нейросети. Проведено исследование поведения полученной системы управления в динамических режимах. В рамках исследования поведения системы векторного управления разработан механизм адаптации, учитывающий преимущества и недостатки двух различных подходов к реализации определения скорости, для создания модели с комбинированной структурой наблюдателя. Получена модель с комбинированной структурой наблюдателя на основе нейронной сети и классического наблюдателя. Проведены исследования поведения полученной системы управления в различных имитационных режимах.

Ключевые слова: моделирование, регулируемый электропривод, система управления, векторное управление, асинхронный двигатель, Predictive controller, наблюдатели, бездатчиковое векторное управление, обучение, нейронные сети.

ВВЕДЕНИЕ

Для проектирования и разработки замкнутых систем управления электроприводами требуется иметь информацию о текущих значениях скорости электродвигателя. Эти данные подлежат обработке в канале отрицательной обратной связи, который организует на входном участке системы управления сравнение показаний задания на скорость и реальной скорости двигателя.

Для подавляющего большинства существующих на сегодняшний день систем регулируемого электропривода применяются различные датчики скорости, имеющие связь с валом двигателя и представляющие собой устройство, преобразующее показания скорости вращения вала в дискретный либо аналоговый сигнал, регистрируемый в системе управления [1].

Совокупность тенденций к повышению надежности систем электроприводов, их удешевлению, а также ряд объектов, где прямое измерение с помощью датчика является невозможным, приводит к определению и разработке способов бездатчикового определения скорости. Такая оценка данных скорости возможна при непрямом определении требуемой величины через другие, уже известные по другим измерениям данные. Как правило, это выходное напряжение инвертора (каждой из фаз), ток и напряжение статора.

С точки зрения схемотехники такой подход означает передачу электронной части системы функций, которые ранее выполнялись вращающимся датчиком [2].

Теоретически такое техническое решение должно приводить к существенному усложнению системы управления, понижению её быстродействия, что также влечет за собой повышение стоимости всего электропривода. Однако текущий прогресс микропроцессорной техники позволяет реализовать подобные системы управления без какого-либо ущерба для скорости обработки данных системой управления и без нежелательного роста цены объекта [3].

Также это позволяет не учитывать необходимость в протяженных трассах проводов, осуществляющих питание и обмен информацией с датчиком скорости, из-за технологических особенностей расположенного в значительном удалении от устройств системы управления [4, 5].

Необходимо отметить, что при создании таких бездатчиковых систем требуется применение специализированных математических объектов, которые называют наблюдателями состояния (наблюдателями). Показатели функционирования наблюдателей зависят от качества задания параметров модели двигателя, точности осуществляемого измерения напряжений и токов, принципа организации самого наблюдателя и многих иных параметров [6, 7].

Рассмотрим группы наиболее распространенных структур для применения в системах управления электроприводами.

В первую группу относят структуры, называемые непрямыми измерителями положения. Данные наблюдатели основаны на информации о конструкционных особенностях электродвигателя, здесь для оценки положения ротора требуются данные магнитной неоднородности свойств двигателя, а также используют информацию, получаемую из кривой намагничивания двигателя. К данной группе также относят структуры, в которых применяется метод высокочастотной инжекции, когда инвертор производит сигналы высокой частоты, по реакции на которые определяется физическое положение ротора. Тем не менее для такого подхода характерен повышенный уровень шума и дополнительные потери [6, 8].

© Сенцов Е.В., Мещеряков В.Н., 2022

Ко второй группе методов построения наблюдателей относятся измерители ошибки ориентирования. Принцип работы таких наблюдателей основан на нахождении положения вращающейся системы координат посредством анализа внутренних сигналов системы управления, которые находятся в зависимости от её ошибки ориентирования. Отличительной особенностью наблюдателей второй группы является отсутствие корректной работы в зоне низких скоростей и относительно низкий показатель совокупного быстродействия системы, основанной на такой структуре [6, 7, 9].

Третью группу наблюдателей составляют системы, где определение требуемых неизвестных данных осуществляется посредством обработки показаний модели электромагнитных процессов, происходящих в двигателе (как правило, применяется либо модель ротора, либо модель статора). В этом подходе для корректной работы модели применяются полученные в ходе измерений значения напряжений и токов [4, 6, 10].

К четвертой группе относят адаптивные наблюдатели, основанные на эталонной модели. Структура наблюдателя представляет собой связь модели происходящих в двигателе электромагнитных процессов (не зависит от показаний скорости, эталонной) и модели, находящейся в зависимости от показаний скорости и предназначенной для определения показаний требуемого параметра (адаптивной). Данными для работы первой, эталонной модели служат измеренные значения токов и напряжений. Также в таких структурах присутствует механизм адаптации, обеспечивающий регуляцию показаний двух внутренних моделей [6, 11, 12].

Пятую группу составляет набор подходов, основанных на применении фильтра Калмана. Фильтр Калмана – это линейная адаптивная структура рекурсивного типа, которой для получения текущих данных необходима информация о предыдущем состоянии объекта анализа. Как правило, эту структуру интегрируют таким образом, чтобы осуществлять отслеживание вектора состояния системы при наличии внешних возмущающих воздействий. К недостаткам данного метода можно отнести очень сложную настройку структуры наблюдателя, излишнее число математических операций и преобразований. Основное преимущество такой системы – возможность оценки широкого количества переменных состояния и определённая устойчивость к случайным помехам [6, 13-15].

В шестую группу объединяют семейство структур наблюдателей полного порядка. Ключевым отличием от других групп является математическое представление структур таких наблюдателей, как системы дифференциальных уравнений. Функционирование наблюдателей такого типа представляет собой процесс нахождения текущих параметров состояния электродвигателя и дальнейшего определения величины скорости вращения ротора. Для этого используется специальный адаптационный механизм, реализуемый как произведение токовой ошибки на величину потокосцепления ротора и дальнейшее приведение полученного произведения к нулю с помощью ПИ-регулятора [6, 16, 17].

Отдельным классом характеризуются разработки с использованием нейросетей.

В сложных динамических системах, при наличии хаотических помех и воздействий на объект регулирования, когда решений, основанных на традиционном математическом аппарате, недостаточно, нейронные сети выступают подходящим инструментом для уменьшения негативных влияний на систему управления. Широко распространена концепция применения нейросетевых и нейронечетких структур в системах управления, где необходимо обеспечивать широкий диапазон изменений механических параметров и режимов работы привода. Зачастую классические системы управления с линейными регуляторами не способны обеспечить должное быстродействие и точность определения параметров для условий, указанных выше [18-23].

Одной из ключевых особенностей нейронной сети является её способность к обучению. Этот аспект применяется для обработки массивов величин, технологий машинного зрения (распознавания изображений), прогнозирования будущих событий и отклонений, классификации данных и оценки корректности решений.

Основой функционирования нейронной сети является связь между её отдельными элементами, объединяемыми в слои, – нейронами. Связи между отдельными нейронами и слоями имеют свои качественные характеристики, называемые весами.

Для выполнения процедуры обучения нейронной сети необходимо составить корректные обучающие выборки данных (массивы или модель в реальном времени). При этом происходит автоматическая калибровка весов структуры, до тех пор, пока сеть не начинает удовлетворять поставленным задачам [24-25].

Обобщая вышесказанное, применение нейросетевых элементов в структуре математических наблюдателей может позволить компенсировать определенные их недостатки.

КЛАССИЧЕСКИЕ НАБЛЮДАТЕЛИ СКОРОСТИ

Наблюдатели скорости, основанные на классическом математическом аппарате, так называемые неадаптивные, при функционировании которых определение величин производится при помощи математического описания асинхронного двигателя в неподвижной системе координат, являются наиболее простым типом наблюдателей.

Подробный процесс разработки и создания модели, а также исследование ее поведения приведен в [24, 26, 27]. Отметим для наглядности только полученные данные. На **рис. 1** показаны характеристики переходного процесса системы векторного управления с неадаптивным наблюдателем скорости для имитационного режима нагрева, в **табл. 1** приведены данные показаний наблюдателя.

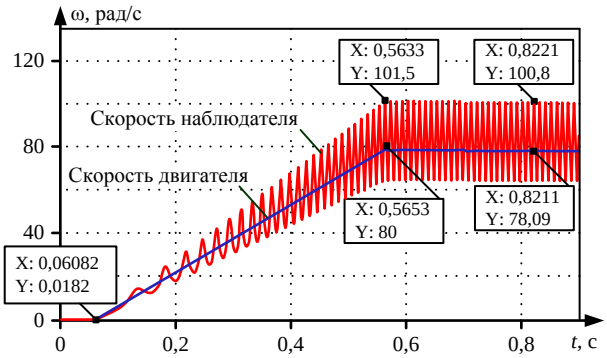


Рис. 1. Динамика скорости в имитационном режиме нагрева

Таблица 1

Показания неадаптивного наблюдателя в имитационном режиме нагрева

$R_{ротора}$, Ом	$R_{статора}$, Ом	Δω, рад/с
0,0309	0,0336	0
0,032445	0,03528	9
0,03399	0,03696	16,8
0,035535	0,03864	30
0,03708	0,04032	35,8

При анализе полученных данных четко прослеживается тенденция роста ошибки показаний наблюдателя при повышении температуры обмоток. Такого рода данные, будучи примененными в канале обратной связи по скорости, ведут к нарушению совокупной стабильности системы управления, поскольку внутренние регуляторы будут стремиться компенсировать рассогласование с заданным значением, что приводит к еще большему падению стабильности системы.

Также, учитывая особенности данного вида наблюдателей, необходимо отметить влияние качества полученных показаний скорости на возникновение на внутренних интеграторах наблюдателя избыточных величин, что также отрицательно влияет на надежность системы.

СОЗДАНИЕ НАБЛЮДАТЕЛЯ НА ОСНОВЕ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

В качестве инструмента для создания математических структур нейронных сетей используется прикладной программный пакет *Matlab Simulink*, в частности его приложение *Deep Learning Toolbox*. Встроенный функционал позволяет проектировать, создавать и обучать нейронные сети, а также компилировать полученные модели в машинный код для дальнейшей интеграции в систему автоматизации.

В *DLT* содержится два глобальных раздела нейросетевых структур: контролируемые нейросети (где для обучения необходим учитель) и неконтролируемые (где необходимость в учителе отсутствует).

Все сети имеют модульную структуру, что позволяет разработать собственную уникальную архитектуру под конкретные задачи [28].

В ряде представленных в программном пакете *Deep Learning Toolbox* нейрообъектов можно выделить *Predictive controller* – регулятор с предиктивным (прогнозирующим) управлением.

Принцип работы такого регулятора можно сформулировать следующим образом: с помощью нейросетевой модели обработки данных производится прогнозирование возможных реакций объекта управления на как можно более широкий диапазон управляющих сигналов, после этого в работу включается специальный адаптационный механизм, который осуществляет определение сигналов управления, которые, в свою очередь, служат для оптимизации грядущих данных модели объекта управления.

Регулятор как объект библиотеки *Deep Learning Toolbox* представлен на **рис. 2**, его внутренняя структурная схема – на **рис. 3**.

Для начала обучения необходимо задать соответствующий обучающий массив данных. Затем определяется архитектура нейронной сети (**рис. 4**), настраиваются параметры ограничения входных и выходных значений, временные расчетные интервалы и количество генерируемых циклов (**рис. 5**).

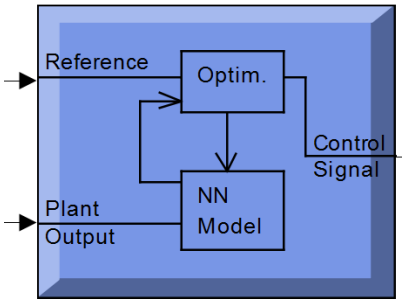


Рис. 2. Элемент Matlab Predictive Controller

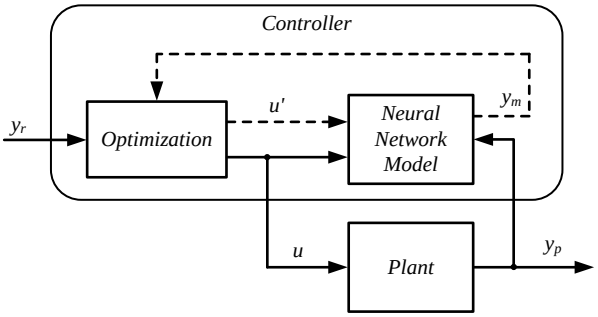


Рис. 3. Структурная схема регулятора с предуправлением

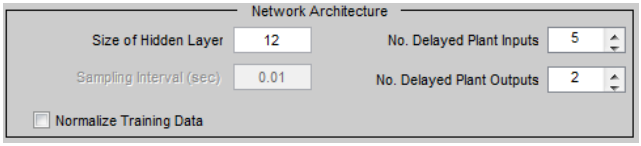


Рис. 4. Настройки архитектуры

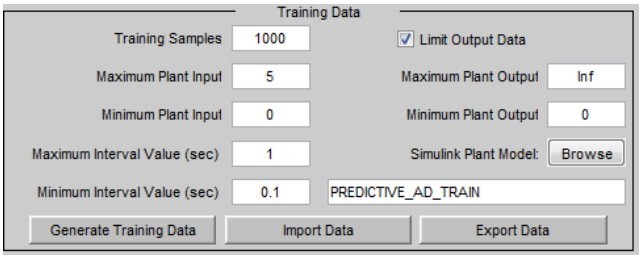


Рис. 5. Настройки обучающих данных

Далее задаются параметры выбранной функции обучения и количество циклов (**рис. 6**).

Далее производится генерация обучающей выборки и обучение нейронной сети в соответствии с заданными параметрами (**рис. 7**). При корректном выполнении обучающего массива появляется следующий статус (**рис. 8**).

Далее производим обучение нейросети. В данной работе применяется математическая функция *trainlm*, которая основана на методе Левенберга – Маркара, позволяющем произвести прецизионное обучение нейронной сети (**рис. 9**).

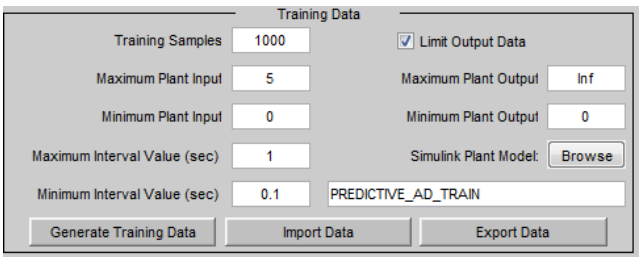


Рис. 6. Настройки обучающих данных

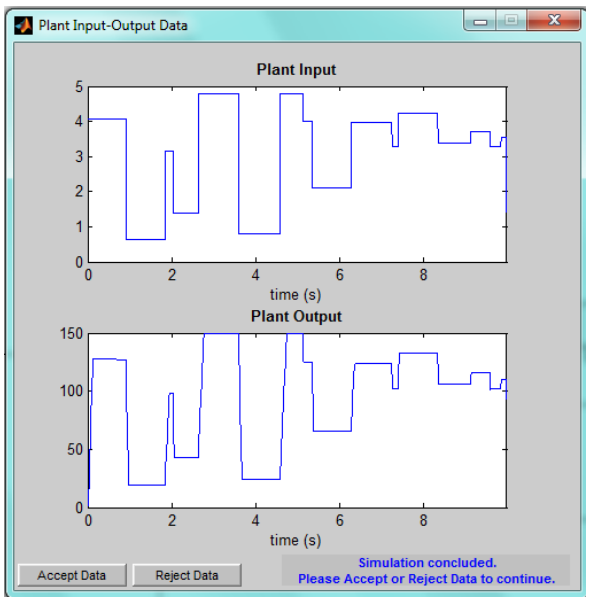


Рис. 7. Полученная выборка данных для обучения

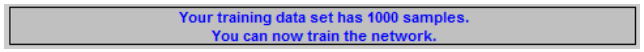


Рис. 8. Корректный статус полученных данных для обучения

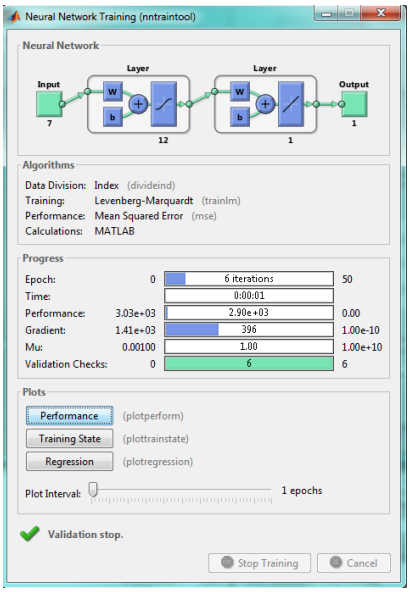


Рис. 9. Показатели обученной нейроструктуры

Необходимо отдельно отметить у данного нейроконтроллера наличие специального программного интерфейса для настройки рабочих характеристик и весов структуры *Predictive* регулятора. В этом окне необходимо задать требуемые параметры системы (**рис. 10**).

Полученный нейрорегулятор может быть применен в сложных системах управления электроприводами в качестве структуры наблюдателя скорости. Далее проведём исследование наблюдателя на основе *Predictive Controller* на динамическую устойчивость в различных режимах работы электропривода.

Отследим динамические показатели полученного нейроструктурного наблюдателя при проведении исследовательского режима повышения температуры статорной и роторной обмоток двигателя вплоть до 125%, начиная от нормальных показаний нагрева в 100%, с шагом в 5%. На **рис. 11** приведена полученная характеристика динамики изменения скорости для системы с датчиком скорости, неадаптивным наблюдателем скорости и нейросетевым наблюдателем скорости при показателях сопротивления обмоток в 1,25 от номинальных параметров.

Для полноты картины проведем исследовательский режим межвитковых замыканий обмотки статора. Полученные сравнительные результаты для системы с датчиком скорости, неадаптивным наблюдателем скорости и нейросетевым наблюдателем скорости приведены на **рис. 12**.

Обобщим полученные данные исследовательского режима нагрева, соответствующих изменений параметров и полученные ошибки показаний нейросетевого наблюдателя в **табл. 2**.

Аналогично для второго режима данные приведены в **табл. 3**.

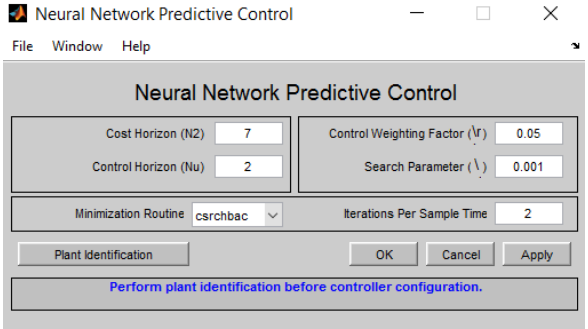


Рис. 10. Интерфейс пользователя регулятора с предуправлением

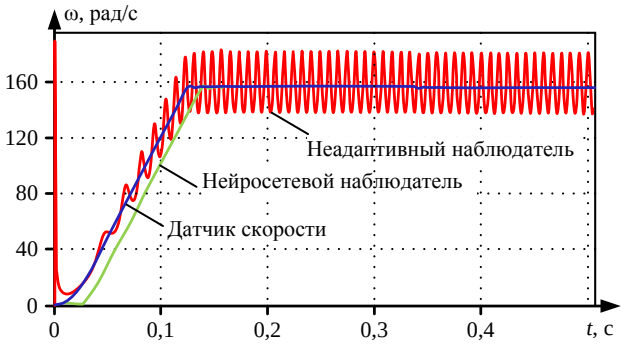


Рис. 11. Динамика скорости при имитационном режиме нагрева

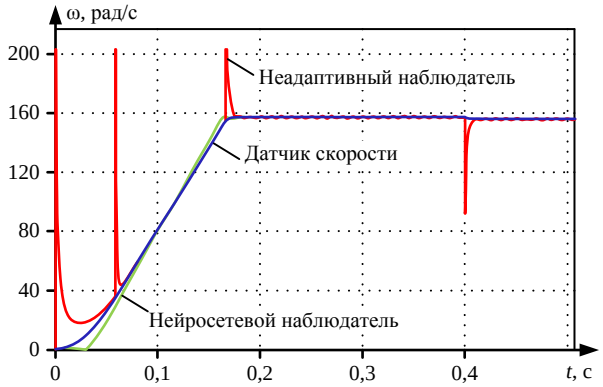


Рис. 12. Динамика скорости при имитационном режиме межвитковых замыканий

Таблица 2

Показания наблюдателя скорости в режиме нагрева

$R_{ротора}$, Ом	$R_{статора}$, Ом	Δω, %
0,0309	0,0336	0
0,032445	0,03528	$1{,}88\cdot10^{-6}$
0,03399	0,03696	$1{,}94\cdot10^{-6}$
0,035535	0,03864	$1{,}99\cdot10^{-6}$
0,03708	0,04032	$2{,}05\cdot10^{-6}$
0,038625	0,042	$2{,}11\cdot10^{-6}$

Таблица 3

Показания наблюдателя скорости в режиме межвитковых замыканий

$L_{намагничивания}$, Гн	$L_{статора}$, Гн	Δω, %
0,023716	0,023655	$2{,}2\cdot10^{-4}$
0,023232	0,02241	$2{,}28\cdot10^{-4}$
0,022748	0,021165	$3{,}1\cdot10^{-4}$
0,022264	0,01992	$4{,}78\cdot10^{-4}$

При анализе полученных данных четко прослеживается тенденция качественного повышения точности системы управления с нейросетевым наблюдателем, по сравнению с системой с наблюдателем классическим. Также, основываясь на характеристиках, делается вывод о существенном росте динамической стабильности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обобщая полученные результаты, можно сделать вывод о дальнейших серьезных перспективах применения нейросетевого подхода в концепции бездатчикового управления.

Анализируя характеристики, присущие полученному с использованием нейросетей наблюдателю, делается вывод о качественно возросших показателях системы управления. Также нейросетевой подход смог практически полностью компенсировать недостатки, характерные для наблюдателя, основанного на классическом математическом аппарате: низкую устойчивость к внешним динамическим воздействиям и шумам, критически неустойчивую работу в зоне низких скоростей, большую колебательность и длительность переходных процессов, а также неудовлетворительную точность статических характеристик.

Вариантом дальнейшего развития темы работы служит разработка расширенной модели нейросетевого наблюдателя с нейроструктурами, ориентированными на оценку различных параметров. Такой подход позволит сохранить преимущества, упомянутые ранее, с расширением функционала наблюдателя и возможностей системы управления, а также теоретически позволит отказаться не только от датчика скорости, но и от некоторых других датчиков параметров электропривода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сенцов Е.В., Мещеряков В.Н. Разработка адаптивного наблюдателя скорости векторного управления // Применение и развитие нейросетевого моделирования для решения фундаментальных задач в науке и технике: материалы Международной молодежной научно-практической конференции, Новочеркасск, 03–04 декабря 2018 года. Новочеркасск: ООО «Лик», 2018. С. 36-47.
2. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным управлением. М.: Академия, 2006. 256 с.
3. Новиков В.А., Савва С.В., Татаринцев Н.И. Электропривод в современных технологиях: учебник для студентов вузов. М.: Академия, 2014. 400 с.
4. Калачев Ю.Н. Векторное регулирование (заметки практики): методическое пособие. М.: ЭФО, 2013. 63 с.
5. Анучин А.С. Системы управления электроприводов: учебник для вузов. М.: Издательский дом МЭИ, 2015. 373 с.
6. Калачев Ю.Н. Наблюдатели состояния в векторном электроприводе (записки дилетанта). М., 2015. 60 с.
7. Виноградов А.Б. Векторное управление электроприводами переменного тока. Иваново: ГОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», 2008. 98 с.
8. Терехов В.М., Осипов О.И. Системы управления электроприводов: учебник для студ. высш. учеб. заведений. М.: Издательский центр «Академия», 2005. 304 с.
9. Исаков А.С. Реализация наблюдателя состояний асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором в бездатчиковой системе векторного управления // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. 2007. № 38. С. 280-286.
10. Усольцев А.А. Частотное управление асинхронными двигателями: учебное пособие. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2006. 94 с.
11. Виноградов А., Сибирцев А., Колодин И. Адаптивно-векторная система управления бездатчикового асинхронного электропривода серии ЭПВ // Силовая электроника. 2006. №3. С. 50-55.
12. Панкратов В.В., Котин Д.А. Адаптивные алгоритмы бездатчикового векторного управления асинхронными электроприводами подъемно-транспортных механизмов: учебное пособие. Новосибирск: НГТУ, 2012. 143 с.
13. Москаленко В.В. Электрический привод: учебное пособие для сред. проф. образования. М.: Издательский центр «Академия», 2004. 368 с.
14. Исследование параметрической робастности бездатчикового векторного асинхронного электропривода с идентификатором Калмана // С.В. Ланграф, А.С. Глазырин, Т.А. Глазырина, К.С. Афанасьев, В.В. Тимошкин // Известия ТПУ. 2010. Т. 317, № 4. С. 120-123.
15. Глазырин А.С. Бездатчиковое управление асинхронным электроприводом с синергетическим регулятором // Известия Томского политехнического университета. 2012. Т. 321, №4. С. 107-111.
16. Афанасьев К.С. Разработка наблюдателя состояния для асинхронного электропривода с повышенной параметрической робастностью: дис. … канд. тех. наук: 05.09.03 / Афанасьев Кирилл Сергеевич. Томск, 2015.
17. Вейнмейстер А.В. Косвенное измерение скорости вращения в электроприводе с асинхронным двигателем на основе идентификатора состояния: автореф. дис. … канд. тех. наук: 05.09.03 / Вейнмейстер Андрей Викторович. СПб., 2013.
18. Мещерякова О.В., Шишлин Д.И., Мещеряков В.Н. Применение нейронных сетей в промышленных агрегатах // Материалы XII международной научно-практической интернет-конференции: Энерго- и ресурсосбережение - XXI век. Орел: ОГУ, 2016. С. 243-245.
19. Raja M.A.Z., Abbas S., Syam M.I., Wazwaz A.W. Design of Neuro-Evolutionary Model for Solving Nonlinear Singularly Perturbed Boundary Value Problems // Applied Soft Computing. 2018. Vol. 62. Pp. 373-394. doi: 10.1016/j.asoc.2017.11.002
20. Fiser J., Sitek P., Vyhlidal T. Neutral PID Control Loop Investigated in Terms of Similarity Theory // IFAC-Papersonline. 2018. Vol. 51. No. 14. Pp. 212-217. doi: 10.1016/j.ifacol.2018.07.225
21. Vila J.-P., Wagner V. Predictive Neuro-Control of Uncertain Systems: Design and Use of a Neuro-Optimizer // Auto-

matice. 2003. Vol. 39. No. 5. Pp. 767-777. doi: 0.1016/S0005-1098(03)00005-0
22. Sinyukova T.V., Sentsov E.V., Sinyukov A.V. Neural Network Speed Observers // 1st International Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA), Lipetsk, Russia. 2019. Pp. 320-324. doi: 10.1109/SUMMA48161.2019.8947484
23. Shihabudheen K.V., Pillai G.N. Recent Advances in Neuro-Fuzzy System: A Survey // Knowledge-Based Systems. 2018. Vol. 152. Pp. 136-162. doi: 10.1016/j.knosys.2018.04.014
24. A Model for Predicting Wind Speed and the Probability of a Wind Gust / V.V. Dotsenko, E.V. Sentsov, A.M. Litvinenko, V.N. Mesherekov, S. Valtchev // Proceedings 3rd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA), Lipetsk, Russia. 2021. Pp. 576-579. doi: 10.1109/SUMMA53307.2021.9632142
25. Kubota H., Matsuse K., Nakano T. DSP-Based Speed Adaptive Flux Observer of Induction Motor // IEEE Trans. Ind. Applicat. 1993. Vol. 29. No 2. Pp. 344-348. doi: 10.1109/28.216542
26. Синюкова Т.В., Сенцов Е.В. Синтез идентификаторов частоты вращения ротора асинхронного двигателя, основанных на концепции NN // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2019. № 9. С. 13-20. doi: 10.25791/pribor.09.2019.870
27. Сенцов Е.В. Нейросетевые наблюдатели скорости асинхронного двигателя // Тенденции развития современной науки: сборник трудов научно-практической конференции студентов и аспирантов Липецкого государственного технического университета, Липецк. 2021. С. 109-113.
28. Sentsov E.V., Mesherekov V.N. Synthesis of a neuroregulator with predictive control of the electric drive of the actuators of technological units of metallurgical production // 18th International Scientific Technical Conference Alternating Current Electric Drives (ACED), Ekaterinburg, Russia. 2021. 9462259. doi: 10.1109/ACED50605.2021.9462259

Поступила в редакцию 30 марта 2022 г.

INFORMATION IN ENGLISH

NEURAL NETWORK SPEED OBSERVER DEVELOPMENT TO IMPROVE THE DYNAMIC STABILITY OF A SENSORLESS VECTOR CONTROL SYSTEM

Evgeny V. Sentsov

Postgraduate Student, Electric Drive Department, Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia, evgenysentsov@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0002-8383-5139

Victor N. Meshcheryakov

D.Sc. (Engineering), Professor, Head of the Electric Drive Department, Electric Drive Department, Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia, mesherek@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0003-0984-5133

The paper considers the problem of the speed observer indication influence on the vector control system of an asynchronous motor. The classification of applied sensorless control methods is given. The analysis of advantages and disadvantages of the most common structures for constructing velocity observers is carried out. Mathematical models of individual observers were developed and created in the Matlab Simulink software package. The work of the obtained models was tested in various modes, data on the drive dynamics were obtained. Conclusions are drawn about the work of observers based on the classical mathematical apparatus in situations associated with the change in any parameters of the controlled object. The concept of neural networks is considered as a tool capable of leveling the shortcomings of classical observers. The analysis of neurostructures suitable for control tasks of complex dynamic objects has been carried out. An element of the Neural Network Toolbox (Deep Learning Toolbox) library, Predictive Controller, was used as a neuroregulator. A model was built using the neurostructure as an observer. The process of data integration and adjustment of neural network parameters is described in detail. A study of the obtained control system behavior in dynamic modes was carried out. Also, the vector control system behavior, an adaptation mechanism was developed that takes into account the advantages and disadvantages of 2 different approaches to the implementation of velocity determination to create a model with a combined observer structure. A model with a combined observer structure based on a neural network and a classical observer is obtained. The behavior of the resulting control system in various simulation modes has been studied.

Keywords: simulation, variable speed drive, control system, vector control, asynchronous motor, Predictive controller, observers, sensorless vector control, learning, neural networks.

REFERENCES

1. Sentsov E.V., Meshcheryakov V.N. Development of an adaptive vector control velocity observer *Primenenie i razvitie neyrosetevogo modelirovaniya dlya resheniya fundamental'nykh zadach v nauke i tekhnike: materialy Mezhdunarodnoy molodezhnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [International Youth Scientific and Practical Conference "Application and development of neural network modeling for solving fundamental problems in science and technology"]. Novocherkassk, Lik LLC Publ., 2018, pp. 36-47. (in Russian)
2. Sokolovsky G.G. *Elektroprivody peremennogo toka s chastotnym regulirovaniem* [AC drives with frequency regulation]. Moscow, Academy Publ., 2006. 272 p. (In Russian)
3. Novikov V.A., Savva S.V., Tatarintsev N.I. *Elektroprivod v sovremennykh tekhnologiyakh* [Electric drive in modern technologies]. Moscow, Academy Publ., 2014. 400 p. (In Russian)
4. Kalachev Ju.N. *Vektornoe regulirovanie (zametki praktika)* [Vector regulation (practice notes)]. Moscow, JeFO Publ., 2013. 63 p. (in Russian)
5. Anuchin A.S. *Sistemy upravlenijaj elektroprivodov* [Electric drive control systems]. Moscow, MPEI Publishing House, 2015. 373 p. (in Russian)
6. Kalachev Ju.N. *Nabljudateli sostojanija v vektornom elektroprivode (zapiski diletanta)* [State observers in a vector electric drive (amateur notes)]. Moscow, 2015. 60 p. (in Russian)
7. Vinogradov A.B. *Vektornoeupravleniejelektroprivoda-mi peremennogotoka* [Vector control of AC drives]. Ivanovo, Ivanovo State Power Engineering University named after V.I. Lenin Publ., 2008. 98 p. (in Russian)
8. Terehov V.M., Osipov O.I. *Sistemy upravlenijaj elektroprivodov* [Electric drive control systems]. Moscow, Publishing Center "Academy", 2005. 304 p. (in Russian)
9. Isakov A.C. Implementation of the state observer for an in-

duction motor with a squirrel-cage rotor in a sensorless vector control system. *Nauchno-tekhnicheskiy vestnik SPbGU ITMO* [Scientific and technical bulletin. St. Petersburg State University ITMO], 2007, no. 38, pp. 280-286. (in Russian)
10. Usoltsev A.A. *Chastotnoe upravlenie asinhronnymi dvigateljami* [Frequency control of asynchronous motors]. St. Petersburg, St. Petersburg State University ITMO, 2006. 94 p. (in Russian)
11. Vinogradov A.B., Sibircev A., Kolodin I. Adaptive-vector control system for a sensorless asynchronous electric drive of the EPV series. *Silovaya elektronika* [Power electronics], 2006, no. 3, pp. 50-55. (in Russian)
12. Pankratov V.V., Kotin D.A. *Adaptivnye algoritmy bezdatchikovogo vektornogo upravlenija asinhronnymi elektroprivodami podyemno-transportnyh mehanizmov* [Adaptive algorithms for sensorless vector control of asynchronous electric drives of lifting and transport mechanisms]. Novosibirsk, NGTU, 2012. 143 p. (in Russian)
13. Moskalenko V.V. *Elektricheskij privod* [Electric drive]. Moscow, Publishing Center "Academy", 2004. 368 p. (in Russian)
14. Langraf S.V., Glazyrin A.S., Glazyrina T.A., Afanas'ev K.S., Timoshkin V.V. Investigation of the parametric robustness of a sensorless vector asynchronous electric drive with Kalman identifier. *Izvestiya TPU*. [Bulletin of TPU], 2010, vol. 317, no. 4, pp. 120-123. (in Russian)
15. Glazyrin A.S. Sensorless control of an asynchronous electric drive with a synergistic controller. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Tomsk Polytechnic University], 2012, vol. 321, no. 4, pp. 107-111. (in Russian)
16. Afanasev K.S. *Razrabotka nabljudatelja sostojanija dlja asinhronnogo elektroprivoda s povyshennoj parametricheskoj robastnostju.* Kand.Diss. [Development of a state observer for an asynchronous electric drive with increased parametric robustness. Kand.Diss.]. Tomsk, 2015. 106 p. (in Russian)
17. Vejnmejster A.V. *Kosvennoe izmerenie skorosti vrashhenija v elektroprivode s asinhronnym dvigatele na osnove identifikatora sostojanija.* Kand.Diss. [Indirect measurement of the rotation speed in an electric drive with an asynchronous motor based on the state identifier. Abstract of Kand.Diss.]. St. Petersburg, 2013. 17 p. (in Russian)
18. Meshheryakova O.V., Shishlin D.I., Meshheryakov V.N. Application of neural networks in industrial units. *Materialy XII mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy internet-konferentsii: Energo- i resursoaberezhenie - XXI vek* [XII International Scientific and Practical Internet Conference "Energy and Resource Saving - XXI century"]. Orel, OSU Publ., 2016, pp. 243-245. (in Russian)
19. Raja M.A.Z., Abbas S., Syam M.I., Wazwaz A.W. Design of Neuro-Evolutionary Model for Solving Nonlinear Singularly Perturbed Boundary Value Problemsю Applied Soft Computing, 2018, vol. 62, pp. 373-394.
20. Fiser J., Sitek P., Vyhlidal T. Neutral PID Control Loop Investigated in Terms of Similarity Theory. IFAC-Papers online. 2018. Vol. 51. No. 14.Pp. 212-217. doi: 10.1016/j.ifacol.2018.07.225
21. Vila J.-P., Wagner V. Predictive Neuro-Control of Uncertain Systems: Design and Use of a Neuro-Optimizer. Automatice. 2003, vol. 39, no. 5, pp. 767-777. doi: 0.1016/S0005-1098(03)00005-0
22. Sinyukova T.V., Sentsov E.V., Sinyukov A.V. Neural Network Speed Observers. 2019 1st International Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA). Lipetsk, Russia, 2019, pp. 320-324. doi: 10.1109/SUMMA48161.2019.8947484
23. Shihabudheen K.V., Pillai G.N. Recent Advances in Neuro-Fuzzy System: A Survey. Knowledge-Based Systems, 2018, vol. 152, pp. 136-162. doi: 10.1016/j.knosys.2018.04.014
24. Dotsenko V.V., Sentsov E.V., Litvinenko A.M., Mesheryakov V.N., Valtchev S. A Model for Predicting Wind Speed and the Probability of a Wind Gust. 2021 3rd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency, SUMMA 2021. Lipetsk, 2021, pp. 576-579. doi: 10.1109/SUMMA53307.2021. 9632142
25. Kubota H., Matsuse K., Nakano T. DSP-Based Speed Adaptive Flux Observer of Induction Motor. IEEE Trans. Ind. Applicat, 1993, vol. 29, no. 2, pp. 344-348. doi: 10.1109/28.216542
26. Sinjukova T.V., Sentsov E.V. Synthesis of the rotor frequency of the asynchronous rotor, based on the concept NN. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol, diagnostika.* [Instruments and systems. Management, control, diagnostics], 2019, no. 9, pp. 13-20. doi: 10.25791/pribor.09.2019.870 (in Russian)
27. Sentsov E.V. Neural network observers of the speed of an induction motor. *Tendentsii razvitiya sovremennoi nauki: sbornik trudov naucno-prakticheskoy konferentsii studentov i aspirantov Lipetskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Scientific and practical conference of students and graduate students of the Lipetsk State Technical University "Trends in the development of modern science"]. Lipetsk, Lipetsk State Technical University Publ., 2021, pp. 109-113. (in Russian)
28. SentsovE.V., Mesheryakov. V.N. Synthesis of a neuroregulator with predictive control of the electric drive of the actuators of technological units of metallurgical production. 18th International Scientific Technical Confer-ence Alternating Current Electric Drives, ACED 2021. Ekaterinburg, 2021, 9462259. doi: 10.1109/ACED50605. 2021.9462259

Сенцов Е.В., Мещеряков В.Н. Создание нейросетевого наблюдателя скорости для повышения динамической стабильности системы векторного бездатчикового управления // Электротехнические системы и комплексы. 2022. № 2(55). С. 18-24. https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-2(55)-18-24

Sentsov E.V., Meshcheryakov V.N. Neural Network Speed Observer Development to Improve the Dynamic Stability of a Sensorless Vector Control System. *Elektrotekhnicheskie sistemy i kompleksy* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2022, no. 2(55), pp. 18-24. (In Russian). https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-2(55)-18-24

УДК 621.314. 58:681.515 https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-2(55)-25-31

Букреев В.Г., Шандарова Е.Б., Быстров Е.А., Перевощиков Ф.В.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет

ВЕРИФИКАЦИЯ МОДЕЛИ ПРОТОТИПА АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА СПЕЦИАЛЬНОГО НАСОСНОГО АГРЕГАТА

В статье рассматриваются вопросы построения математической модели асинхронного электропривода (АЭП) в программной среде моделирования *Matlab/Simulink*, выступающего в качестве прототипа электропривода специального насосного агрегата большой мощности. Модель позволяет проводить расчёт статических и динамических характеристик при различных законах управления автономным инвертором напряжения (АИН). Для проведения процедуры верификации модели создана экспериментальная установка, которая включает: источник питания (ИП), сервоконтроллер (СК), предназначенный для управления частотно-регулируемым электроприводом с поддержкой информационных датчиков обратной связи, включающий в себя преобразователь частоты (ПЧ) с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ), кабельную линию (КЛ), асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором (АД), инкрементный угловой энкодер (ЭН) для измерения частоты вращения АД, вал которого посредством жесткой муфты соединен с валом генератора постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов (ГПТ), резистивную нагрузку. Получены результаты имитационного моделирования при скалярном способе частотного регулирования. В процессе проверки адекватности имитационной модели с экспериментальными данными учитывается нелинейность магнитной цепи АД. Установлено, что предложенная коррекция значений индуктивностей схемы замещения АД позволяет существенно снизить величину расхождения между моделью и экспериментальными данными в различных режимах работы АЭП. Так, например, для половинного значения частоты питающего напряжения среднеквадратичная ошибка между расчетными и экспериментальными данными тока статора и частоты вращения вала АД уменьшается соответственно при пуске – в 3,5 и 1,5 раза, в установившемся режиме – в 4,5 и 1,4 раза.

Ключевые слова: асинхронный электропривод, сервоконтроллер, скалярный способ частотного регулирования, нелинейность магнитных материалов, интерполяция Лагранжа, имитационное моделирование.

ВВЕДЕНИЕ

Взаимосвязь электромагнитных процессов, механических явлений и технологических факторов обуславливают высокие требования к регулируемым процессам в современных системах автоматизированного электропривода. Кроме того, следует учитывать как воздействия внутренних возмущений, например изменение электромеханических параметров привода, так и внешних возмущений – нестабильность напряжения питающей сети, изменение моментов нагрузки и трения [1, 2].

При проектировании асинхронного электропривода (АЭП) насосных агрегатов ответственного промышленного оборудования актуальным является выполнение определенных требований к виброакустическим характеристикам, связанных с пульсациями электромагнитного момента двигателя. Эти требования коррелируются с обязательным использованием технических решений в части отказоустойчивости и надежности электрических машин, рассмотренных, например, в [3-5].

Известно также, что при работе асинхронного двигателя (АД) в динамических режимах возникают повышенные токи и напряжения, что приводит к существенным потерям в кабельной линии и возникновению неустойчивых процессов в многомассовой электромеханической системе [6-9].

Кроме того, использование автономного инвертора напряжения (АИН) в качестве силового преобразователя в АЭП предполагает широтно-импульсный способ формирования выходного напряжения инвертора. Данный способ имеет ряд особенностей, которые обусловлены неидеальностью силовых ключей и дискретным заданием опорного сигнала, что приводит к искажениям синусоидальной формы выходного напряжения АИН [10, 11]. При этом наличие токов высших гармоник, создающих активные потери мощности, обуславливает перегрев электрооборудования, снижение коэффициента мощности, а также уменьшение электрического и механического КПД асинхронного двигателя [12, 13].

Отличительной особенностью приемо-сдаточных испытаний АЭП специальных технологических установок является сложность проведения тестовых испытаний совместно с механической нагрузкой для отработки эффективных алгоритмов управления, минимизирующих влияние параметрических и внешних возмущений.

Всё вышеперечисленное обосновывает необходимость создания экспериментальной установки АЭП и построение его адекватной математической модели для предварительного исследования не только законов регулирования, но и алгоритмов обработки данных измерительной информации, исследования статических и динамических режимов работы во всем диапазоне изменения механической нагрузки, проведения оценки спектрального состава тока и напряжения.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Рассматриваемая в данной работе экспериментальная установка содержит сервоконтроллер СК-ЭТ.380-5,5 производства АО «Томский электротехнический завод» (г. Томск), предназначенный для управления частотно-регулируемым электроприводом с поддержкой информационных датчиков обратной связи **(рис. 1)**.

© Букреев В.Г., Шандарова Е.Б., Быстров Е.А., Перевощиков Ф.В., 2022

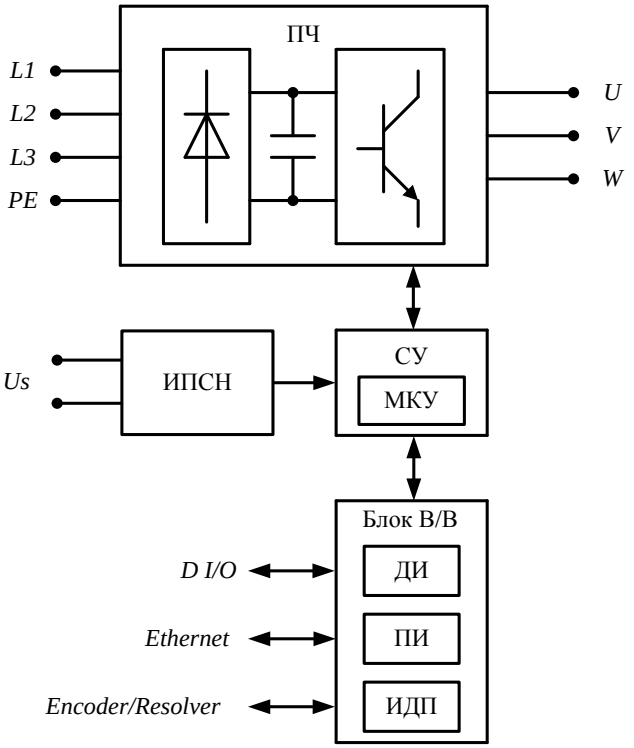


Рис. 1. Структурная схема сервоконтроллера

В состав сервоконтроллера (СК) входит преобразователь частоты (ПЧ), питание которого осуществляется трехфазной сетью 380 В (входные клеммы *L*1, *L*2, *L*3, *PE*), предназначенный для формирования переменного напряжения с требуемой амплитудой и частотой (выходные клеммы *U*, *V*, *W*).

Система управления (СУ) представляет собой микропроцессорный контроллер управления (МКУ) и производит управление работой всех узлов сервоконтроллера в соответствии с заложенной программой. СУ производит анализ текущих параметров работы (токов, напряжений), команд местного и дистанционного управления, формирует управляющие воздействия для преобразователя частоты, определяет возникновение аварийных режимов работы сервоконтроллера.

Источник питания собственных нужд (ИПСН) предназначен для преобразования входного напряжения 24 В постоянного тока (U_s) в напряжения питания электронных узлов схемы сервоконтроллера.

Блок ввода/вывода предназначен для ввода и обработки входных сигналов, а также формирования выходных сигналов и включает в себя следующие интерфейсы. Дискретный интерфейс (ДИ) предназначен для приема и передачи сигналов состояния управляемого объекта по цифровому интерфейсу входов/выходов *D I/O*. Интерфейс датчика положения (ИДП) выполняет функцию обработки сигналов с датчика положения (*Encoder/Resolver*), расположенного на валу электродвигателя. Последовательный интерфейс (ПИ) обеспечивает связь с внешними устройствами по интерфейсу *Ethernet* при работе сервоконтроллера в составе системы АСУ, обмен производится по протоколу *Modbus TCP/IP*.

Структурная схема экспериментальной установки представлена на **рис. 2**.

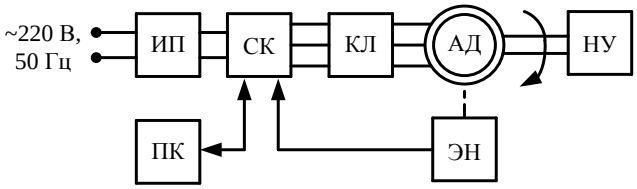


Рис. 2. Структурная схема экспериментальной установки

На вход регулируемого источника питания (ИП) постоянного тока ограниченной мощности поступает однофазное напряжение переменного тока. Выходное напряжение постоянного тока ИП подается на вход СК.

Кабельная линия (КЛ) в данной установке имеет сравнительно малую длину и при моделировании рабочих режимов рассматривается как линия с сосредоточенными параметрами. Общая система дифференциальных уравнений, учитывающая влияние кабельной линии в нормальной форме Коши:

$$\begin{aligned}
&\frac{di_{k_\alpha}(t)}{dt}=\frac{1}{L_K}\left(U_{\text{вх}_\alpha}(t)-i_{k_\alpha}(t)R_{1K}-U_{s\alpha}(t)\right);\\
&\frac{dU_{s\alpha}(t)}{dt}=\frac{1}{C_K}\left(i_{k_\alpha}(t)-\frac{U_k(t)}{R_{2K}}-i_{s\alpha}(t)\right),\\
&\frac{di_{k_\beta}(t)}{dt}=\frac{1}{L_K}\left(U_{\text{вх}_\beta}(t)-i_{k_\beta}(t)R_{1K}-U_{s\beta}(t)\right);\\
&\frac{dU_{s\beta}(t)}{dt}=\frac{1}{C_K}\left(i_{k_\beta}(t)-\frac{U_k(t)}{R_{2K}}-i_{s\beta}(t)\right),
\end{aligned}\qquad(1)$$

где $i_{k_\alpha}(t)$, $i_{k_\beta}(t)$ – составляющие тока в кабельной линии; L_K – индуктивное сопротивление кабельной линии; $U_{\text{вх}_\alpha}(t)$, $U_{\text{вх}_\beta}(t)$ – составляющие напряжения на входе кабельной линии; $U_{s\alpha}(t)$, $U_{s\beta}(t)$ – составляющие напряжения на выходе кабельной линии; R_{1K} – активное сопротивление кабельной линии; C_K – емкостное сопротивление кабельной линии; $U_k(t)$ – падение напряжения на изоляции; R_{2K} – сопротивление изоляции.

Напряжение, поступающее на обмотку статора АД типа 4АМА71В8У3, формируется сервоконтроллером с пространственно-векторной широтно-импульсной модуляцией (ШИМ). Данный метод ШИМ используется в подавляющем большинстве современных ПЧ благодаря снижению динамических потерь за счет меньшего количества коммутаций ключей АИН за период, а также максимального использования запаса напряжения звена постоянного тока без искажения формы выходного тока.

Управление режимом работы ПЧ осуществляется путем подачи сигналов управления, поступающих с автоматизированного рабочего места оператора *SCADA*-системы, которое представляет собой персональный компьютер (ПК) с предустановленным лицензионным программным обеспечением *TetzBIOS*.

Для измерения частоты вращения вала АД используется инкрементный угловой энкодер ЛИР-158А (ЭН).

Нагрузочное устройство (НУ) представляет собой

генератор постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов (ГПТ) типа ДПУ-127-450-1-57-Д43, работающий на активную нагрузку, вал которого посредством жесткой муфты соединен с валом АД.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

При построении систем управления асинхронными электроприводами используется, в основном, математическое описание АД. Для анализа динамики АД целесообразно использовать неподвижную систему координат, наиболее адекватно соответствующую процессам в реальном двигателе [14]. Система уравнений имеет следующий вид:

$$\begin{cases} \dfrac{di_{s\alpha}}{dt} = \dfrac{1}{L_e(f)} \times \\ \times\left(U_{s\alpha} - R_e i_{s\alpha} + A_r(f) K_r \psi_{r\alpha} + \omega_r K_r Z_p \psi_{r\beta}\right); \\ \dfrac{di_{s\beta}}{dt} = \dfrac{1}{L_e(f)} \times \\ \times\left(U_{s\beta} - R_e i_{s\beta} + A_r(f) K_r \psi_{r\beta} - \omega_r K_r Z_p \psi_{r\alpha}\right); \\ \dfrac{d\psi_{r\alpha}}{dt} = K_r R_r i_{s\alpha} - A_r(f)\psi_{r\alpha} - \omega_r Z_p \psi_{r\beta}; \\ \dfrac{d\psi_{r\beta}}{dt} = K_r R_r i_{s\beta} - A_r(f)\psi_{r\beta} + \omega_r Z_p \psi_{r\alpha}; \\ M_э = \dfrac{3}{2} Z_p K_r \left(i_{s\beta}\psi_{r\alpha} - i_{s\alpha}\psi_{r\beta}\right); \\ J_\Sigma \dfrac{d\omega_r}{dt} = M_э - M_c, \end{cases} \quad (2)$$

где $U_{s\alpha}$ – составляющая напряжения статора по оси α; $U_{s\beta}$ – составляющая напряжения статора по оси β; $i_{s\alpha}$, $i_{s\beta}$ – составляющие тока статора; $\psi_{r\alpha}$, $\psi_{r\beta}$ – составляющие потокосцепления ротора; $M_Э$ – электромагнитный момент двигателя; M_C – момент статического сопротивления на валу двигателя, включая собственный момент трения двигателя; J_Σ – момент инерции двигателя; Z_p – число пар полюсов; ω_r – угловая скорость вращения двигателя; $L_e(f) = L_s(f) - L_m^2(f) / L_r(f)$, $R_e = R_s + R_r K_r^2$, $A_r(f) = R_r / L_r(f)$, $K_r = L_m(f) / L_r(f)$ – коэффициенты, учитывающие параметры АД; R_s – активное сопротивление обмотки статора; R_r – приведенное к обмотке статора активное сопротивление обмотки ротора; $L_m(f) = K_x(f)\, L_{m0}$ – полная индуктивность контура намагничивания; L_{m0} – расчетное значение полной индуктивности контура намагничивания по паспортным данным; $L_r(f) = K_x(f)\, L_{r0}$ – полная индуктивность обмотки ротора; L_{r0} – расчетное значение полной индуктивности обмотки ротора по паспортным данным; $L_s(f) = K_x(f)\, L_{s0}$ – полная индуктивность обмотки статора; L_{s0} – расчетное значение полной индуктивности обмотки статора по паспортным данным; $K_x(f)$ – корректирующий коэффициент, учитывающий нелинейность кривой намагничивания магнитных элементов АД в функции частоты питающего напряжения.

Данная система уравнений позволяет получить структурную схему имитационной модели **(рис. 3).**

На основе исходных и экспериментальных данных реальной установки в программной среде моделирования *Matlab/Simulink* разработана имитационная модель **(рис. 4)**, позволяющая с достаточной точностью моделировать основные режимы работы АЭП при различных законах управления АИН [15].

Блок «Система управления» **(рис. 5)** содержит:

– задатчик интенсивности, который формирует кривую и темп разгона двигателя;

– преобразователь частота-напряжение, который формирует требуемую зависимость скалярного управления между частотой и напряжением преобразователя, то есть устанавливает принятый способ частотного регулирования;

– координатный преобразователь, формирующий из постоянных сигналов типа частота/напряжение переменный сигнал управления.

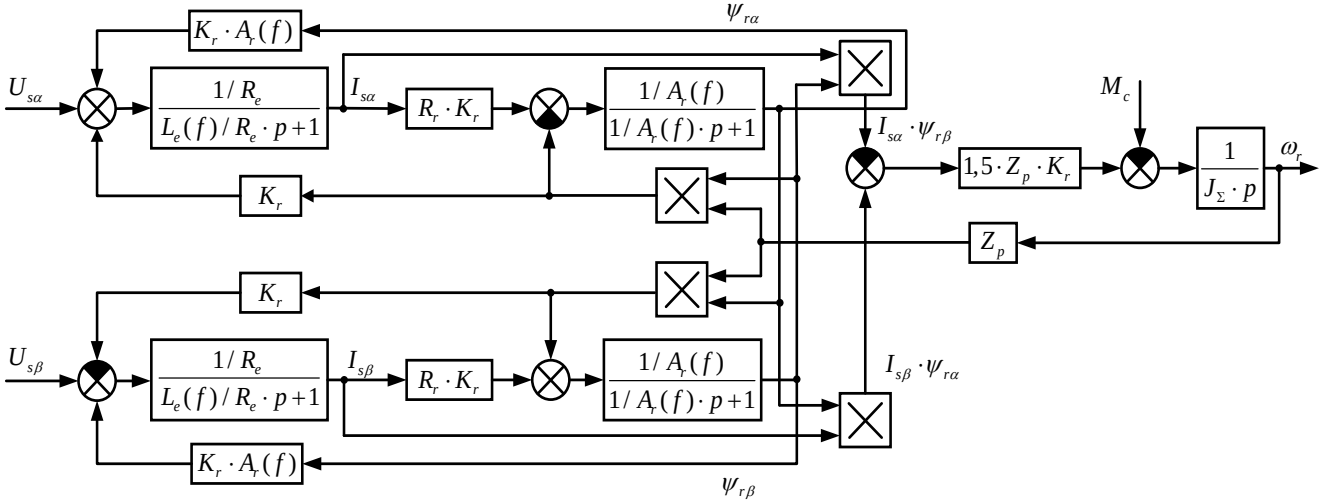


Рис. 3. Структурная схема имитационной модели АД в неподвижной системе координат *α-β*

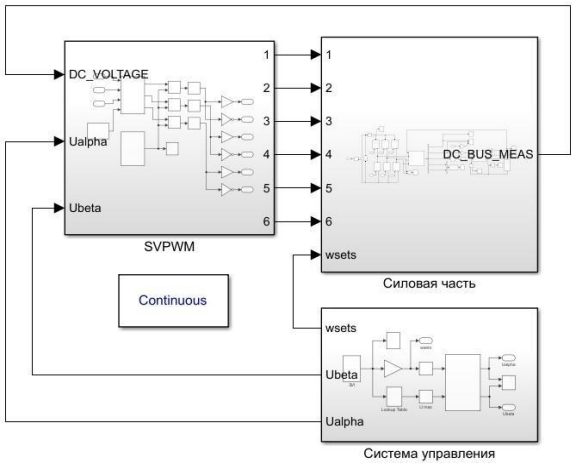


Рис. 4. Имитационная модель электропривода в программной среде моделирование *Matlab/Simulink*

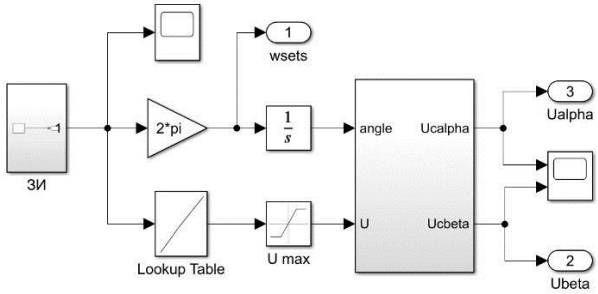


Рис. 5. Блок «Система управления»

Блок «SVPWM», в котором реализован метод пространственно-векторной ШИМ, генерирует модулирующие напряжения **(рис. 6)** [10,11].

Механическая и электрическая части электропривода представлены в блоке «Силовая часть» **(рис. 7)**. Параметры схемы замещения АД определены по каталожным данным [16].

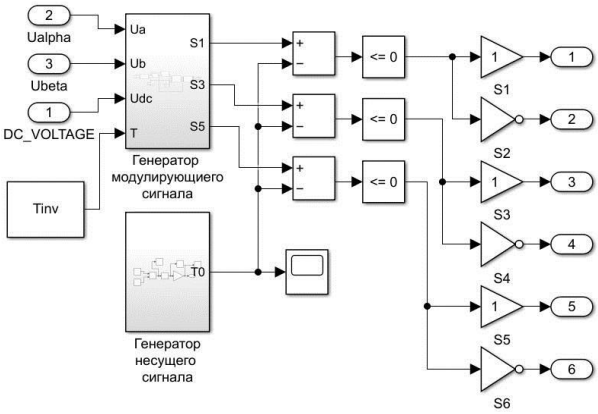


Рис. 6. Блок «*SVPWM*»

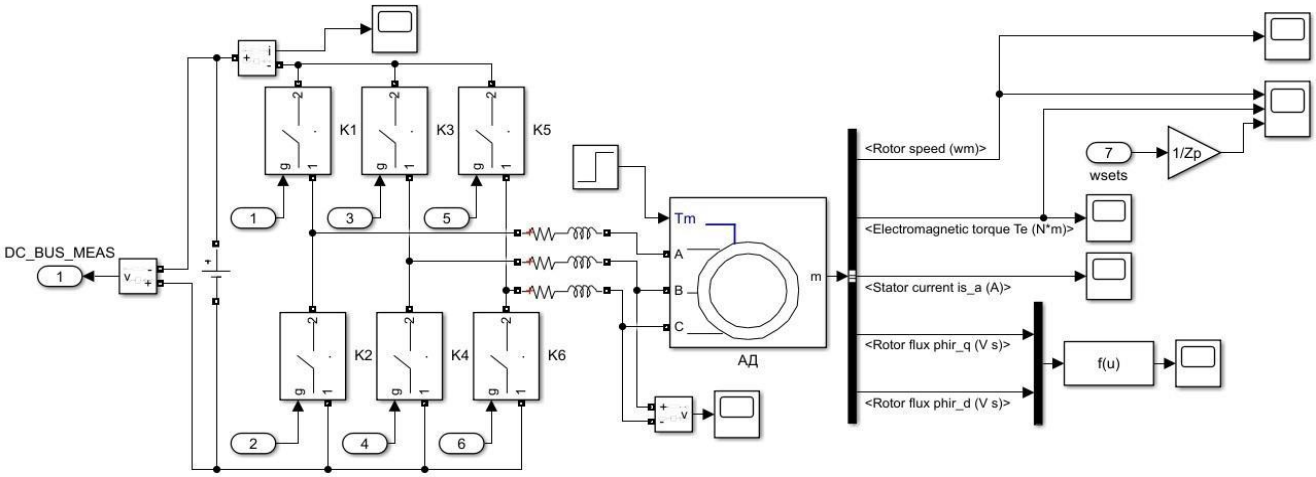


Рис. 7. Блок «Силовая часть»

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

На **рис. 8 и 9** представлены результаты моделирования работы экспериментальной установки при пуске и работе в установившемся режиме для $f_н$ и $0{,}5f_н$ соответственно. Для оценки адекватности математической модели приведены данные, полученные с экспериментальной установки при аналогичных режимах работы. Значения рассогласований, лежащих в малой окрестности их абсолютного минимума, можно получить варьированием коэффициента $K_x(f)$ системы уравнений (2) [17].

В **таблице** приведены данные по относительной погрешности частоты вращения и тока статора, полученных по выражениям (2) при различных значениях частоты питающего напряжения. Анализ полученных данных подтверждает адекватность представленной модели.

Значение ошибок ε вычислялось как среднее арифметическое от поэлементного относительного рассогласования экспериментального и модельного массива данных скорости и модуля обобщенного вектора тока статора:

$$\varepsilon_\omega = \frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N}\frac{\left|\omega_{j\,эксп} - \omega_{j\,модель}\right|}{\omega_{j\,эксп}}\cdot 100\%; \qquad (3)$$

$$\varepsilon_i = \frac{1}{M}\sum_{i=1}^{M}\frac{\left|I_{i\,эксп} - I_{i\,модель}\right|}{I_{i\,эксп}}\cdot 100\%, \qquad (4)$$

где N – количество значений массива скорости; $\omega_{j\,эксп}$ – значение частоты вращения, полученное с экспериментального стенда; $\omega_{j\,модель}$ – значение частоты

вращения, полученное в процессе моделирования системы; M – количество значений массива тока; $I_{i\text{эксп}}=\sqrt{i^2_{a_{i\text{эксп}}}+i^2_{b_{i\text{эксп}}}+i^2_{c_{i\text{эксп}}}}$; $i_{a_{i\text{эксп}}}$, $i_{b_{i\text{эксп}}}$, $i_{c_{i\text{эксп}}}$ – мгновенные значения токов, полученные с экспериментального стенда; $i_{a_{i\text{модель}}}, i_{b_{i\text{модель}}}, i_{c_{i\text{модель}}}$ – мгновенные значения токов, полученные в процессе моделирования системы; $I_{i\text{модель}}=\sqrt{i^2_{a_{i\text{модель}}}+i^2_{b_{i\text{модель}}}+i^2_{c_{i\text{модель}}}}$.

В ходе минимизации вышеописанных ошибок были получены значения K_x для всех частот из исследуемого набора **(рис. 10)**.

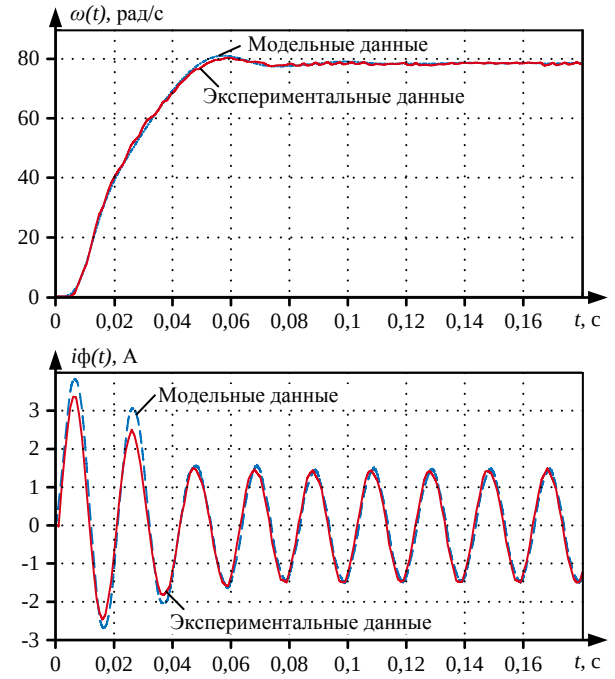


Рис. 8. Частота вращения вала и фазный ток статора АД при $f_н$

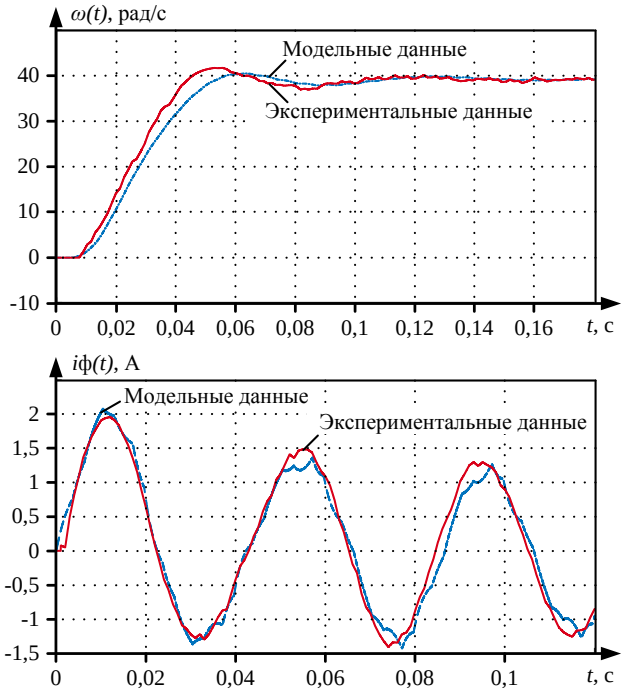


Рис. 9. Частота вращения вала и фазный ток статора АД при $0{,}5f_н$

Относительная погрешность данных эксперимента и модели

Значение частоты питающего напряжения	Ошибка ε с коррекцией значений индуктивности, %		Ошибка ε без коррекции значений индуктивности, %	
	ε_i	ε_ω	ε_i	ε_ω
Пуск				
$f_н$	19,78	5,17	12,91	26,85
$5f_н/6$	18,35	12,63	15,12	9,27
$2f_н/3$	23,46	19,48	113,3	20,03
$f_н/2$	15,79	20,49	58,24	29,61
$f_н/3$	21,78	24,46	100,6	17,35
Установившийся режим работы				
$f_н$	3,75	0,43	29,65	1,15
$5f_н/6$	4,16	1,44	14,26	1,49
$2f_н/3$	9,72	2,88	47,09	2,10
$f_н/2$	8,57	0,81	38,85	1,15
$f_н/3$	6,35	1,61	117,8	1,64

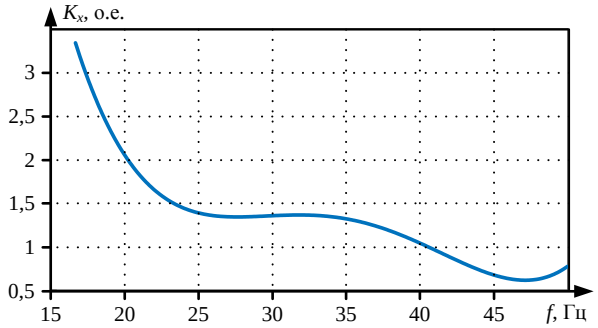


Рис. 10. Зависимость корректирующего коэффициента индуктивностей электромагнитной системы АД от частоты питающего напряжений

В свою очередь, для получения непрерывной зависимости предлагается полученные узлы интерполировать многочленом Лагранжа, достоинства и применимость которого рассмотрена в статье [18]. Явный вид кривой задается как

$$K_x(f)=\sum_{j=1}^{n=5}K_{x_j}\left(\prod_{\substack{m=1\\ m\neq j}}^{n=5}\frac{f-f_m}{f_j-f_m}\right), \qquad (5)$$

где K_x=(3,3333; 1,3793; 1,3333; 0,8696; 0,7143),
f= (16,67; 25; 33,33; 41,667; 50).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе предложена методика получения математической модели асинхронного двигателя, параметры которой перенастраиваются в зависимости от частоты питающего напряжения.

В результате проведенных исследований разработана имитационная модель АЭП в программной среде моделирования *Matlab/Simulink*, позволяющая проводить расчёт основных режимов работы электропривода, включая динамические, при различных законах управления АИН. Проведена проверка адекватности данной имитационной модели путем сравнения с экспериментальными данными.

В процессе исследований установлено, что предложенная коррекция значений индуктивностей схемы

замещения АД позволяет существенно снизить величину расхождения между моделью и экспериментальными данными в различных режимах работы двигателя. В большей степени это проявляется на частотах питающего напряжения в окрестности половины от номинального значения. Так, например, для $0{,}5f_н$ токовая и частотная ошибка в момент пуска снизилась, соответственно в 3,5 и 1,5 раз, в установившемся режиме - в 4,5 и 1,4 раза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шрейнер Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты. Екатеринбург: УРО РАН, 2000. 654 с.
2. Лазарев Г.Б. Частотно-регулируемый электропривод насосных и вентиляторных установок // Силовая электроника. 2007. № 3. С. 41-48.
3. Гаврилов Д.П., Барабанов В.Г. Разработка и исследование системы управления насосной установкой // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». 2017. Т. 17. № 2. С. 11-19. doi: 10.14529/engin170202.
4. Груздев К.П., Панин В.В. Применение частотно-регулируемого привода как способ повышения энергосбережения // Энергоэффективность и энергосбережение в современном производстве и обществе: матер. междунар. науч.-практ. конф. Воронеж: Воронежский ГАУ, 2018. С. 66-69.
5. Зайцев Д.Ю., Пикалов А.А., Прибылова Н.В. Энергосберегающие режимы работы асинхронных электродвигателей // Инновационные технологии и технические средства для АПК: матер. междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых и специалистов. Воронеж: Воронежский ГАУ, 2017. С. 222-225.
6. Анучин А.С. Системы управления электроприводов: учебник для вузов. М.: Издательский дом МЭИ, 2015. 373 с.
7. Виноградов А.Б. Учет потерь в стали, насыщения и поверхностного эффекта при моделировании динамических процессов в частотно-регулируемом асинхронном электроприводе // Электротехника. 2005. №5. С. 56-61.
8. Егоров А.В., Ершов М.С. Экспериментальное исследование устойчивости асинхронных частотно-регулируемых приводов при кратковременных провалах напряжения // Промышленная энергетика. 2018. № 4. С. 9-12.
9. Шандарова Е.Б., Букреев В.Г., Быстров Е.А. Имитационное моделирование асинхронного электропривода насоса погружного технологического оборудования // Электротехнические системы и комплексы. 2021. № 4(53). С. 13-18. doi: 10.18503/2311-8318-2021-4(53)-13-18.
10. Обухов С.Г., Чаплыгин Е.Е., Кондратьев Д.Е. Широтно-импульсная модуляция в трехфазных инверторах напряжения // Электричество. 2008. № 7. С. 23-31.
11. Плотников Ю.В., Уймин Ю.С. Особенности реализации векторной ШИМ для микропроцессоров TMS320 // Труды третьей научно-технической конференции молодых ученых Уральского энергетического института. Екатеринбург: УрФУ, 2018. С. 232-236.
12. Богданов А.А., Быстров Е.А. Анализ влияния алгоритмов и режимов работы трехфазного инвертора на спектральный состав выходных токов // Электронные и электромеханические системы и устройства: сб. науч. тр. Томск: Изд-во Томского гос. ун-та, 2021. С. 210-214.
13. Зиновьев Г.С. Силовая электроника: учебное пособие для бакалавров. М.: Изд-во Юрайт, 2015. 667 с.
14. Control system with sinusoidal PWM three-phase inverter with a frequency scalar control of induction motor / Y.N. Dementyev, N.V. Kojain, A.D. Bragin, L.S. Udut // International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), 2015. Pp. 1-6. doi: 10.1109/SIBCON.2015.7147008.
15. Удут Л.С., Чернышев А.Ю., Гусев Н.В. Разработка и моделирование асинхронных электроприводов со скалярным управлением // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2015. № 3. С. 43-49.
16. Чернышев А.Ю., Чернышев И.А. Определение параметров схемы замещения асинхронного двигателя по каталожным данным // Электромеханические преобразователи энергии: Материалы международной научно-технической конференции. Томск: Изд-во ТПУ, 2007. С. 269-272.
17. Дудкин А.Н., Ким. В.С. Электротехническое материаловедение: учеб. пособие. Санкт-Петербург: Лань, 2017. 199 с.
18. Определение параметров ПИ-регулятора системы управления сложным технологическим объектом в режиме реального времени / В.В. Нгуен, А.А. Шилин, В.Г. Букреев, Ф.В. Перевощиков // Доклады ТУСУР. 2021. Т. 24. №2. С. 56-63. doi: 10.21293/1818-0442-2021-24-2-56-63

Поступила в редакцию 14 марта 2022 г.

INFORMATION IN ENGLISH

VERIFICATION OF INDUCTION MOTOR DRIVE PROTOTYPE MODEL FOR SPECIAL PUMPING UNIT

Victor G. Bukreev

D.Sc. (Engineering), Professor, School of Energy & Power Engineering, National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia, shandarovaelena@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-9861-9765

Elena B. Shandarova

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, School of Energy & Power Engineering, National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia, shandarovaelena@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-7473-2771

Evgeniy A. Bystrov

Postgraduate Student, School of Energy & Power Engineering, National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia, bystrov-evgen@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-1829-6845

Filipp V. Perevoshchikov

Undergraduate Student, School of Energy & Power Engineering, National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia, fvp2@tpu.ru, https://orcid.org/0000-0002-7932-2744

The article is devoted to creation of induction motor drive (IMD) mathematical model in the Matlab/Simulink simulation environment, which serves as a prototype of the electric drive for a special high-power pumping unit. The model makes it possible to calculate static and dynamic characteristics at different control laws of voltage source inverter (VSI). To verify the model, the experimental setup was created, which includes a power source (PS), a servocontroller (SC) designed to control a frequency-controlled electric drive with support of information feedback sensors, which includes a frequency converter (FC) with the method of pulse-width modulation (PWM), cable line (CL), a low power squirrel cage induction motor (IM), rotary incremental encoder (EN) to measure the speed of IM, whose shaft is connected to the shaft of DC generator with permanent magnetic excitation (DCG) through a rigid coupling, resistive load. Simulation results were obtained for the scalar method of frequency control. In the process of adequate simulation model validation with experimental data, the nonlinearity of the motor magnetic circuit is taken into account. It was found that the proposed correction of the motor equivalent circuit inductances allows us to significantly reduce the value of difference between the model and the experimental data in different modes of motor operation. Thus, for example, for a half value of the supply voltage frequency, the mean square error between the calculated and experimental data for stator current and motor speed decreased by 3.5 and 1.5 times, respectively, at starting and 4.5 and 1.4 times in steady-state mode.

Keywords: induction motor drive, servocontroller, scalar control on speed drive, nonlinearity of magnetic materials, Lagrange polynomial, simulation modeling.

REFERENCES

1. Shreyner R.T. *Matematicheskoe modelirovanie elektroprivodov peremennogotoka s poluprovodnikovymi preobrazovatelyami chastoty* [Mathematical modeling of AC drives with semiconductor frequency converters]. Ekaterinburg, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences Publ., 2000. 654 p. (In Russian)
2. Lazarev G.B. Frequency-regulated electric drive of pump and fan systems. *Silovaya elektronika* [Power electronics], 2007, no. 3, pp. 41–48. (In Russian)
3. Gavrilov D.P., Barabanov V.G. Development and research of the control system for the pumping unit. *Vestnik YuUrGU. Seriya «Mashinostroenie»* [Bulletin of the SUSU. Series "Mechanical engineering industry"], 2017, vol. 17, no. 2, pp. 11–19. doi: 10.14529/engin170202 (In Russian)
4. Gruzdev K.P., Panin V.V. Application of frequency-controlled drive as a way to increase power efficiency. *Energoeffektivnost i energosberezhenie v sovremennom proizvodstve i obshchestve* [International scientific and practical conference "Energy Efficiency and Energy Saving in Modern Production and Society"]. Voronezh, VSAU Publ., 2018, pp. 66-69. (In Russian)
5. ZaytsevD.Yu., Pikalov A.A., Pribylova N.V. Energy-saving operation modes of asynchronous electric motors. *Innovatsionnye tekhnologii i tekhnicheskie sredstva dlya APK* [International scientific and practical conference of young scientists and specialists "Innovative technologies and technical means for the agro-industrial complex"]. Voronezh, VSAU Publ., 2017, pp. 222-225. (In Russian)
6. Anuchin A.S. *Sistemy upravleniya elektroprivodov* [Electric drive control systems]. Moscow, MPEI Publ., 2015. 373 p. (In Russian)
7. Vinogradov A.B. Consideration of steel losses, saturation and surface effects in modeling dynamic processes in frequency-controlled induction motor drive. *Elektrotekhnika* [Electrical engineering], 2005, no. 5, pp. 56-61. (In Russian)
8. Egorov A.V., Ershov M.S. Experimental study of the stability of frequency-regulated induction motor drives under short-term voltage drops. *Promyshlennaya energetika* [Industrial power engineering], 2018, no. 4, pp. 9-12. (In Russian)
9. Shandarova E.B., Bukreev V.G., Bystrov E.A. Simulation modeling of induction motor drive of a submersible technological equipment pump. *Elektrotekhnicheskie sistemy i kompleksy* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2021, no. 4(53), pp. 13-18. doi: 10.18503/2311-8318-2021-4(53)-13-18 (In Russian)
10. Obukhov S.G., Chaplygin E.E., Kondratiev D.E. Pulse width modulation in three-phase voltage inverters. *Elektrichestvo* [Electricity], 2008, no. 7, pp. 23-31. (In Russian)
11. Plotnikov Yu.V., Uymin Yu.S. Features of vector PWM implementation for TMS320 microprocessors. *Trudy tretey nauchno-tekhnicheskoy konferentsii molodykh uchenykh Uralskogo energeticheskogo institute* [Proceedings of the Third Scientific and Technical Conference of Young Scientists of the Ural Power Engineering Institute] Ekaterinburg, URFU Publ., 2018, pp. 232-236. (In Russian)
12. Bogdanov A. A., Bystrov E. A. Analysis of the influence of algorithms and operating modes of a three-phase inverter on the spectral composition of output currents. *Sbornik naucnykh trudov "Elektronnye i elektromekhanicheskie sistemy i ustroystva"* [Materials of scientific papers "Electronic and electromechanical systems and devices"]. Tomsk, TSU Publ., 2021, pp. 210-214. (In Russian)
13. Zinoviev G.S. *Silovaya elektronika* [Power electronics]. Moscow, Yurayt Publ., 2015. 667 p. (In Russian)
14. Dementyev Y.N., Kojain N.V., Bragin A.D., Udut L.S. Control system with sinusoidal PWM three-phase inverter with a frequency scalar control of induction motor. 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). 2015. Pp. 1-6. doi: 10.1109/SIBCON.2015.7147008
15. Udut L.S., Chernyshev A.Yu., Gusev N.V. Development and modeling of induction motor drives with scalar control. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika* [Russian Electromechanics], 2015, no. 3, pp. 43-49. (In Russian)
16. Chernyshev A.Yu., Chernyshev I.A. Determination of parameters of induction motor circuit according to catalog data. *Jelektromehanicheskie preobrazovateli jenergii* [International Scientific and Technical Conference " Electromechanical power converters"]. Tomsk, TPU Publ., 2007, pp. 269–272. (In Russian)
17. Dudkin A.N., Kim V.S. *Elektrotekhnicheskoe materialovedenie: uchebnoe posobie* [Electrotechnical Materials Science]. St. Petersburg, Lanbook Publ., 2017. 199 p. (In Russian)
18. Nguyen V.V., Shilin A.A., Bukreev V.G., Perevoshchikov F.V., Bryantsev A.A. Synthesis of regulators of the drying plant control system based on statistical data. *Doklady TUSUR* [Proceedings of TUSUR University], 2021, vol. 24, no. 2, pp. 56–63. doi: 10.21293/1818-0442-2021-24-2-56-63 (In Russian)

Верификация модели прототипа асинхронного электропривода специального насосного агрегата / В.Г. Букреев, Е.Б. Шандарова, Е.А. Быстров, Ф.В. Перевощиков // Электротехнические системы и комплексы. 2022. № 2(55). С. 25-31. https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-2(55)-25-31

Bukreev V.G., Shandarova E.B., Bystrov E.A., Perevoshchikov F.V. Verification of Induction Motor Drive Prototype Model for Special Pumping Unit. *Elektrotekhnicheskie sistemy i kompleksy* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2022, no. 2(55), pp. 25-31. (In Russian). https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-2(55)-25-31

ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА, АВТОМАТИКА И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

УДК 004.896 https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-2(55)-32-39

Черный С.П., Соловьев В.А., Бузикаева А.В., Сухоруков С.И.

Комсомольский-на-Амуре государственный университет

ОДИН ИЗ ПОДХОДОВ К МОДЕЛИРОВАНИЮ ДВУХКАСКАДНОЙ НЕЧЕТКОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ПОСТОЯННОГО ТОКА С ДВУХЗОННЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ СКОРОСТИ

В работе представлено моделирование интеллектуальной системы управления электроприводом (СУЭП) постоянного тока с двухзонным регулированием скорости с применением теории нечетких множеств. Реализована развитая нечеткая СУЭП с двухзонным регулированием скорости. Представлен сравнительный анализ результатов моделирования интеллектуальной системы управления и системы электропривода с применением классических подходов настройки регуляторов, а также выявлены достоинства и недостатки использования мягких вычислений в системе интеллектуального управления электроприводом постоянного тока. Исследованы динамические характеристики классической и интеллектуальной систем управления. Внедрение многокаскадности нечеткого регулятора в интеллектуальные системы управления, где внешний каскад нечеткого модуля рассматривается в роли экспертной системы, управляющей регуляторами вложенного каскада, позволяет снизить информационную нагрузку продукционной базы знаний, количество лингвистических переменных, а также сократить алгоритмическую сложность в блоках фаззификации и дефаззификции. Алгоритмы и процедуры, применяемые в многокаскадных нечетких регуляторах, могут быть использованы в качестве модулей прогнозирования в развитых объектах автоматизации, например в системах управления электроприводами с двухзонным регулированием, а также аналогичных технологических процессах, применяемых в электроэнергетике, робототехнике и на транспорте. Данный подход позволяет нечеткой многокаскадной системе управления сочетать различные структурные решения по настройке регуляторов, получая при этом качественные характеристики переходных процессов, и расширять интеллектуальные возможности нечетких систем управления путем их структурного и функционального объединения в многокаскадные структуры для решения задач регулирования сложными технологическими процессами в условиях многокритериальности, многозадачности и многокоординатности.

Ключевые слова: система управления электроприводом, двухзонное регулирование, алгоритмы нечеткого вывода, нечеткий логический регулятор.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время широкое распространение получают интеллектуальные системы управления и принятия решений [1]. Проектирование систем регулирования с применением мягких вычислений представляет собой проблему, не поддающуюся алгоритмизации. Нечеткие подходы при разработке систем управления целесообразно использовать в тех случаях, когда при описании технических систем присутствует некоторая неопределенность, которая существенно затрудняет применение точных количественных методов. Для большинства сложных систем достаточно трудно обеспечить полную наблюдаемость объекта управления. Кроме того, для таких систем управления весьма сложно получить полное математическое описание объекта, что приводит к необходимости принимать существенное количество допущений, которые в значительной степени приводят к снижению как статических, так и динамических показателей системы.

В таких проблемных ситуациях системы управления на базе нечеткой логики дают более адекватные результаты по сравнению с классическими подходами без существенной потери качества управления. Синтез нечеткого регулятора может осуществляться на основе общих представлений эксперта или специалиста о поведении системы [2].

В настоящее время системы, построенные на принципах нечеткой логики, находят свое применение во многих сферах человеческой деятельности и области их использования постоянно расширяются. Такие системы используются при управлении сложными технологическими процессами, при управлении бизнес-процессами, в системах поддержки принятия решений, при создании различных приборов и бытовой техники [3].

На сегодняшний день базовым звеном большинства технологических объектов составляет регулируемый электропривод. Это обусловлено целым спектром достоинств такого типа преобразователя энергии. Однако и данному виду регулируемого элемента как составляющей системы управления присущ ряд недостатков, которые выступают в виде сдерживающих факторов.

Для целого ряда технологических механизмов (концевые моталки, прокатные станы, металлорежущие станки и т.п.) в качестве преобразователя электрической энергии в механическую используются электроприводы постоянного тока с двухзонным регулированием скорости. Двухзонное регулирование скорости систем электропривода применяется в производственных механизмах, у которых работа на скорости выше номинальной происходит с малым моментом сопротивления на валу и, наоборот, на низкой скорости необходимо наиболее высокое (номинальное) значение момента. Использование двухзонного регулирования связано, прежде всего, с требованием повышения скорости обработки изделий и тем самым повышения производительности или рядом технологических требований [4].

© Черный С.П., Соловьев В.А., Бузикаева А.В., Сухоруков С.И., 2022

КЛАССИЧЕСКИЙ ПОДХОД ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ СУЭП ПОСТОЯННОГО ТОКА С ДВУХЗОННЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ СКОРОСТИ

Классический подход при реализации СУЭП постоянного тока с двухзонным регулированием скорости базируется на линеаризации характеристик звеньев системы электропривода [5]. Один из возможных вариантов построения двухканальной СУЭП приведен на **рис. 1**, на котором показана имитационная модель этой системы в среде *Matlab*. Для компенсации нелинейностей, обусловленных блоками произведения, в контурах регулирования скорости и ЭДС двигателя на выходах регуляторов скорости и ЭДС включены блоки деления. Нелинейности типа «звено насыщения» в рассматриваемой модели используются для ограничения выходной координаты соответствующего звена. Нелинейность в контуре регулирования магнитного потока строится на основании универсальной кривой намагничивания двигателя, гистерезисом кривой пренебрегаем.

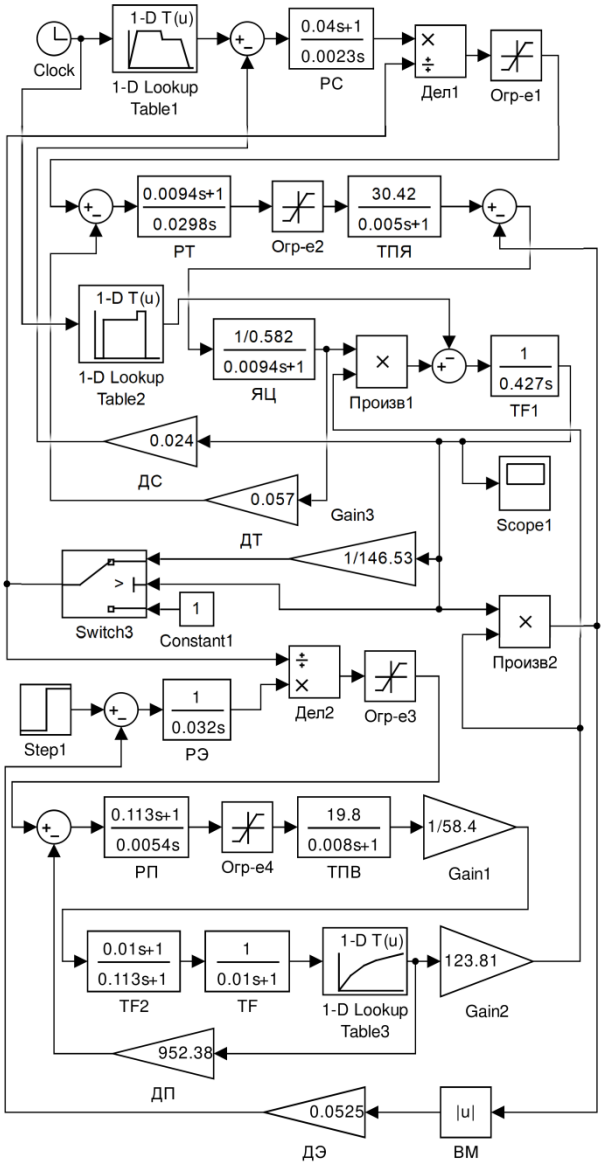


Рис. 1. Имитационная модель системы управления с двухзонным регулированием скорости

В дальнейшем при синтезе интеллектуальной системы регулирования приведенная математическая модель СЭУП постоянного тока с двухзонным регулированием скорости принимается за основу.

Исследование системы управления проводилось в виде реакции системы на отработку управляющего сигнала сложной формы при резко переменной нагрузке на валу двигателя [6].

На **рис. 2** и **3** приведены кривые изменения задающего и возмущающего сигналов в режиме работы привода в основной зоне. Задающий сигнал напряжением 3,5 В соответствует номинальной скорости.

Кривые изменения задающего и возмущающего сигналов в режиме работы привода выше номинальной скорости приведены на **рис. 4** и **5**.

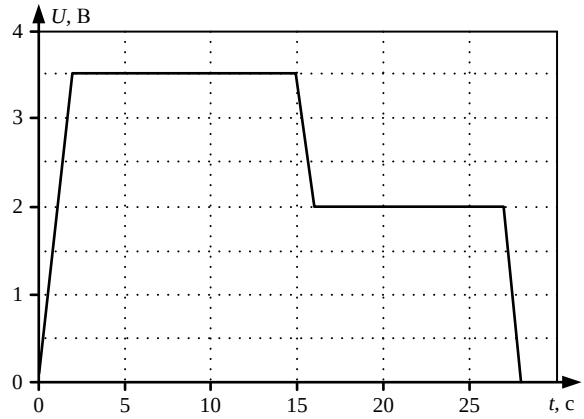


Рис. 2. Форма задающего сигнала в режиме «до номинальной скорости»

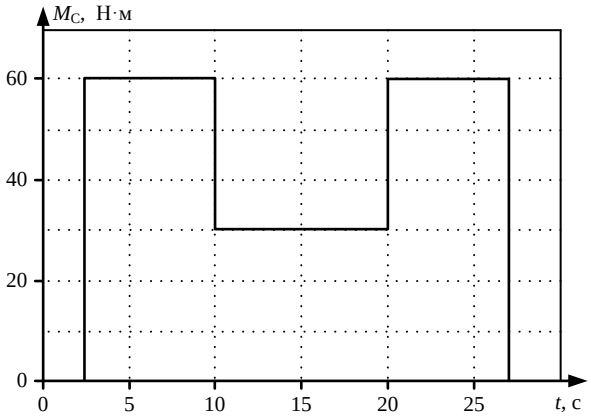


Рис. 3. Кривая изменения возмущающего сигнала в режиме «до номинальной скорости»

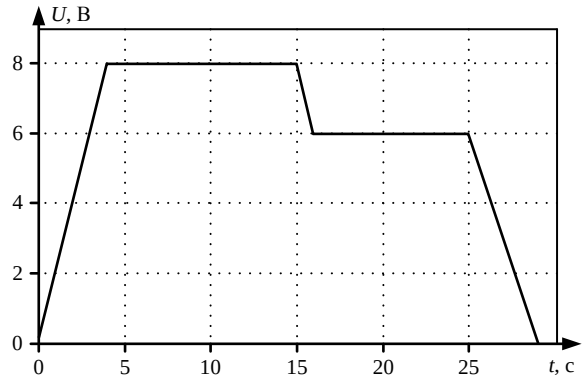


Рис. 4. Сигнал задания скорости в режиме «выше номинальной скорости»

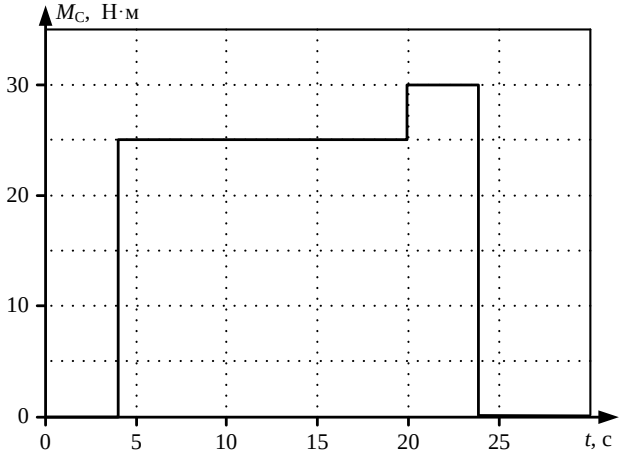


Рис. 5. Кривая изменения возмущающего сигнала в режиме «выше номинальной скорости»

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СУЭП ПОСТОЯННОГО ТОКА С ДВУХЗОННЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ СКОРОСТИ В РЕЖИМЕ ДО НОМИНАЛЬНОЙ И ВЫШЕ НОМИНАЛЬНОЙ СКОРОСТИ

Основной целью задачи управления будет являться как ослабление влияния нестационарных параметров процесса на выходную величину, так и уменьшение неточности регулирования, обусловленной существенным количеством допущений и ограничений. Для достижения данной цели выполняется замена классического регулятора скорости на нечеткий логический регулятор (НЛР) [7]. Структурная схема нечеткой системы управления, настроенной на режим работы электропривода до номинальной скорости, представлена на **рис. 6**.

Синтез интеллектуальной системы управления двухзонным регулированием основан на применении нечеткого логического регулятора с алгоритмом вывода Мамдани. Выбор такого алгоритма нечеткого логического вывода определяется как простотой структурных решений, так и гибкостью настройки самого алгоритма по отношению к другим аналогам. В качестве входной информации нечеткий регулятор принимает стандартный сигнал ошибки по скорости системы.

Простейший нечеткий модуль two_zone, представленный на **рис. 7**, реализующий функции регулятора скорости, может быть описан как звено, обладающее одним информационным входом и одним информационным выходом и формализующий в лингвистической форме понятия сигнала ошибки и сигнала управления по скорости соответственно.

Область определения входной лингвистической переменной OPS задается в диапазоне [-0,155; 0,095], который соответствует изменению входного сигнала ошибки. Кроме того, базовое терм-множество этой переменной определяется набором из пяти значений. На **рис. 8** представлено равномерное распределение функций принадлежности аппроксимированного типа в заданном диапазоне регулирования.

Аналогичным образом описывается понятие, формируемое выходным информационным каналом, соответствующее сигналу управления по скорости.

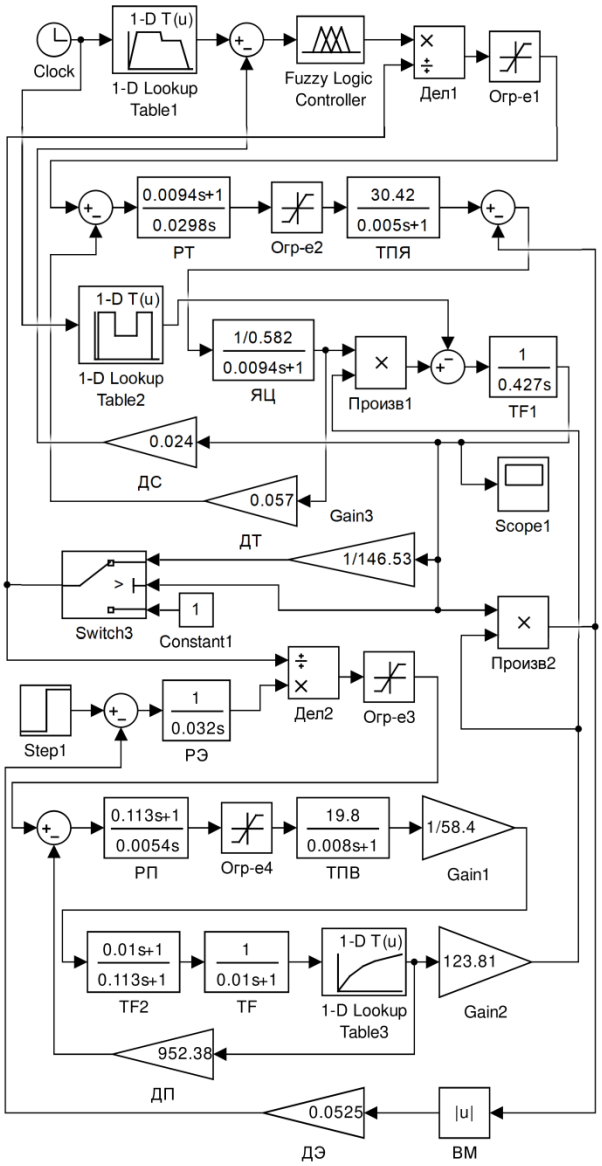


Рис. 6. Имитационная модель интеллектуальной СЭУП постоянного тока с двухзонным регулированием скорости в режиме «до номинальной»

Единственным важным отличием является изменение параметров области определения выходной лингвистической переменной [-3,64; 3,78] (**рис. 9**).

Полнота и непротиворечивость используемого алгоритма вывода обеспечивается набором нечетких продукционных правил в количестве пяти соотношений:

1. Если «ошибка по скорости» есть mf1, то «выходное напряжение» есть mf1.
2. Если «ошибка по скорости» есть mf2, то «выходное напряжение» есть mf2.
3. Если «ошибка по скорости» есть mf3, то «выходное напряжение» есть mf3.
4. Если «ошибка по скорости» есть mf4, то «выходное напряжение» есть mf5.
5. Если «ошибка по скорости» есть mf5, то «выходное напряжение» есть mf5.

Результаты реакции моделей классической и нечеткой систем управления электропривода с двухзонным регулированием скорости на отработку задающе-

го воздействия режима «до номинальной скорости» приведены на **рис. 10**. Исходя из представленных результатов моделирования, можно сделать вывод, что полученная интеллектуальная система двухзонного регулирования обладает некоторыми преимуществами по быстродействию и перерегулированию относительно классического варианта.

Рассмотрим реализацию нечеткого закона управления в рассматриваемой системе при переходе ее в режим «выше номинальной скорости». Изменения в нечетком модуле будут связаны только с одним параметром – областью определения блоков фаззификации [-0,17; 0,22] и дефаззификации [-7,4; 16,56].

Согласно результатам моделирования нечеткой системы управления электроприводом постоянного тока с двухзонным регулированием скорости при отработке задающего воздействия, приведенного на **рис. 4**, из **рис. 11** можно сделать вывод, что внедрение в систему интеллектуального регулятора, основанного на нечеткой логике, взамен классического аналога позволила добиться некоторого улучшения стабильности протекания процесса – отсутствуют колебания, наблюдаемые на графике отработки угловой скорости с применением классического регулятора скорости; при этом присутствует допустимое перерегулирование [8].

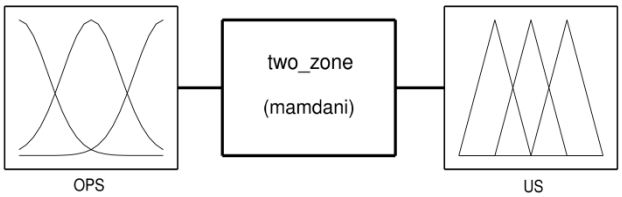


Рис. 7. Функциональная схема нечеткого регулятора two_zone

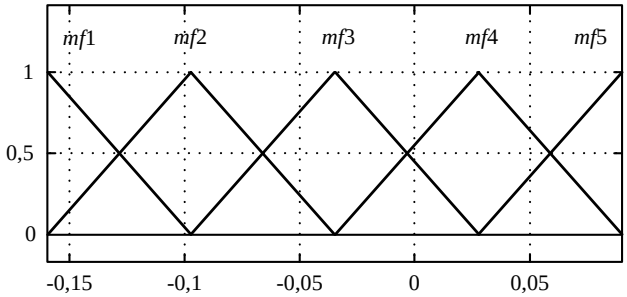


Рис. 8. Распределение нечетких термов лингвистической переменной «ошибка по скорости»

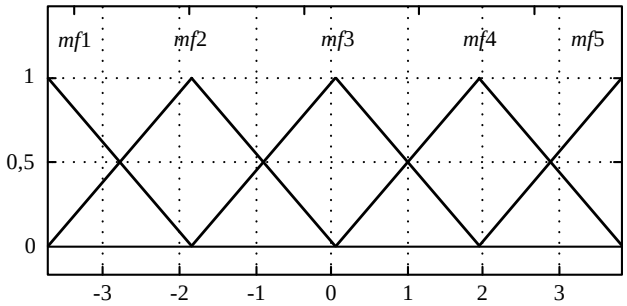


Рис. 9. Распределение термов лингвистической переменной «выходное напряжение»

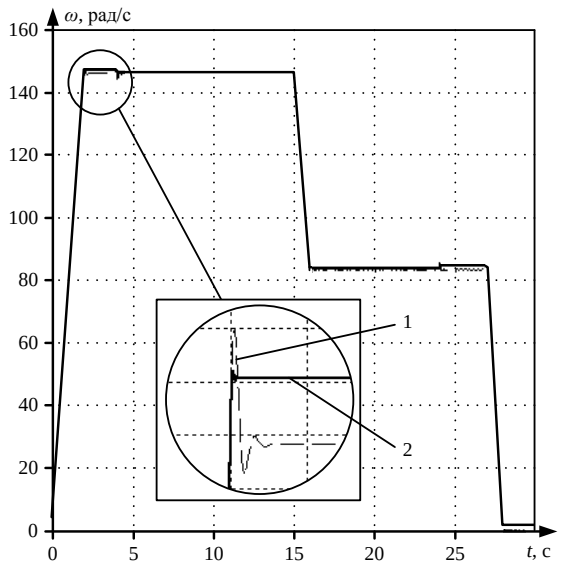


Рис. 10. Динамические характеристики отработки угловой скорости классической системы и нечеткой системы управления: 1 – классическая система; 2 – нечеткая система управления

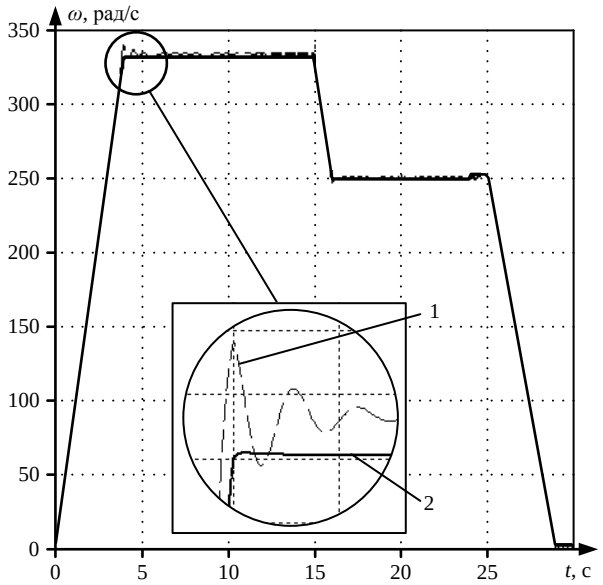


Рис. 11. Динамические характеристики отработки задающего сигнала классической и нечеткой системами управления: 1 – классическая система; 2 – нечеткая система управления

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДВУХКАСКАДНОЙ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СУЭП ПОСТОЯННОГО ТОКА С ДВУХЗОННЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ СКОРОСТИ

При использовании нечеткого регулятора с алгоритмом логического вывода Мамдани реализация процесса отработки задающего воздействия происходит с незначительной статической ошибкой. Возможным путем устранения этой ошибки является внедрение в такую систему управления двухкаскадного нечеткого модуля, использующего в своей основе алгоритмы вывода Мамдани и Сугено соответственно. Такой подход позволит за счет некоторого усложнения структурной реализации нечеткого регулятора согласовать параметры нечетких регуляторов, синтезированных для работы системы в зоне отработки сигнала до «номинальной

скорости» и «выше номинальной скорости», а также исключить различие диапазонов информационных входных сигналов. Внешний каскад формируется нечетким логическим регулятором с механизмом вывода Сугено первого порядка и реализуется как классификатор, оценивающий входную информацию и осуществляющий выбор соответствующего элемента вложенного каскада. В свою очередь, второй каскад состоит из набора простейших нечетких модулей с алгоритмом вывода Мамдани и формирует итоговое управляющее воздействие многокаскадного регулятора [9].

Имитационная модель двухкаскадной нечеткой системы управления электропривода постоянного тока с двухзонным регулированием скорости представлена на **рис. 12**.

В качестве интеллектуального модуля первого каскада будет выступать нечеткий регулятор switch1, функциональная схема которого представлена на **рис. 13**. Формализация входных данных нечеткого регулятора switch1 может быть представлена единственной входной лингвистической переменной input1 в блоке фаззификации и двумя информационными выходами output1 и output2 в блоке дефаззификации. Функционирование интеллектуального модуля switch1 осуществляется с применением нечеткого логического вывода Сугено [10].

Информационный вход input1, формализующий понятия первого входного сигнала нечеткого регулятора – сигнала ошибки, задан на области определения [0.47; 0.46] блока фаззификации, в котором распределены две функции принадлежности нечетких переменных треугольной формы (**рис. 14**).

Информационные сигналы output1 и output2 описывают понятия первого и второго выходного воздействия интеллектуального модуля switch1 соответственно. С учетом выбранного механизма вывода в блоке дефаззификации формируются две постоянные величины – 0 и 1.

Продукционные правила базы знаний нечеткого регулятора switch1 имеют следующий вид:

1. If «ошибка по скорости» is mf1, then Output1 = 1, Output2 = 0.

2. If «ошибка по скорости» is mf2, then Output1 = 0, Output2 = 1.

Наполнение внутреннего каскада может быть представлено набором типовых нечетких модулей с единственными информационными входом и выходом, которые будут соответствовать настройке системы электропривода постоянного тока с двухзонным регулированием в режимах до номинальной и выше номинальной скорости соответственно. Настройка основных блоков таких модулей представлена выше и соответствует нечеткому логическому регулятору, показанному на **рис. 7**. Главное отличие модулей внутреннего каскада заключается в разности диапазонов регулирования, связанных с вариациями различных переменных, а именно напряжением в первой зоне и потокосцеплением во второй [11].

В результате моделирования двухкаскадной нечеткой системы управления с двухзонным регулированием скорости были получены результаты моделирования (**рис. 15** и **16**), анализ которых позволяет говорить о том, что благодаря внедрению в систему двухкаскадного нечеткого регулятора удалось обеспечить качественный переходный процесс системы с отсутствующим перерегулированием [12].

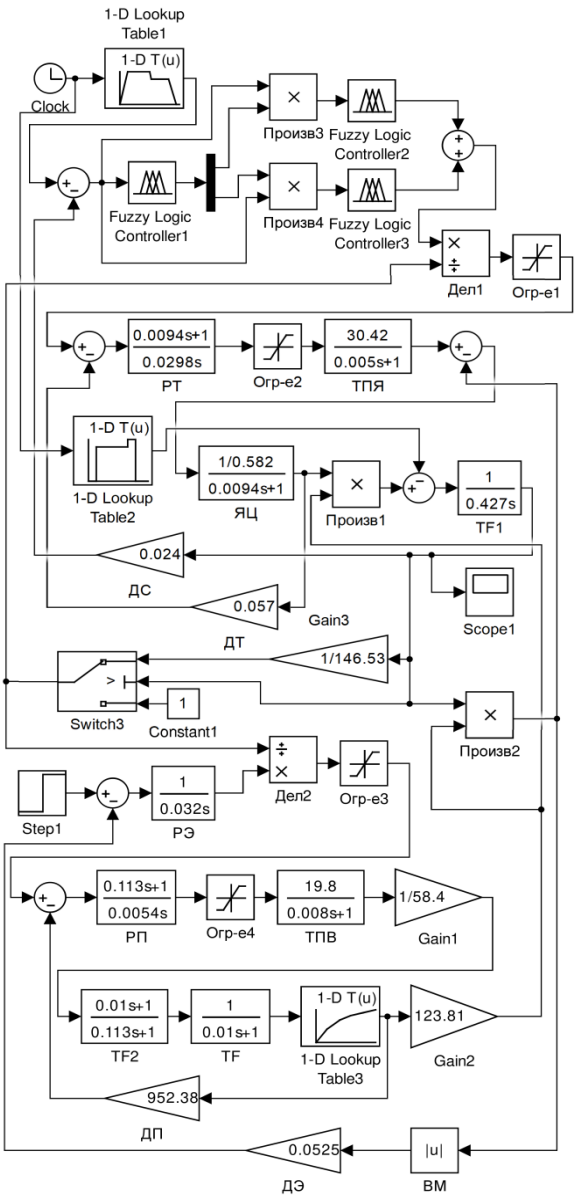


Рис. 12. Имитационная модель системы управления электропривода постоянного тока с двухзонным регулированием скорости с двухкаскадным нечетким логическим регулятором

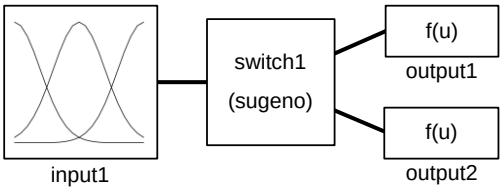


Рис. 13. Функциональная схема НЛР внешнего каскада

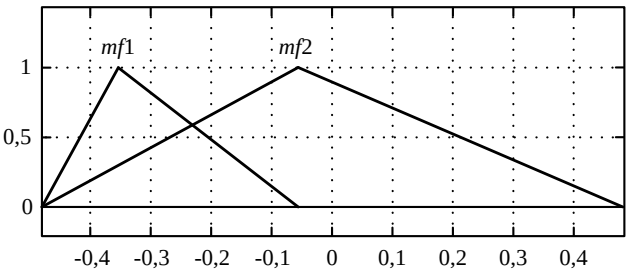


Рис. 14. Базовое терм-множество понятия «ошибка по скорости», формализованного лингвистической переменной

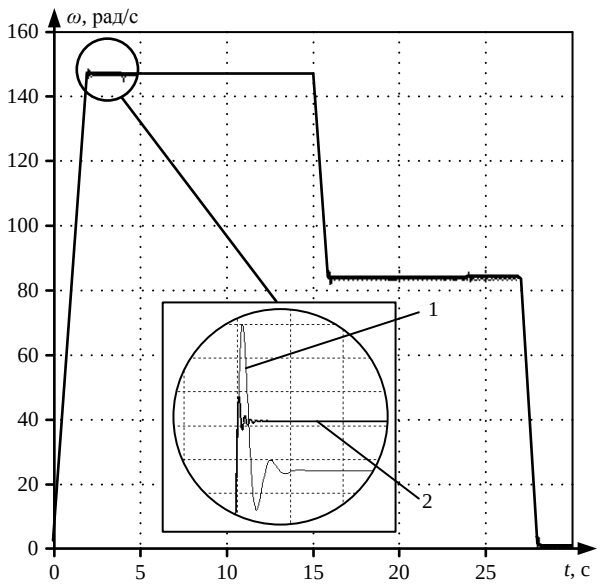


Рис. 15. Реакция классической системы и нечеткой системы управления с двухкаскадным регулятором скорости, настроенных на режим до «номинальной скорости» при отработке входного воздействия: 1 – классическая система; 2 – нечеткая система управления

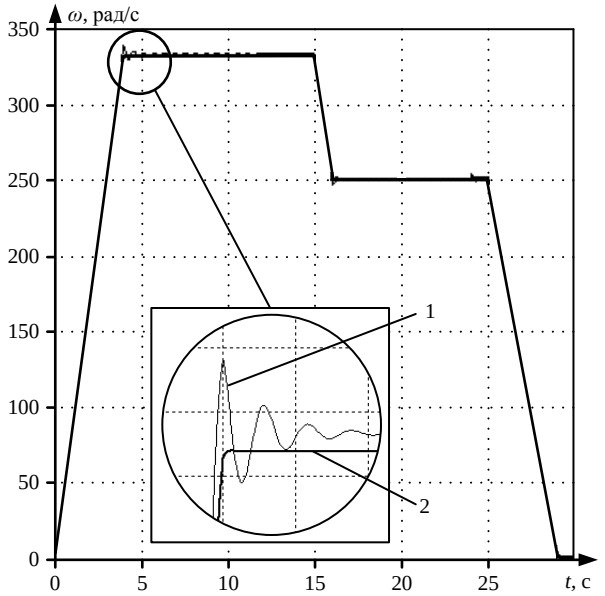


Рис. 16. Реакция классической и нечеткой систем управления с двухкаскадным регулятором скорости, настроенных на режим «выше номинальной скорости» при отработке входного воздействия: 1 – классическая система; 2 – нечеткая система управления

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ результатов моделирования интеллектуальной системы управления с двухзонным регулированием скорости указывает на правомерность применения методов мягкого вычисления при синтезе такой имитационной модели. Предложенная методика позволяет повысить свойства универсализма развитого нечеткого регулятора путем увеличения числа простейших элементов вложенного каскада, при этом упрощает процедуры вывода, сокращает алгоритмическую сложность подобных регуляторов и увеличивает адаптивные свойства, а также повышает быстродействие системы в целом.

В результате анализа существующих подходов к реализации систем управления сложными техническими объектами предложенный подход позволил улучшить основные характеристики систем управления электроприводами постоянного тока с двухзонным регулированием скорости за счет применения развитой нечеткой системы. Данная проблема напрямую связана с повышением производительности и интенсивности производства промышленных установок, а также с улучшением их эффективности и качества выходного продукта. Применение классических подходов для реализации систем управления с двухзонным регулированием не позволяет им достичь потенциально высоких показателей. Возможным решением для улучшения качественных характеристик таких установок является применение управления, основанного на теории нечетких множеств.

Исследование проводится в рамках гранта №ВНО10/2021 «Разработка принципов построения интеллектуальных систем управления сложными техническими объектами на основе критериев энергоэффективности».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в Matlab, SymPowerSystems и Simulink. М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. 288 с.
2. Cherny S., Khrulkov V., Vasilchenko S. Improving dynamic and energy characteristics of electromechanical systems with single-phase rectifiers // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). 9111902. doi: 10.1109/ICIEAM48468.2020.9111902
3. Susdorf V.I., Cherniy S.P., Buzikayeva A.V. Optimization of Series Motor Drive Dynamics // International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). doi: 10.1109/FarEastCon.2019.8934344
4. Savelyev D.O., Gudim A.S., Solovev D.B. Stabilizing the transients in the objects and systems controlling the compensation of nonlinear ACS (automatic control system) elements // International Science and Technology Conference "EastConf" (EastConf). 2019. 8725324. doi: 10.1109/Eastonf.2019.8725324
5. Башарин А.В., Новиков В.А., Соколовский Г.Г. Управление электроприводами: учеб. пособие для вузов. Л.: Энергоиздат, 1982. 392 с.
6. Стельмащук С.В., Капустенко Д.В. Согласованное управление транспортировки ленты с модальным регулятором // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2019. № 1(38). С. 28-40.
7. Болдырев В.В., Горькавый М.А. Разработка интеллектуального модуля управления автоматизированной автономной системой энергообеспечения // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2020. № 3(43). С. 9-18.
8. Соловьев В. А., Дерюжкова Н. Е., Купова А. В. Моделирование статического тиристорного компенсатора в системе энергоснабжения дуговой сталеплавильной печи // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2014. Т. 14, №2. С. 23-28.
9. Стельмащук С.В., Чернов А.Ю. Синтез ПИД-регулятора системы автоматического регулирования с максимальным быстродействием и ограничением на перерегулирование // Электротехнические системы и комплексы. 2012. №20. С. 256-265.
10. Трусов Р.Е., Горькавый М.А. Повышение точности мяг-

ких вычислений в системе поддержки процессов ситуационной оценки // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: материалы II Всероссийской национальной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2019. С. 488-491.
11. Mazandarani M, Pariz N, Kamyad A.V. Granular differentiability of Fuzzy-Number-Valued functions // IEEE Transactions on Fuzzy Systems. 2018. 26(1). Pp. 310-323. doi: 10.1109/TFUZZ.2017.2659731.
12. Савельев Д.О., Гудим А.С., Хрульков В.Н. Программный модуль нечеткого логического компенсатора нелинейных элементов // Производственные технологии будущего: от создания к внедрению: материалы международной научно-практической конференции. Комсомольск-на-Амуре, 2017. С. 128-131.

Поступила в редакцию 18 марта 2022 г.

INFORMATION IN ENGLISH

APPROACH TO SIMULATION OF TWO-STAGE FUZZY DC DRIVE CONTROL SYSTEM WITH TWO-ZONE SPEED CONTROL

Sergej P. Cherniy

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Head of the Department, Electric Drive and Automation of Industrial Installations Department, Komsomolsk-on-Amur State University, Komsomolsk-on-Amur, Russia, kepapu@knastu.ru, https://orcid.org/0000-0002-8410-7985

Vjacheslav A. Solovyev

D.Sc. (Engineering), Professor, Electric Drive and Automation of Industrial Installations Department, Komsomolsk-on-Amur State University, Komsomolsk-on-Amur, Russia, https://orcid.org/0000-0001-7930-0601

Alina V. Buzikaeva

Postgraduate student, Electric Drive and Automation of Industrial Installations Department, Komsomolsk-on-Amur State University, Komsomolsk-on-Amur, Russia, alina200954@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-7181-6435

Sergei I. Sukhorukov

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Electric Drive and Automation of Industrial Installations Department, Komsomolsk-on-Amur State University, Komsomolsk-on-Amur, Russia, sukhorukov@knastu.ru, https://orcid.org/0000-0003-1522-3517

The paper presents the simulation of an intelligent DC electric drive control system (SUEP) with two-zone speed control using the fuzzy sets theory. A developed fuzzy SUEP with two-zone speed control has been implemented. The results comparative analysis of modeling an intelligent control system and an electric drive system using classical approaches to adjusting regulators is presented, and the advantages and disadvantages of using soft computing in an intelligent control system for an AC electric drive are revealed. The dynamic characteristics of classical and intelligent control systems are investigated. The introduction of a multi-cascade fuzzy controller into intelligent control systems, where the external cascade of the fuzzy module is considered as an expert system that controls the nested cascade controllers, allows reducing the information load of the production knowledge base, the number of linguistic variables, and also reducing the algorithmic complexity in the fuzzification and defuzzification blocks. Algorithms and procedures used in multistage fuzzy controllers can be used as prediction modules in advanced automation objects, for example, in electric drive control systems with two-zone regulation, as well as similar technological processes used in the electric power industry, robotics and transport. This approach allows a fuzzy multi-stage control system to combine various structural solutions for setting up controllers, while obtaining qualitative characteristics of transient processes, and to expand the intellectual capabilities of fuzzy control systems by combining them structurally and functionally into multi-stage structures to solve the problems of regulating complex technological processes under condition -views of multi-criteria, multi-tasking and multi-coordinate.

Keywords: electric drive control system, two-zone regulation, fuzzy inference algorithms, fuzzy logic controller.

REFERENCES

1. Chernykh I.V. *Modelirovanie elektrotekhnicheskikh ustroistv v Matlab, SymPowerSystems i Simulink* [Modeling electrical devices in Matlab, SymPowerSystems and Simulink]. Moscow, DMK Press, St. Petersburg, Piter Publ., 2008. 288 p. (In Russian)
2. Cherny S., Khrulkov V., Vasilchenko S. Improving dynamic and energy characteristics of electromechanical systems with single-phase rectifiers. 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing. IEEE, 2020, 9111902. doi: 10.1109/ ICIEAM48468.2020.9111902
3. Susdorf V.I., Cherniy S.P., Buzikayeva A.V. Optimization of Series Motor Drive Dynamics. 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). IEEE, 2019. doi: 10.1109/FarEastCon.2019.8934344
4. Savelyev D.O., Gudim A.S., Solovev D.B. Stabilizing the transients in the objects and systems controlling the compensation of nonlinear ACS (automatic control system) elements. 2019 International Science and Technology Conference "EastConf", IEEE, 2019, 8725324. doi: 10.1109/Eastonf.2019.8725324
5. Basharin A.V., Novikov V.A., Sokolovsky G.G. *Upravlenie elektroprivodami: uchebnoe posobie dlya vuzov* [Control of electric drives: a textbook for universities]. Leningrad, Energoizdat, 1982. 392 p. (In Russian)
6. Stelmashchuk S.V., Kapustenko D.V. Coordinated control of belt transportation with a modal regulator. *Uchenye zapiski KnAGTU* [Proceedings of Komsomolsk-on-Amur state technical university], 2019, vol.1, vo. 1(38), pp. 28-40. (In Russian)
7. Boldyrev V.V., Gorkavyi M.A. Development of an intelligent control module for an automated autonomous power supply system. *Uchenye zapiski KnAGTU* [Proceedings of

Komsomolsk-on-Amur state technical university], 2020, no. 3(43), pp. 9-18. (In Russian)
8. Soloviev V. A., Deryuzhkova N. E., Kupova A. V. Modeling of a static thyristor compensator in the power supply system of an arc steel-smelting furnace. *Vestnik YUrGU. Seriya «Energetika»* [Bulletin of South Ural State University. Series "Power Engineering"], 2014, vol. 14, no. 2, pp. 23-28. (In Russian)
9. Stelmashchuk S.V., Chernov A.Yu. PID-control of automatic control system with maximum operating sped and restriction to overregulation. *Elektrotekhnicheskie sistemy i kompleksy* [Electrotechnical systems and complexes], 2012, no. 20, pp. 256-265. (In Russian)
10. Trusov R.E., Gorkavyi M.A. Increasing the accuracy of soft computing in the support system for situational assessment processes. *Molodezh i nauka: aktualnye problemy fundamentalnykh i prikladnykh issledovaniy: materialy II Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh* [Youth and Science: Actual Problems of Fundamental and Applied Research: Proceedings of the II All-Russian National Scientific Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists]. Komsomolsk-on-Amur, Komsomolsk-on-Amur State University Publ., 2019, pp. 488-491. (In Russian)
11. Mazandarani M, Pariz N, Kamyad A.V. Granular differentiability of Fuzzy-Number-Valued functions. IEEE Transactions on Fuzzy Systems. 2018. No. 26. Pp. 310-323. doi: 10.1109/TFUZZ.2017.2659731
12. Saveliev D.O., Gudim A.S., Khrulkov V.N. Software module of the fuzzy logical compensator of nonlinear elements. *Proizvodstvennye tekhnologii budushchego: ot sozdaniya k vnedreniyu: materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Production technologies of the future: from creation to implementation: materials of the international scientific and practical conference], Komsomolsk-on-Amur, 2017, pp. 128-131. (In Russian)

Один из подходов к моделированию двухкаскадной нечеткой системы управления электроприводом постоянного тока с двухзонным регулированием скорости / С.П. Черный, В.А. Соловьев, А.В. Бузикаева, С.И. Сухоруков // Электротехнические системы и комплексы. 2022. № 2(55). С. 32-39. https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-2(55)-32-39

Cherniy S.P., Solovyev V.A., Buzikaeva A.V., Sukhorukov S.I. Approach to Simulation of Two-Stage Fuzzy DC Drive Control System with Two-Zone Speed Control. *Elektrotekhnicheskie sistemy i kompleksy* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2022, no. 2(55), pp. 32-39. (In Russian). https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-2(55)-32-39

УДК 681.58:669.162 https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-2(55)-40-46

Парсункин Б.Н., Андреев С.М., Сухоносова Т.Г.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

АДАПТИВНОЕ ПОИСКОВО-ДИНАМИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПОДАЧЕЙ ПРИРОДНОГО ГАЗА В ДУТЬЕ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ

Производительность современной доменной печи составляет 3–4 тыс. т/сут, поэтому поддержание ровного хода доменной печи, обеспечивающего максимальную производительность, является основной задачей технологического персонала. Многочисленные факторы, действующие на процесс выплавки чугуна, нарушают ход процесса и требуют формирование компенсирующих управляющих воздействий. Воздействия на ход доменного процесса возможны как изменением подачи материалов (воздействия «сверху»), так и изменением дутьевого режима (воздействия «снизу»). Воздействия через изменения дутьевого режима, по сравнению с воздействиями при изменении подачи шихты, позволяют оперативно компенсировать нарушения хода доменного процесса. Одним из главных параметров при управлении дутьевым режимом плавки является подача природного газа (ПГ) и кислорода (К) в фурменную зону печи. В зависимости от действий внешних факторов максимальная производительность доменной печи достигается при разном соотношении ПГ/К. В работе, используя метод экстремального регулирования, разработана система поискового динамического управления подачей природного газа, в которой в автоматическом режиме производится оценка изменения текущей производительности доменной печи и формируется управляющее воздействие на коррекцию соотношения ПГ/К в направлении максимизации текущей производительности доменной печи. Учитывая большую инерционность и запаздывание процесса производства чугуна, предложен способ шагового изменения управляющего воздействия с учетом динамики процесса. В работе приведена реализация поискового алгоритма и выполнено математическое моделирование работы системы поисково-динамического управления. Использование предложенного алгоритма позволит повысить оперативность управления подачей природного газа в доменную печь.

Ключевые слова: доменная печь, производство чугуна, поисково-динамическое управление, адаптивное управление, автоматическое управление, система автоматической оптимизации управления, оптимальное управление.

ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение максимальной производительности доменной печи, составляющая 3-4 тыс. т/сут чугуна, является основной задачей технологического персонала [1-3]. Основным фактором, который обеспечивает достижение максимальной производительности, является «ход печи». Под этим понятием понимается скорость схода шихты по шахте доменной печи. Ровный ход печи обеспечивает равномерное движение шихты по всему сечению шахты доменной печи. Для того чтобы добиться ровного хода печи, необходимо учитывать взаимосвязи энергетических, химических и механических процессов, оказывающих влияние на производительность доменной печи [4-6].

Для обеспечения ровного хода доменной печи на технологический процесс выплавки чугуна оказывают различные управляющие воздействия, основными из которых являются подача компонентов шихты и их распределение (управление сверху), подача горячего дутья, обогащенного кислородом и добавление природного газа (управление снизу) [7].

Обогащение горячего дутья кислородом и подача в дутье природного газа способствует повышению производительности доменной печи и снижению удельных затрат кокса [8]. Однако влияние соотношения удельного расхода природного газа к расходу технического кислорода в дутье ($V_{ПГ}/V_{ТК}$) и удельного расхода кислорода $V_{ТК}$ на производительность доменной печи является неоднозначным [9, 10]. Расход природного газа в дутье является ведомым параметром по отношению к расходу кислорода. Природный газ в дутье выполняет функции повышения количества теплоты, вдуваемого в доменную печь горячим дутьем, за счет сгорания [11]. Однако процессы диссоциации молекул природного газа являются эндотермическими и являются ограничивающим фактором увеличения удельного расхода природного газа.

Неоднозначность влияния соотношения $V_{ПГ}/V_{ТК}$ на производительность доменной печи требует применять для управления расходом природного газа в горячее дутье поисковые системы управления. Работа такой системы должна обеспечить нахождение и поддержание такого соотношения $V_{ПГ}/V_{ТК}$, чтобы производительность доменной печи достигала максимальной при текущих условиях работы [12].

Необходимым и обязательным условием эффективного применения поисково-динамического управления является наличие экстремальной унимодальной (без разрывов производной) статической технологически обоснованной зависимости между «оптимизируемым параметром» (часовой производительностью печи) и «управляющим воздействием» (удельным количеством природного газа).

Для условий доменного цеха ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» при постоянном удельном количестве потребляемого кокса экспериментальные зависимости часовой производительности доменной печи от соотношения удельных количеств природного газа к удельным количествам потребляемого технического кислорода ($V_{ПГ}/V_{ТК}$) для различных величин удельных количеств $V_{ТК}$ представлены на **рис. 1** [9, 13].

Экстремумы (максимумы) производительности $P_{ДП}$ при изменении $V_{ТК}$ смещаются по нелинейной траектории. Поэтому для достижения максимальной производительности доменной печи $P_{ДП}^{max}$, учитывая значительную инерционность доменного процесса, целесообразно использовать дискретный (шаговый) поисково-динамический метод оптимизации управления удельным количеством потребляемого природного газа $V_{ПГ}$ [9, 14, 15].

© Парсункин Б.Н., Андреев С.М., Сухоносова Т.Г., 2022

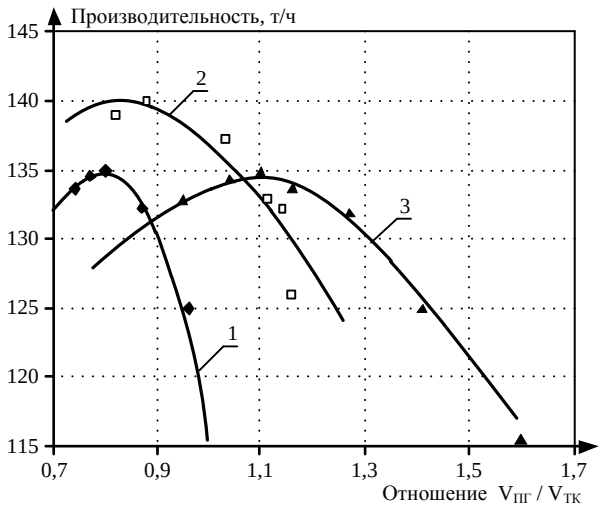


Рис. 1. Зависимость производительности доменной печи от соотношения удельных количеств природного газа $V_{ПГ}$ и технологического кислорода $V_{ТК}$ при различных величинах $V_{ТК}$: 1 – 80-99 м^3/т чуг.; 2 – 100-119 м^3/т чуг.; 3 – 120-140 м^3/т чуг.

Формирование направления шагового режима реализации управляющего воздействия основано на выполнении главного определяющего эвристического правила: если текущее направление изменения шага управляющего воздействия привело к приближению оптимизируемого параметра к поставленной цели (увеличилось), то такое направление должно быть сохранено и на последующем шаге, иначе, направление управляющего воздействия на последующем шаге должно быть изменено на противоположное.

Поскольку в реальных производственных условиях вид и количественные параметры текущих статических характеристик оптимизируемых процессов обычно неизвестны, то для решения поставленной задачи целесообразно использовать адаптивный динамический поисковый метод определения экстремума.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ С АДАПТИВНО-ПОИСКОВЫМ УПРАВЛЕНИЕМ ПОДАЧЕЙ ПРИРОДНОГО ГАЗА

Структурная схема цифровой реализации метода поисково-динамического адаптивного управления подачей природного газа с целью достижения текущей максимально возможной производительности доменной печи представлена на **рис. 2**.

На **рис. 2** обозначены: ОУ – объект управления со статической характеристикой $Y=f[X(\tau)]$ и постоянная времени T_0 с запаздыванием $\tau_З$; ИЭ1 и ИЭ2 – импульсные элементы; ЗУ1 и ЗУ2 – запоминающие устройства; ЭС1 и ЭС2 – элементы сравнения; СР – логический элемент сигнум-реле; ТР – триггер реверса; ГИ – генератор импульсов; УОП – устройство остановки поиска; УКПП – устройство контроля продолжительности паузы; УОП1 – нормально разомкнутые контакты ключей остановки; ИМ – исполнительный механизм; РО – регулирующий орган; ГПГ – газопровод природного газа.

Импульсный режим работы метода обеспечивается ГИ, формирующим шаговый режим с продолжительностью цикла $\Delta\tau_ц = \Delta\tau_и + \Delta\tau_п$. Здесь $\Delta\tau_и$ – продолжительность управляющего воздействия, то есть время движения ИМ, $\Delta\tau_п = (0{,}5\ldots2)\cdot T_Э$ – продолжительность паузы между управляющими импульсами, где $T_Э = T_0 + \tau_З$ – эффективная эквивалентная постоянная времени.

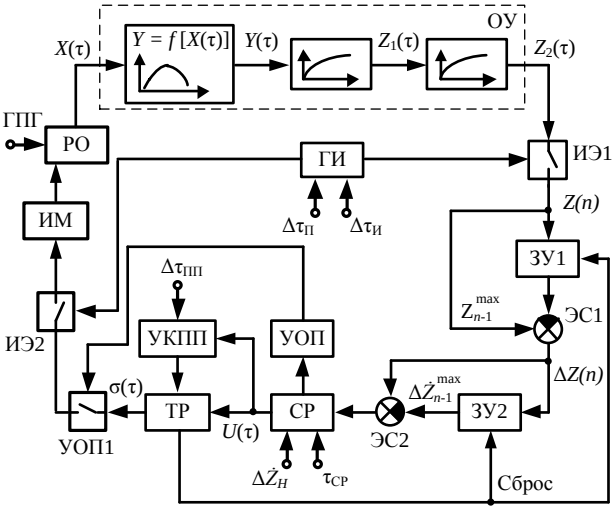


Рис. 2. Структурная схема цифровой реализации метода поисково-динамического адаптивного управления подачей природного газа для достижения максимальной производительности доменной печи

Математическая модель статических и динамических свойств оптимизируемого процесса представляется последовательным соединением трех звеньев: экспериментальной статической характеристикой $Y=f[X(\tau)]$ и двух инерционных звеньев с постоянными времени T_0 и $\tau_З$. Правомерность замены запаздывания инерционностью первого порядка обеспечены соблюдением условия $T_0 \gg \tau_З$ [16].

Изменение величин $Z_j(\tau)$ (j = 1, 2 – номер инерционного звена) на выходе инерционностей в пределах одного шага управления $\Delta\tau_ц$ определяется из решения дифференциальных уравнений методом Эйлера [16]. Так, при движении ИМ за время $\Delta\tau_и$ изменение управляющего воздействия будет

$$\Delta x = \sigma(\tau) K_{ИМ} \Delta\tau_И, \tag{1}$$

где $\sigma(\tau) \in (-1, 0, 1)$ – переключающая функция, определяющая текущее направление его движения; τ – текущее время; $K_{ИМ}$ – техническая скорость ИМ; $\Delta\tau_И$ – время движения ИМ.

Изменение оптимизируемого параметра может быть определено из решения уравнения

$$T_0 \frac{dZ_j(i)}{d\tau} + Z_j(i) = f\left[X(\tau)\right] \text{ при } 0 \le \tau \le \tau_И, \quad j = 1, 2, \tag{2}$$

где Z_j – значение выходного сигнала после j-й инерционности; i – номер шага дискретизации расчета; $f[X(\tau)]$ – значение по статической характеристике; $X(\tau) = X_0 + \sigma(\tau) K_{ИМ} \Delta\tau_И$ – текущее значение управляющего воздействия; X_0 – начальное значение $X(\tau)$.

При остановке ИМ в течение паузы $\Delta\tau_П$ при $X(\tau)$ = const уравнение имеет вид [15]:

$$T_Э \frac{dZ_j(i)}{d\tau} + Z_j(i) = \text{const, при } \Delta\tau_И < \tau \le \Delta\tau_Ц. \tag{3}$$

Контролируемое аналоговое (непрерывное) значение текущей часовой производительности доменной печи $Z_2(\tau) = P_{ДП}(\tau)$ импульсным элементом ИЭ1 преоб-

разуется в последовательность импульсов $Z(n)$ амплитудой $Z_2(\tau)$ с продолжительностью $\Delta\tau_И$ и паузой $\Delta\tau_П$ между импульсами.

Импульсы $Z(n)$ одновременно поступают на входы ЗУ1 и ЭС1. Запоминающее устройство ЗУ1 запоминает и формирует на выходе только максимальное значение $Z_{n\text{-}1}^{\max}$, достигнутое в текущий или прошедший шаг управления, в соответствии с условием:

$$Z_{n-1}^{\max} = \begin{cases} Z_n, \text{ если } Z(n) > Z_{n-1}^{\max}; \\ Z_{n-1}, \text{ если } Z(n) \le Z_{n-1}^{\max}. \end{cases} \quad (4)$$

На выходе ЭС1 формируется значение приращения $\Delta Z(n)$ в соответствии с выражением

$$\Delta Z(n) = Z(n) - Z_{n-1}^{\max}. \quad (5)$$

Для снижения негативного влияния инерционности и устранения появления ложных экстремумов [15], характерных для методов поиска по запоминанию экстремума оптимизируемого параметра, целесообразно в качестве запоминаемого параметра использовать его относительные приращения $\Delta Z(n)$ за один шаг поиска [6].

Это реализуется элементами ЗУ2 и ЭС2 в соответствии с выражением (9). Элемент ЗУ2 работает аналогично элементу ЗУ1.

$$\Delta\dot{Z}(n) = \Delta Z(n) - \Delta Z_{n-1}^{\max}, \quad (6)$$

где $\Delta\dot{Z}(n)$ – величина изменения приращения в пределах шага поиска.

Использование метода поиска экстремума по запоминанию максимума приращений [17] позволило значительно сократить время выхода поискового процесса в окрестности экстремума. Но это не устранило второго нежелательного явления: наличия периодического (автоколебательного) режима работы в стационарном состоянии доменного процесса при отсутствии заметного смещения статической характеристики.

Устранение отмеченного недостатка в предлагаемой адаптивной системе (см. **рис. 2)** обеспечено формированием СР управляющей функции в соответствии с условиями:

$$U(\tau) = \begin{cases} +1, \text{ при } \Delta\dot{Z}(n) \ge \dot{Z}_{n-1}^{\max} + \Delta Z_Н; \\ 0, \text{ при } -\Delta Z_Н \le \Delta\dot{Z}(n) < \dot{Z}_{n-1}^{\max} + \Delta Z_Н; \\ -1, \text{ при } \Delta\dot{Z}(n) < -\Delta Z_Н, \end{cases} \quad (7)$$

где $\Delta Z_Н$ – заданная зона нечувствительности принятого метода поиска экстремума.

Сигнал $U(\tau)$ с сигнум-реле управляет триггером реверса ТР, представляющим бесконтактный реверсивный пускатель, определяющий текущее состояние ИМ и значение $X(\tau)$ путем формирования переключающей функции $\sigma(\tau) \in (-1, 0, 1)$.

Между $U(\tau)$ и $\sigma(\tau)$ существует логическая связь:

– если $U(\tau) = +1$, то текущее направление движения $X(\tau)$ сохраняется на последующем шаге $\sigma(\tau+1) = \sigma(\tau)$;

– если $U(\tau) = 0$, то остановить ИМ $\sigma(\tau+1) = 0$;

– если $U(\tau) = -1$, то направление движения $X(\tau)$ изменяется на противоположное на последующем шаге $\sigma(\tau+1) = -\sigma(\tau)$.

При $U(\tau) = 0$ срабатывает УОП, которое набором нормально разомкнутых электронных ключей УОП1 разрывает питание и цепи управления ИМ, останавливая его на заданное время паузы $\tau_{ПП} = (0{,}5 \ldots 2)\cdot T_Э$.

Одновременно с остановкой поиска включается УКПП – таймер, на выходе которого по истечении заданного времени $\tau_{ПП}$ формируется сигнал принудительного поверочного реверса ИМ. Поиск экстремума возобновляется, но только при противоположном направлении принятому ранее на предыдущих шагах. Кроме этого, триггер реверса всегда изменяет направление поиска при условии $U(\tau) = -1$. При каждом срабатывании триггера реверса происходит сброс запомненных ранее в ЗУ1 и ЗУ2 максимальных значений и запоминание текущих на момент реверса значений. Импульсный режим движения ИМ обеспечивается ИЭ2 управляемым ГИ синхронно с ИЭ1.

Поскольку $X(\tau)$, $Y(\tau)$, $Z(\tau)$ являются функциями времени, то для удобства анализа их траекторий в процессе поиска при постоянной скорости изменения управляющего воздействия $dx/d\tau = K_{ИМ} = \text{const}$ возможно и целесообразно в уравнениях (2) и (3) произвести замену переменных $d\tau$ на dx в соответствии с выражением $d\tau = dx/K_{ИМ}$. В этом случае траектории основных параметров в процессе поиска могут быть представлены в координатах «X» – «Y», «Z» совмещенными.

В производственных условиях характеристики функции $Y = f[X(\tau)]$ точно неизвестны, а известны только контролируемые значения $Z_2(X) = P_{ДП}(X)$ и текущий расход природного газа $Q_{ПГ}$. Уникальность и эффективность рассматриваемого адаптивного шагового поиска экстремума с остановкой поиска в окрестности экстремума заключается в следующем. Изменение величины оптимизируемого параметра за время движения ИМ $\Delta Z_i^и$ может быть получено из решения уравнения (2). За время паузы $\Delta\tau_П$ изменение $Z(X)$ в соответствии с решением уравнения (3) будет на величину $\Delta Z_i^п$ ($I = 1, 2, \ldots, n$) за время $\Delta\tau_И < \tau \le \Delta\tau_Ц$.

Общее изменение величины оптимизируемого параметра будет $\Delta Z_i = \Delta Z_i^и + \Delta Z_i^п$ за каждый i-шаг управляющего воздействия. Величина ΔZ_i в основном определяется инерционностью процесса и величиной разности текущих значений $Y = f(X_i)$ и $Z(X_i)$.

В рассматриваемом конкретном случае, учитывая инерционность доменного процесса, изменение оптимизируемого параметра за время движения ИМ, равное $\Delta\tau_И = 1{,}5 - 5$ с, будет практически нулевым. Основное изменение величины на ΔZ_i на каждом шаге будет за время паузы $\Delta\tau_П = 2 - 4$ ч, то есть за 2 – 4 выпуска чугуна. В системе координат «X» – «Y», «Z» эта траектория представляет две линии, параллельные осям координат.

В результате работы системы на n-шаге относительное приращение $\Delta\dot{Z}_i$ оптимизируемого параметра будет меньше приращения $\Delta\dot{Z}_{i\text{-}1}$ на величину, большую, чем заданное значение $\Delta Z_Н$. При выполнении этого условия процесс поиска прекращается на заданный интервал времени $\tau_{ПП}$. В течение этого интервала времени величина оптимизируемого параметра $Z(X_i)$ приближается к установившемуся значению

$Y(X_i) \approx Y_{экст}$, где $Y_{экст}$ – экстремальное значение параметра (в нашем случае наибольшее) для текущего значения X_i.

Использование процедуры прерывания поиска позволяет устранить и регламентировать периодический режим в окрестности экстремума.

Незначительные принудительные регламентируемые поверочные реверсы необходимы для обеспечения оперативного своевременного реагирования на неконтролируемые случайные технологические возмущения, приводящие к дрейфу статической характеристики оптимизируемого процесса.

Реализуемость и эффективность теоретического и работоспособность технического обеспечений предлагаемого метода исследована и проверена в процессе математического и физического моделирования поисково-динамического управления.

Целью математического и физического моделирования являлось выявление влияния основных настроечных параметров реализованного способа управления на показатели эффективности поискового процесса:

– величины шага управляющего воздействия ΔX, м^3/ч;

– продолжительность паузы $\Delta\tau_П$, ч;

– продолжительность остановки поиска $\Delta\tau_{ПП}$, ч;

– величины зоны нечувствительности $\Delta Z_Н$;

– максимального значения величины потери на поиск $\Delta Z_П$, т/ч;

– величины поисковых колебаний управляющего воздействия A_X, м^3/т или м^3/ч;

– величины поисковых колебаний оптимизируемого параметра A_Z, т/ч;

– времени выхода процесса в окрестности экстремума $T_{ВЫХ}$, ч.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СИСТЕМЫ АДАПТИВНОГО ПОИСКОВОГО ДИНАМИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Теоретическое и алгоритмическое решение поставленной задачи обеспечено разработанной универсальной рабочей программой [18] реализации цифрового адаптивного управления подачей природного газа.

Конкретный пример математического моделирования метода адаптивной поисковой оптимизации управления расходом природного газа приведена для следующих условий. Статическая характеристика процесса при максимальном постоянном удельном количестве технического кислорода $V_{ТК}$ в диапазоне изменения расхода природного газа от 8500 до 24500 м^3/ч определяется уравнением [12]

$$P_{ПД}\left(Q_{ПГ}\right) = a_1 Q_{ПГ}^2 + a_2 Q_{ПГ} + a_3, \qquad (8)$$

где $P_{ДП}(Q_{ПГ})$ – установившееся усредненное значение текущей часовой производительности доменной печи, т/ч, при текущем расходе природного газа $Q_{ПГ}$, м^3/ч; $a_1 = -1{,}8\cdot10^{-7}$, $a_2 = 7{,}04\cdot10^{-3}$, $a_3 = 62{,}6243$ – коэффициенты уравнения.

Постоянная времени процесса T_0 = 540 мин, время запаздывания процесса $\tau_З$ = 60 мин. Величина шага управляющего воздействия ΔX = 2000–2200 м^3/ч. Техническая скорость исполнительного механизма $K_{ИМ}$ = 420 (м^3/ч)/с. Зона нечувствительности системы $\Delta Z_Н$ = 0,5 т/ч. Начальное значение расхода $Q_{ПГ}$ = = 9000 м^3/ч. Начальное значение часовой производительности доменной печи $P_{ДП}(\tau{=}0)$ = 111,47 т/ч. Время паузы между управляющими импульсами $\Delta\tau_П = T_0 + \tau_З$ = 600 мин. Время прерывания поиска $\Delta\tau_{ПП}$ = 900 мин. Дискретность расчета 6 мин.

Поскольку при математическом моделировании поискового процесса использована экспериментальная характеристика (траектория 3 на **рис. 1**) при практически постоянном удельном количестве технического кислорода $V_{ТК}$ (99,0% [O_2]), то смещение статической характеристики не учитывалось.

В случае необходимости смещение статической характеристики (8) в рабочей программе предусмотрено в виде уравнения

$$P_{ПД}\left(Q_{ПГ},\tau\right) = P_{ПД}\left(Q_{ПГ} \pm \alpha\tau\right) \pm \beta\tau, \qquad (9)$$

где α, β – соответственно скорости горизонтального и вертикального дрейфа статической характеристики оптимизируемого процесса.

В общем случае горизонтальная и вертикальная составляющие скоростей дрейфа могут быть заданы любыми соответствующими реальным условиям функциями времени.

Расчетные траектории поискового режима системы оптимизации управления подачей природного газа при указанных условиях представлены на **рис. 3**.

На **рис. 4** показан пример определения показателей эффективности поискового режима $\Delta Z_П$, A_X, A_Z. Время поиска оценивается как интервал времени от начала поиска (из точки *A*) до момента прерывания поиска в окрестности экстремума (точка *B*). В рассматриваемом случае остановка поиска на заданное время $\Delta\tau_{ПП}$ = 900 мин произошла после пятого шага через 5·600 = 50 ч от начала поиска.

В точке *B* после выполнения условия $U(\tau) = 0$ параметр $Z(X_i)$ изменяется по траектории *BC* при X_i = const за время $\Delta\tau_{ПП}$. В точке *C* по истечении $\Delta\tau_{ПП}$ осуществляется принудительный поверочный реверс направления поиска (см. **рис. 4)**. Величина $Z(X_i)$ начинает уменьшаться, но на первом шаге оказывается меньше, чем $\Delta Z_Н$, и совершается второй шаг в избранном направлении. Это приводит к заметному отклонению $Z(X_i)$ и очевидному реверсу в точке *D* при выполнении условия $U(\tau) = -1$.

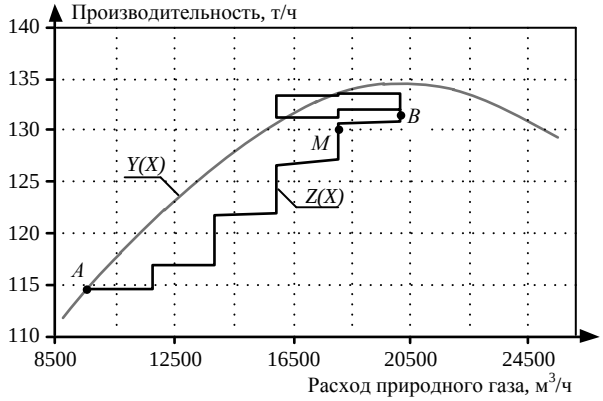


Рис. 3. Расчетные траектории поискового режима при оптимизации управления подачей природного газа в доменную печь в обычном масштабе

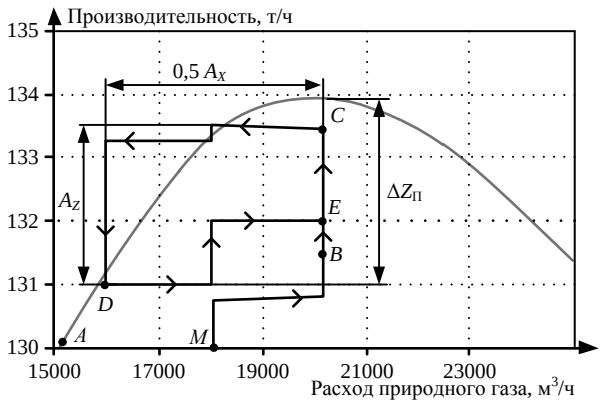


Рис. 4. Расчетные траектории поискового режима при оптимизации управления подачей природного газа в доменную печь в увеличенном масштабе

После реверса оптимизируемый параметр $Z(X_i)$ по траектории DE возвращается на регламентируемую траекторию EC, параметры которой являются результирующими значениями $\Delta Z_П$, A_X, A_Z.

Эффективность предлагаемого метода поиска экстремума при смещении статической характеристики проверена при физическом моделировании поискового режима на универсальном компьютеризированном стенде [17], конструкция которого соответствует техническому и программному обеспечению рассматриваемого метода и условиям работы в производственных условиях.

Заключение

По результатам моделирования работы системы оптимизации управления расходом природного газа можно сделать следующие выводы.

Увеличение продолжительности паузы между управляющими импульсами больше чем на $T_Э = T_0 + \tau_З$ не целесообразно, так как не приводит к заметному улучшению итоговых показателей, но одновременно приводит к увеличению времени выхода процесса в окрестности экстремума.

Уменьшение шага управляющего воздействия ΔX не оказывает заметного влияния на показатели качества, но приводит к снижению времени выхода на экстремум.

Увеличение шага управляющего воздействия приводит к пропорциональному увеличению A_X и возникновению возможности нежелательного периодического изменения оптимизируемого параметра $Z(X_i)$.

Величина удельного количества природного газа оказывает влияние одновременно и на величину удельного количества потребляемого дефицитного дорогостоящего кокса, минимизируя его потребление за счет альтернативной замены, как источника тепловой энергии.

Причем статическая характеристика зависимости удельного количества кокса $V_К$ от удельного количества природного газа $V_{ПГ}$ [6, 14] также имеет экстремальный вид и доступна для оптимизации управления подачей природного газа с целью снижения удельного количества кокса при использовании предлагаемого метода адаптивного поиска.

Для исключения взаимовлияния одновременной работы двух оптимизирующих подачу природного газа систем следует регламентировать их работу в зависимости от реальных производственных условий. Это безусловно повысит эффективность управления доменным процессом, обеспечивая максимальную производительность и повышенную экономическую эффективность этого процесса.

Реализованный адаптивный метод управления параметром технологического процесса учитывает значительную инерционность процесса выплавки чугуна (5-10 ч) и запаздывание (1,0-2,5 ч) при существенной нелинейности технологических связей.

Список литературы

1. Цифровизация производства чугуна: состояние, научные проблемы и перспективы развития / Н.А. Спирин, В.В. Лавров, В.Ю. Рыболовлев, Шнайдер Д.А., Краснобаев А.В., Гурин И.А. // Моделирование и наукоемкие информационные технологии в технических и социально-экономических системах: труды V Международной научно-практической конференции, Новокузнецк, 14 апреля 2021 года. Новокузнецк: Сибирский государственный индустриальный университет, 2021. С. 23-31.
2. Система поддержки принятия решений по управлению тепловым состоянием доменной плавки / Ю.С. Семенов, А.Л. Подкорытов, Е.И. Шумельчик, В.В. Горупаха, И.Ю. Семион, А.Ю. Оробцев // Сталь. 2021. № 4. С. 7-11.
3. Донсков Е.Г., Лялюк В.П., Донсков А.Д. Некоторые аспекты состояния и перспектив технологии доменной плавки на примере печей «Криворожстали» // Металлург. 2014. № 4. С. 41-57.
4. Новый уровень управления доменной плавкой в разработках ИЧМ / И.Г. Муравьева, Д.Н. Тогобицкая, А.С. Нестеров, Н.Г. Иванча // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2019. Т. 75. № 11. С. 1231-1237. doi: 10.32339/0135-5910-2019-11-1231-1236.
5. Семенов Ю.С. Разработка и реализация новых подходов к диагностике и управлению доменной плавкой // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2020. Т. 76. № 2. С. 123-132. doi: 10.32339/0135-5910-2020-2-123-131.
6. Совершенствование хода доменного процесса повышением расхода природного газа по газодинамике в верхней ступени теплообмена / С.К. Сибагатуллин, А.С. Харченко, В.А. Бегинюк, В.Н. Селиванов, В.П. Чернов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2017. Т. 15. № 1. С. 37-44. doi:10.18503/1995-2732-2017-15-1-37-44.
7. Стабилизация соотношения расходов природного газа и дутья по фурмам доменной печи / С.К. Сибагатуллин, А.С. Харченко, А.А. Полинов, А.В. Павлов, М.А. Семенюк, В.А. Бегинюк // Теория и технология металлургического производства. 2014. № 1(14). С. 26-26.
8. Интенсификация работы доменных печей путем оптимального соотношения расходов природного газа и кислорода / В.А. Гостенин, С.Н. Пишнограев, А.А. Полинов, В.П. Гридасов // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2011. №6(1338). С. 16-23.
9. Парсункин Б.Н., Андреев С.М. Ахметов У.Б. Оптимизация управления технологическими процессами в металлургии: монография. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2009. 198 с.
10. Повышение производительности доменной печи при оптимизации автоматического управления подачей природного газа и технического кислорода в дутье / Б.Н. Парсункин, Б.К. Сеничкин, С.М. Андреев, М.Ю. Рябчиков // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2011. №4. С. 69-73.

11. Повышение эффективности доменной плавки с вдуванием природного газа за счет его подогрева / С.А. Фещенко, В.И. Плешков, Б.Н. Лизунов, А.А. Лапшин, К.Н. Совейко, В.Н. Логинов, Л.Е. Васильев // Металлург. 2007. № 11. С. 44-48.
12. Парсункин Б.Н., Андреев С.М., Сухоносова Т.Г. Автоматизация и оптимизация управления процессом выплавки чугуна в доменных печах: учеб. пособие. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2018. 215 с.
13. Сеничкин Б.К., Бахчеев Н.Ф., Гостенин В.А. Энергетическая эффективность вдуваний в доменную печь природного и коксового газов // Проблемы развития металлургии Урала на рубеже XXI века: Всерос. сб. науч. тр. Магнитогорск: МГМА, 1996. Т 2. 198 с.
14. Казакевич В.В., Родов А.Б. Системы автоматической оптимизации. М.: Энергия, 1977. 288 с.
15. Казакевич В.В., Щербина Ю.В. О построении непрерывно-дискретных систем экстремального регулирования, устойчивых при действии низкочастотных возмущений // Автоматика и телемеханика. 1979. № 2. С. 59-64.
16. Фрер Ф., Ортенбургер Ф. Введение в электронную технику регулирования. М.: Энергия, 1973. 190 с.
17. Андреев С.М., Парсункин Б.Н. Оптимизация режимов управления нагревом заготовок в печах проходного типа: монография. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2013. 376 с.
18. Парсункин Б.Н., Логунова О.С. Автоматизация и оптимизация управления производством шихтовых компонентов в металлургии: монография. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2020. 199 с.

Поступила в редакцию 10 февраля 2022 г.

INFORMATION IN ENGLISH

ADAPTIVE SEARCH-DYNAMIC CONTROL OF NATURAL GAS SUPPLY IN BLAST FURNACE

Boris N. Parsunkin

D.Sc. (Engineering), Professor, Automated Control Systems Department, Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, promkim@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-1822-2632

Sergey M. Andreev

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

Tatiana G. Sukhonosova

Assistant Professor, Automated Control Systems Department, Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, tgobuhova@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-1024-1612

The productivity of a modern blast furnace is 3–4 thousand tons per day. Keeping the blast furnace running smoothly for maximum productivity is the main concern of the process staff. Numerous factors affecting the iron smelting process disrupt the process and require the formation of compensating control actions. One of the main parameters in controlling melting in the blast mode is the supply of natural gas (NG) and oxygen (Ox) to the furnace tuyere zone. The maximum productivity of a blast furnace is achieved at different NG/Ox ratios, depending on the influence of external factors. In the work, a system of search dynamic control of the natural gas supply was developed based on the method of extreme regulation. In automatic mode, the system evaluates the change in the current productivity of the blast furnace and generates a control action on the correction of the NG/Oxratio in the direction of maximizing the current productivity of the blast furnace. The blast-furnace process has a large inertia and delay. Taking this into account, a method of stepwise change of the control action is proposed, taking into account the process dynamic properties. The paper presents the implementation of the search algorithm and performs mathematical modeling of the search dynamic control system operation. The use of the proposed algorithm will improve the efficiency of managing the supply of natural gas to the blast furnace.

Keywords: blast furnace, pig iron process, dynamic search control, adaptive control, automatic control, control automatic optimization system, optimal control.

REFERENCES

1. Spirin N.A., Lavrov V.V., Rybolovlev V.YU., Shnayder D.A., Krasnobayev A.V., Gurin I.A. Digitalization of pig iron production: state, scientific problems and development trends. *Trudy V Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Novokuznetsk, 14 aprelya 2021 goda "Modelirovaniye i naukoyemkiye informatsionnyye tekhnologii v tekhnicheskikh i sotsialno-ekonomicheskikh sistemakh*" [V International Scientific and Practical Conference "Modeling and high-tech information technologies in technical and socio-economic systems"]. Novokuznetsk, SibSIU Publ., 2021, pp. 23-31. (In Russian)
2. Semenov Y.S., Podkorytov A.L., Shumelchik E.I., Horupakha V.V., Semion I.Yu., Orobtsev A.Yu. Decision Support System for Controlling Thermal State of Blast Furnace Smelting. *Stal* [Steel], 2021, vol. 51, no. 4, pp. 261-266. doi: 10.3103/S0967091221040094 (In Russian)
3. Donskov E.G., Lyalyuk V.P., Donskov A.D. Use of the blast furnaces at Krivorozhstal to illustrate the prospects of blast-furnace smelting and certain aspects of its current state. *Metallurg* [Metallurgist], 2014, vol. 58, no. 3-4, pp. 256-263. doi: 10.1007/s11015-014-9898-y (In Russian)
4. Muravyeva I.G., Togobitskaya D.N., Nesterov A.S., Ivancha N.G. A new level of blast furnace control in the developments of the IFM. *Chernaya metallurgiya. Byulleten nauchno-tekhnicheskoy i ekonomicheskoy informatsii* [Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information], 2019, vol. 75, no. 11, pp. 1231-1237. doi: 10.32339/0135-5910-2019-11-1231-1236 (In Russian)
5. Semenov YU.S. Elaboration and realization of new approaches to diagnostic and control of blast furnace heat. *Chernaya metallurgiya. Byulleten nauchno-tekhnicheskoy i ekonomicheskoy informatsii* [Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific,

Technical and Economic Information], 2020, vol. 76, no. 2, pp. 123-132. doi: 10.32339/0135-5910-2020-2-123-131 (In Russian)

6. Sibagatullin S.K., Kharchenko A.S., Beginyuk V.A., Selivanov V.N., Chernov V.P. Improving the blast furnace process by raising the natural gas flow rate in the upper heat exchange stage. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2017, vol. 15, no. 1, pp. 37-44. doi:10.18503/1995-2732-2017-15-1-37-44 (In Russian)
7. Sibagatullin S.K., Kharchenko A.S., Polinov A.A., Pavlov A.V., Semenyuk M.A., Beginyuk V.A. Stabilization of the natural gas to blast ratio in blast furnace tuyeres. *Teoriya i tekhnologiya metallurgicheskogo proizvodstva* [The Theory and process engineering of metallurgical production], 2014, no. 1(14), pp. 26-26. (In Russian)
8. Gostenin V.A., Pishnograyev S.N., Chevychelov A.V., Polinov A.A., Gridasov V.P. Intensification of the operation of blast furnaces through the optimal ratio of natural gas and oxygen consumption. *Chernaya metallurgiya. Byulleten nauchno-tekhnicheskoy i ekonomicheskoy informatsii* [Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information], 2011, no. 6(1338), pp. 16-23. (In Russian)
9. Parsunkn B.N., Andreyev S.M. Akhmetov U.B. *Optimizatsiya upravleniya tekhnologicheskimi protsessami v metallurgii* [Optimization of process control in metallurgy]. Magnitogorsk, NMSTU Publ., 2009. 198 p. (In Russian)
10. Parsunkin B.N., Senichkin B.K., Andreyev S.M., Ryabchikov M.YU. Blast furnace performance improvement by means of automatic control optimization of natural gas and technical oxygen submission in blasting. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2011, no. 4, pp. 69-73. (In Russian)
11. Feshcenko S.A., Pleshkov V.I., Lizunov B.N., Lapshin A.A., Soveiko K.N., Loginov V.N., Vasilyev L.E. Making blast-furnace smelting more efficient through the injection of heated natural gas. *Metallurg* [Metallurgist], 2007, vol. 51, no. 11-12, pp. 605-611. doi: 605-611 10.1007/s11015-007-0110-5 (In Russian)
12. Parsunkin B.N., Andreev S.M., Sukhonosova T.G. *Avtomatizatsiya i optimizatsiya upravleniya protsessomvy plavki chuguna v domennykh pechakh*. [Automation and optimization of the process control of iron smelting in blast furnaces]. Magnitogorsk, NMSTU Publ., 2018. 215 p. (In Russian)
13. Senichkin B.K., Bakhcheev N.F., Gostenin V.A. Power efficiency of natural and cooking gas inflation in a blast furnace. *Problemy razvitiya metallurgii Urala na rubezhe XXI veka: sbornik nauchnyk htrudov* [Problems of development of Ural metallurgy on the boundary of the XXI century]. Magnitogorsk, NMGMA Publ., 1996, vol. 2, pp. 198. (In Russian)
14. Kazakevich V.V., Rodov A.B. *Sistemy avtomaticheskoy optimizatsii* [Systems of automatic optimization]. Moscow, Energiya Publ., 1977. 288 p. (In Russian)
15. Kazakevich V.V., Shcherbina YU.V. On the construction of continuous-discrete systems of extreme control, stable under the action of low-frequency disturbances. *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and Telemechanics], 1979, no. 2, pp. 59-64. (In Russian)
16. Frer F., Ortenburger F. *Vvedeniye v elektronnuyu tekhniku regulirovaniya* [Introduction to electronic control technology]. Moscow, Energiya Publ., 1973. 190 p. (In Russian)
17. Andreyev S.M., Parsunkin B.N. *Optimizatsiya rezhimov upravleniya nagrevom zagotovok v pechakh prokhodnogo tipa* [Optimization of control modes of heating through-type furnaces]. Magnitogorsk, NMSTU Publ., 2013. 376 p. (In Russian)
18. Parsunkin B.N. Logunova O.S. *Avtomatizatsiya i optimizatsiya upravleniya proizvodstvom shikhtovykh komponentov v metallurgii* [Automation and optimization of burden stock production management in metallurgy]. Magnitogorsk, NMSTU Publ., 2020. 199 p. (In Russian)

Парсункин Б.Н., Андреев С.М., Сухоносова Т.Г. Адаптивное поисково-динамическое управление подачей природного газа в дутье доменной печи // Электротехнические системы и комплексы. 2022. № 2(55). С. 40-46. https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-2(55)-40-46

Parsunkin B.N., Andreev S.M., Sukhonosova T.G. Adaptive Search-Dynamic Control of Natural Gas Supply in Blast Furnace. *Elektrotekhnicheskie sistemy i kompleksy* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2022, no. 2(55), pp. 40-46. (In Russian). https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-2(55)-40-46

ЭЛЕКТРО- И ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.311 https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-2(55)-47-54

Валиев Р.Т., Ерохин П.М., Паздерин А.В.

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

ОБЗОР МЕТОДОВ ДИНАМИЧЕСКОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ СИНХРОНИЗИРОВАННЫХ ВЕКТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Применение технологии синхронизированных векторных измерений (СВИ), основанной на измерении с высокой точностью параметров электрического режима на различных объектах электроэнергетической системы (ЭЭС), позволяет значительно повысить наблюдаемость протекающих в энергосистеме процессов. Визуализация СВИ в режиме реального времени позволяет добиться повышения ситуационной осведомленности оперативно-диспетчерского персонала как в диспетчерских центрах, так и на отдельных объектах энергосистемы, позволяя диспетчерам быстрее реагировать на возникающие в системе возмущения. Существующие системы сбора данных и оперативного диспетчерского управления как зарубежных, так и отечественных производителей позволяют выполнять визуализацию СВИ и в темпе процесса, сохраняя ретроспективные данные, в случае возникновения возмущений в ЭЭС. Основные методы визуализации, как правило, включают: использование контуров (градиентного отображения) характеристик ЭЭС (углов напряжений, перетоков мощности в системе и т.д.), что может быть полезно в случае необходимости быстрой локализации возмущения в системе, размещение круговых диаграмм и индикаторов для отображения напряжения на шинах, загрузки линий электропередачи и т.д. и использование комбинированных индикаторов отображения направления перетоков мощности в системе. Среди ключевых тенденций в области визуализации измерительной информации для диспетчерского персонала стоит выделить повышение репрезентативности состояния системы за счет большей скорости обновления данных в рамках визуализируемой модели ЭЭС, и идентификацию аварийных состояний за счет обработки поступающих потоков данных от устройств СВИ в темпе процесса с последующим формированием аварийных сигналов для диспетчера.

Ключевые слова: оценка состояния, синхронизированные векторные измерения, электроэнергетическая система, визуализация состояния электроэнергетических систем.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы в высоковольтных электрических сетях 220 кВ и выше все большее распространение получают системы синхронизированных векторных измерений (СВИ), которые на основе систем спутниковой навигации GPS/ГЛОНАС позволяют осуществлять измерения не только амплитуд тока и напряжения, но и их взаимного фазового сдвига. Данные системы позволяют производить измерения векторов (амплитуды и фазы) токов и напряжений, причем делают это сразу для всей территории Единой Энергетической Системы (ЕЭС). Частота обновления СВИ обычно составляет 50 раз за секунду и это существенно чаще, чем у традиционных SCADA-систем телеизмерения режимных параметров, когда измерения обновлялись один раз за 1-5 секунд. Эксплуатация ЭЭС требует обработки больших объемов данных и их предоставления диспетчерам в той форме, которая может быть легко использована и интерпретирована как с учетом функциональных взаимосвязей между отдельными параметрами, характеризующими режим работы ЭЭС, так и с учетом географического расположения отдельных элементов ЭЭС. Все более широкое распространение устройств синхронизированных векторных измерений (УСВИ), в том числе за счет создания Системным Оператором ЕЭС (СО ЕЭС) Системы мониторинга переходных режимов ЕЭС России (СМПР), позволяет реализовать более детальное визуальное представления режима работы ЭЭС [1,2].

Графическое отображение состояния энергосистем впервые обсуждалось в контексте визуализации решений по распределению нагрузки с использованием систем IBM System/360 [3]. Дополнительная работа над методами визуализации продолжалась на протяжении 1970-1990-х годов. В частности, в [4] представлен краткий обзор современных методов визуализации, разработанных до середины 1990-х годов. С тех пор были проведены существенные исследования в области визуализации динамических процессов ЭЭС, причем акцент, как правило, ставился на повышении ситуационной осведомленности диспетчеров [5].

Существующие подходы к визуализации состояния ЭЭС в первую очередь укрупненно разделяют на те, что используют двумерное пространство, и те, в которых применяется трехмерная система координат [6]. При этом вопрос выбора величин и методов визуализации актуален и для первой, и для второй категории.

Методы визуализации, которые рассматриваются в литературе, как правило, включают: использование цветных градиентных контуров характеристик ЭЭС (углов напряжений, перетоков мощности в системе и т.д.) [5, 7–12], размещение круговых диаграмм и индикаторов для отображения напряжения на шинах, загрузки линий электропередачи и т.д. [10, 13–15] и использование комбинированных индикаторов отображения направления перетоков мощности в системе [4, 6, 10, 13–17]. Кроме того, формальная оценка показала потенциальные преимущества использования выделения значений напряжения с помощью контуров отдельных областей и анимации перетоков мощности в

© Валиев Р.Т., Ерохин П.М., Паздерин А.В., 2022

системе [18, 19], что не исключает иных вариантов отображения параметров ЭЭС. В рамках данной статьи представлен обзор основных методов графического отображения состояния системы на основе как данных СВИ, так и измерений SCADA-систем.

Визуализация в двумерном пространстве

Одним из первых методов визуализации, который оказался полезным для быстрого определения мест перегрузок/отключений в распределительных сетях, является использование круговых диаграмм, в которых процент заполнения каждой круговой диаграммы равен процентной загрузке линии [6]. Для схем с относительно небольшим количеством связей, где круговая диаграмма каждой отдельной линии может быть отображена детализированно, такой способ индикации может быть достаточно репрезентативными [6, 20]. При этом в ряде случаев целесообразно цветовое выделение отдельных частей диаграмм для акцентирования внимания на проблемных участках. В качестве основного недостатка отмеченного решения стоить выделить проблематичность динамического отображения подобных диаграмм на сложнозамкнутых схемах, поскольку компромисс между созданием достаточно крупных круговых диаграмм, удобных для восприятия, но не слишком больших, чтобы не скрыть другие важные элементы, может быть труднодостижим (**рис. 1**).

Для отображения показателей узлов в качестве дополнения к круговым диаграммам нередко применяются столбчатые шкалы отдельных переменных, отражающие нахождение контролируемого параметра (как правило, нормированного) в заданном диапазоне (**рис. 2**).

Для указания направления перетоков мощности в системе возможно использование статичных или анимированных индикаторов (**рис. 3**). Однако, как отмечено в [6], применение отмеченного подхода для сложнозамкнутых систем (**рис. 4**) и особенно в случае использования анимированных индикаторов приводит к повышенной утомляемости оператора и возрастанию вероятности их неправильной интерпретации.

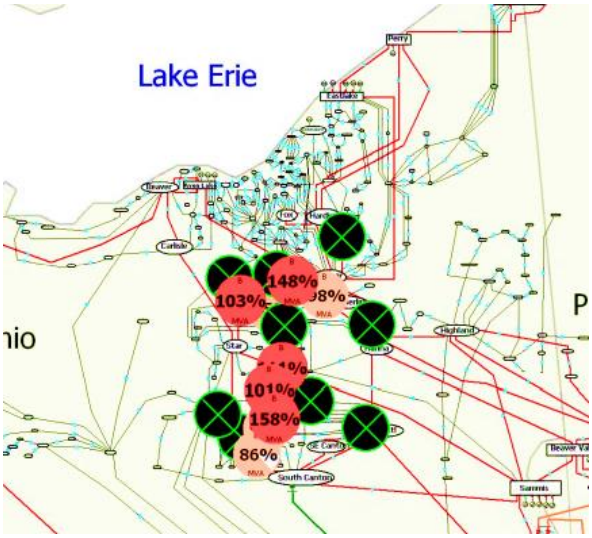


Рис. 1. Пример использования круговых диаграмм для отображения загрузки сети

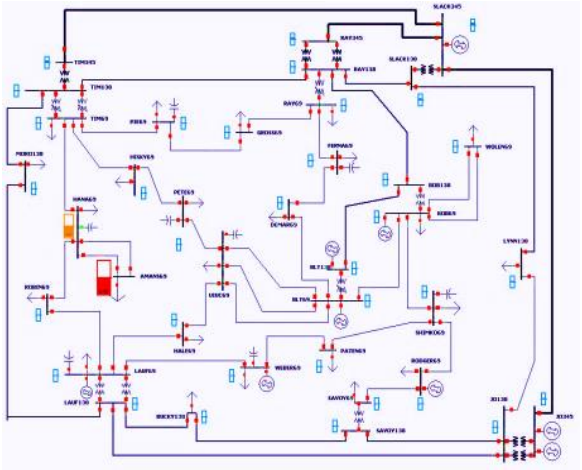


Рис. 2. Пример визуализации нормированных значений уровней напряжения с помощью индикаторов

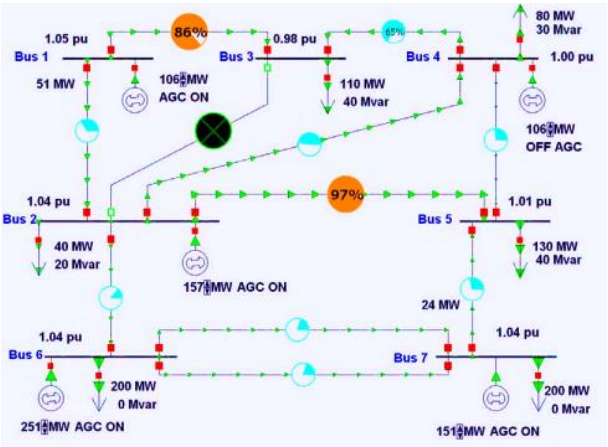


Рис. 3. Пример использования индикаторов указания направления токов по линиям

Рис. 4. Пример использования индикаторов указания направления токов по линиям крупной системы

Для отображения пространственно-распределенных, непрерывных характеристик во многих областях используются цветовые контуры. Однако их использование в электроэнергетике сопряжено с рядом особенностей. При отображении модулей или углов напряжений возникает проблема построения области условно постоянного напряжения. Шины подстанций как физические объекты дискретны и значения напряжений, полученные с использованием измерительных устройств,

соответствуют конкретной точке сети без промежуточных значений (**рис. 5**). Для решения отмеченной проблемы формируются области условно постоянных напряжений с псевдозначениями, охватывающими некоторую область вблизи точки измерения. Псевдозначения представляют собой средневзвешенное значение измерений на некоторой области, при этом различные функции усреднения дают разные области условно постоянного напряжения. Кроме того, географически близко расположенные узлы ЭЭС могут иметь различные классы напряжения, а трансформаторы с РПН вносить дискретные изменения в значения величины напряжения на шине, в то время как контурное отображение обычно подразумевает непрерывное отображение в заданном диапазоне. Данная особенность, как правило, учитывается либо отображением контуров в относительных единицах, либо отображением разных классов напряжения различными слоями [6].

Более целостную картину о состоянии энергосистемы в целом можно получить, выбрав в качестве визуализируемых величин углы или разность углов напряжений в системе. В частности, они могут быть достаточно репрезентативны в случае достижения системой пределов по устойчивости [21]. 8 января 2021 года в 14:05 по центральноевропейскому времени синхронная зона континентальной Европы была разделена на две части из-за сбоев в работе элементов сети за относительно короткий промежуток времени, визуализация углов напряжений в системе, в режиме, предшествующем этому моменту, достаточно четко отражает проблемные области **(рис. 6).**

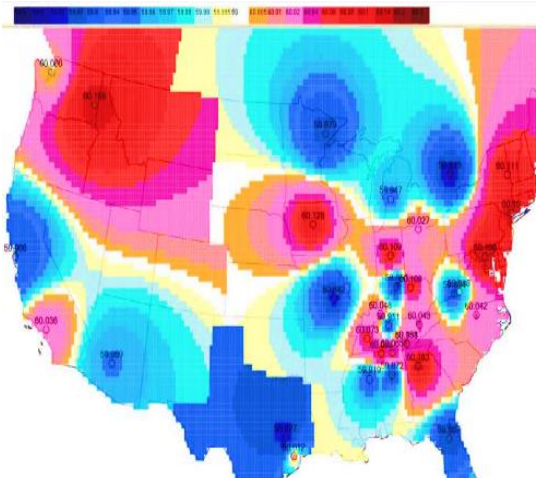


Рис. 5. Пример отображения уровней напряжений в системе с использованием контуров

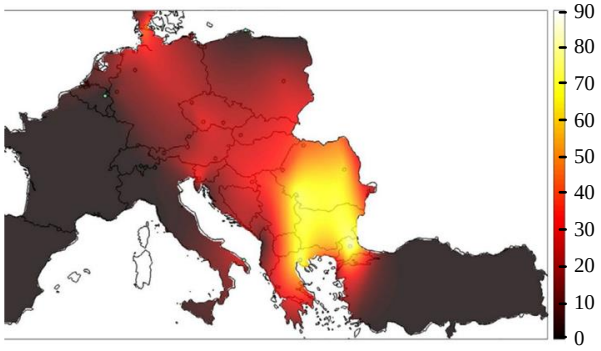


Рис. 6. Пример отображения углов напряжений в системе цветового градиента

При использовании цветовых контуров возникает вопрос выбора величин для отображения. Достаточно часто для визуализации выбирают углы напряжений. Однако в случае отображения лишь самих значений возникает проблема их интерпретации. В [10] предлагается метод визуализации, который позволяет сразу увидеть существенные изменения в системе и избежать проблем, связанных с интерпретацией. Суть метода заключается в отображении контуров изменения состояния системы (вместо цветовой градации текущего состояния), как это показано на **рис. 7**. Отключение линии вызывает возмущение в системе, что отображается контурами возле фактических центров возмущения и позволяет диспетчеру провести дальнейший анализ, используя дополнительную информацию, к примеру табличный вариант отображения данных.

Помимо представления значений отдельных узлов ЭЭС, контуры также можно назначить параметрам, характеризующим режим работы линий электропередачи. В частности, возможна реализация отображения «коэффициентов передачи» при оценке влияния изменения перетоков мощности между двумя узлами ЭЭС [6]. Значение «коэффициента передачи» для каждой пары узлов в системе показывает влияние изменения перетока мощности между заданной парой узлов на каждую линию ЭЭС. Например, если для пары узлов линия имеет значение «коэффициента передачи» 10%, это означает, что 10% передаваемой мощности между этими двумя узлами будет проходить по этой линии. Таким образом, при передаче мощности 300 МВт нагрузка линии составит 30 МВт **(рис. 8).**

Помимо визуализации токов и напряжений, возможно использование контуров и для отображения иных величин. В частности, в [12] авторы использовали цветовые контуры для отображения изменения частоты в системе по данным СВИ в случае качаний активной мощности **(рис. 9).** Кроме того, использование частоты в качестве визуализируемой величины также позволяет достаточно оперативно выявить изолированно работающие части в случае деления системы (**рис. 10**) [21].

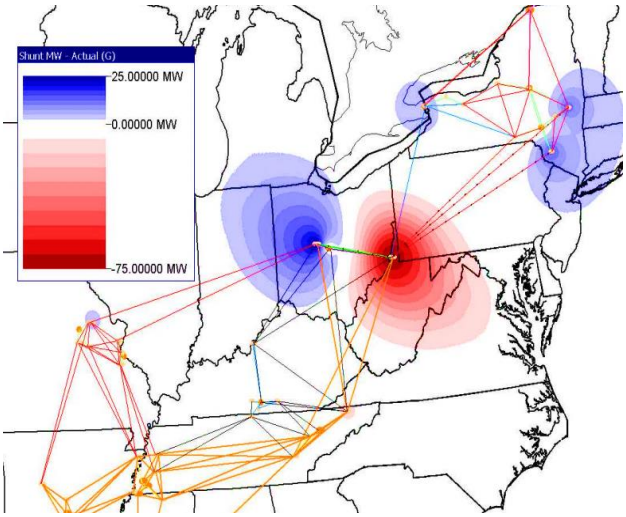


Рис. 7. Отображение возмущения в системе с использованием цветовых контуров

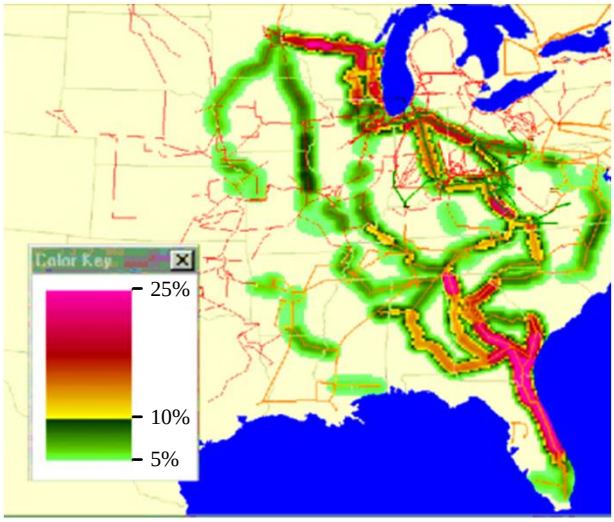


Рис. 8. Отображение коэффициентов передачи линий с помощью цветовых контуров

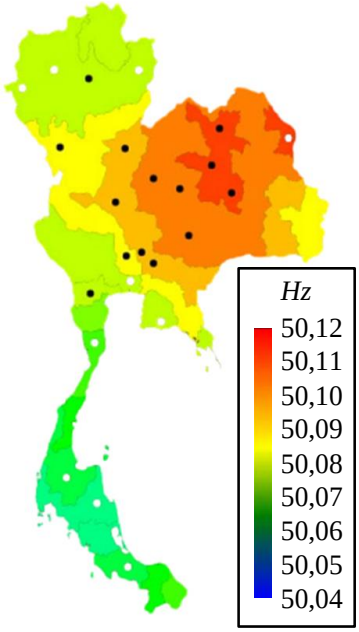


Рис. 9. Отображение частоты в системе при качаниях активной мощности

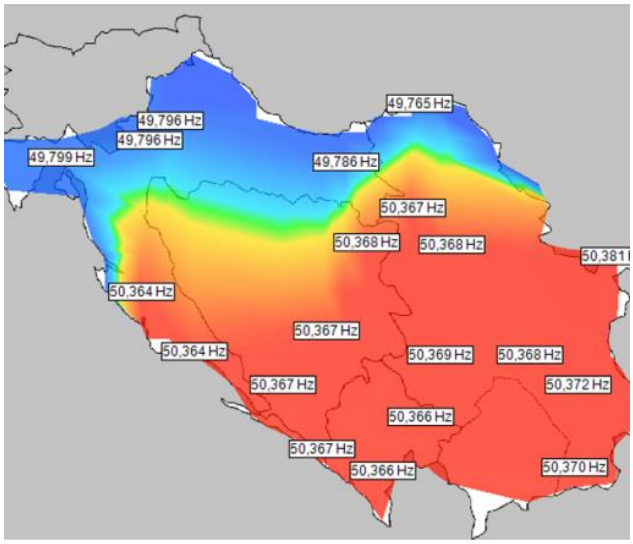


Рис. 10. Отображение частоты при делении системы

Визуализация всей системы в целом может быть дополнена детальным отображением характеристик и условий работы отдельных устройств. На уровне устройства оператору необходима подробная информация, которая может включать в себя отображение в реальном времени динамических характеристик, отражающих как текущую загрузку устройства, так и его перегрузочную способность. Как правило, для представления характеристик конкретных устройств используются линейные графики и диаграммы.

Визуализация состояния ЭЭС в трехмерном пространстве

Представленные ранее методы визуализации данных могут быть весьма полезны, когда необходимо отобразить данные одного типа. Представляющая для диспетчера интерес информация может включать в себя как зависимые, так и независимые переменные, включая величины напряжения на шинах, загрузку линий электропередач, резервы мощности генерирующего оборудования, положения отпаек трансформаторов, прогнозные и фактические перетоки мощности между отдельными частями ЭЭС и т.д. При этом их динамическое отображение в рамках традиционно используемых двумерных вариантах визуализации сопряжено с ограничением как с точки зрения восприятия информации операторами программных комплексов, так и возможностями репрезентативного представления больших объемов данных, отражающих различные характеристики режима работы ЭЭС. Для более полного представления состояния ЭЭС в дополнение к традиционным двумерным моделям ЭЭС все чаще применяют отображение отдельных характеристик ЭЭС в трехмерном пространстве.

В [6] третье измерение (**рис. 11**) позволяет помимо информации о загрузке ЛЭП и направлении перетоков мощности динамически отобразить величину реактивной мощности, выдаваемой генерирующими установками, при этом высота цилиндров в узлах генерации пропорциональна выдаваемой реактивной мощности.

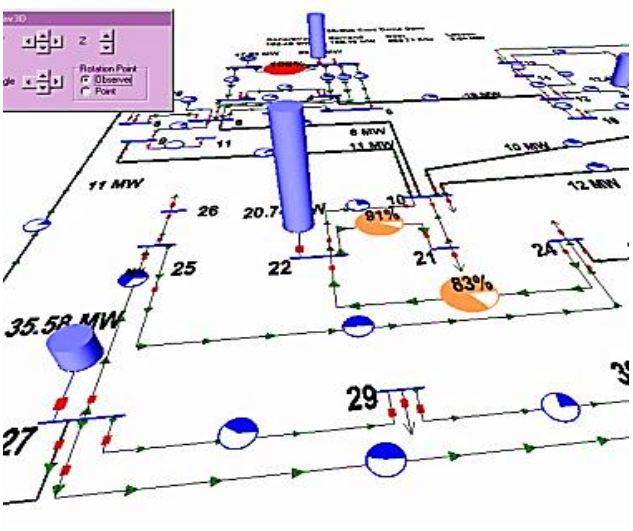


Рис. 11. Отображение величины выдаваемой реактивной мощности с использованием трехмерного отображения состояния ЭЭС

Стоит отметить, что распространение СВИ открывает ряд перспективных направлений для исследования в области визуализации данных. В [16] предлагается метод обработки данных СВИ на основе использования сингулярных чисел. Предлагаемый подход позволяет связать «входные» и «выходные» параметры ЭЭС. При этом в качестве входных данных принимаются меняющиеся во времени нагрузки/инъекции мощности в узлах, а в качестве выходных – измеренные значения углов и напряжений. Авторами предлагается подход, который позволяет отказаться от классической оценки состояния, а использовать вместо нее разложение по сингулярным числам матрицы данных СВИ для заданного промежутка времени, тем самым сокращая время для получения данных о текущем состоянии по системе в целом и, как следствие, снижая задержку между поступлением данных и их отображением. Меняя матрицу данных возможно отследить изменения поведения параметров системы в режиме реального времени. Однако отмечается, что точность метода во многом зависит от количества точек измерения СВИ. Кроме того, авторы отметают, что большая часть измерений в энергосистеме обеспечивает лишь некое локализованное представление об условиях в конкретной точке электрической сети.

В [22] авторы предлагают использовать методы нелинейного анализа временных рядов, основанные на комбинированном применении разложения по эмпирическим модам и гильбертова анализа, для характеристики динамического поведения ЭЭС на основе СВИ. Результаты дают некоторое представление о природе временных спектральных вариаций характеристик, при этом данный метод эффективен для обнаружения и визуализации как колебательных, так и переходных процессов в энергосистеме, вызванных возмущениями.

Авторы в статье [23] описывают новый подход к оценке запаса устойчивости по напряжению на основе СВИ. Ими предлагается метод, основанный на использовании теоремы Тевенина и метода преобразования Мебиуса, для определения характеристики нагрузки в системе с последующим определением границы устойчивости по напряжению с помощью СВИ и ее представления в комплексном пространстве мощностей в реальном времени (**рис. 12**).

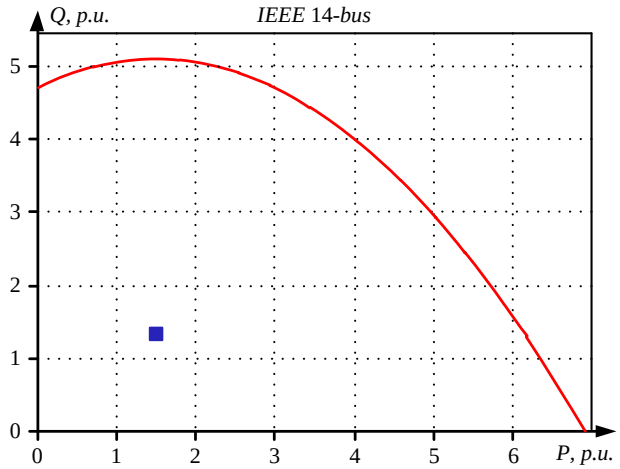


Рис. 12. Пример представления границы запаса устойчивости по напряжению

В [24] представлен метод кластеризации и визуализации данных СВИ, основанный на плотности пространственной кластеризации для приложений с шумами для визуализации и анализа данных ЭЭС. Метод помогает обнаруживать неверные данные, различные типы неисправностей, отклонения значений частоты, напряжения. Алгоритм выстраивает области с достаточно высокой плотностью однотипных данных в кластеры и обнаруживает кластеры произвольной формы в пространственных базах данных с шумом. Он определяет кластер как максимальное множество плотносвязанных точек, позволяя при этом анализировать большие объемы данных, характерные для СВИ. На **рис. 13** и **14** представлены результаты выделения кластеров данных при нормальном режиме работы ЭЭС и при коротком замыкании. Полученные результаты могут быть использованы как при анализе ретроспективных данных в случае возникновения крупных возмущений, так и при мониторинге состояния системы в режиме реального времени.

В [25] представлена методология фильтрации доступных данных с целью формирования динамической модели системы в реальном времени и ее последующей визуализации. На основании полученной модели выполняется визуализация текущего состояния генерирующих установок (**рис. 15**), трехмерная модель показывает положение каждого генератора в соответствии с углом выбега ротора.

Кроме того, относительное значение скорости вращения ротора генератора (выше/ниже синхронной скорости) показано стрелками, которые пропорциональны числовому значению скорости, при этом обновление системы производится 60 раз в секунду, что при достаточном уровне внедрения УСВИ в системе позволяет достаточно подробно отображать текущее состояние генерирующего оборудования в системе в целом.

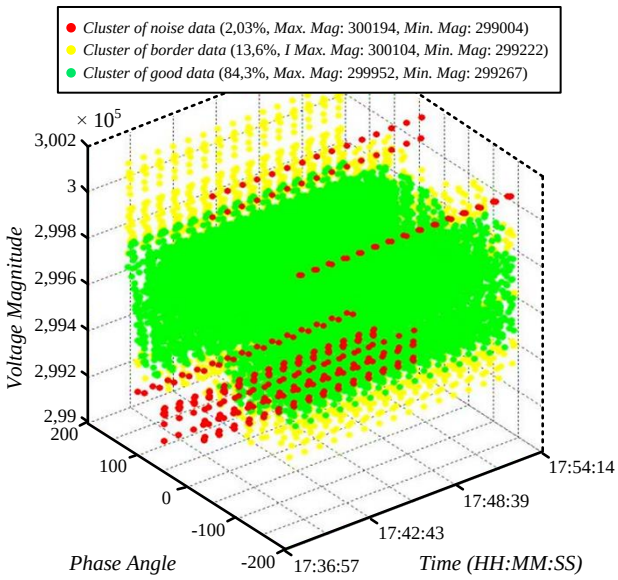


Рис. 13. Пример использования алгоритма кластеризации для данных СВИ в нормальном режиме

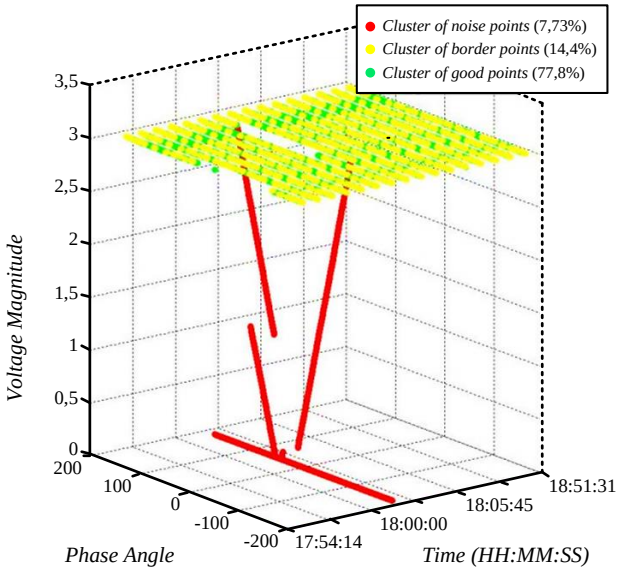


Рис. 14. Пример использования алгоритма кластеризации для данных СВИ в режиме короткого замыкания

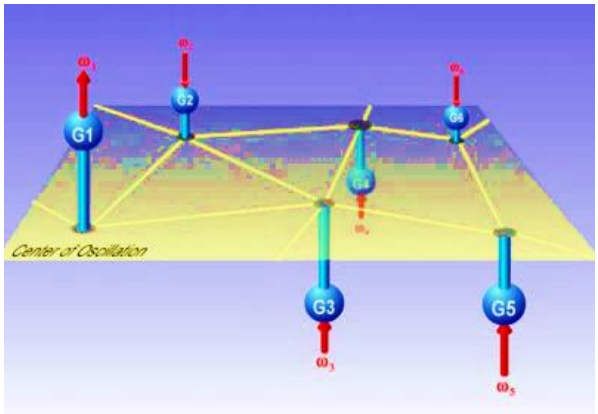


Рис. 15. Трехмерная модель визуализации текущего состояния генерирующих установок

Заключение

Современный уровень развития цифровой техники и информационных технологий позволяет передавать и обрабатывать в реальном масштабе времени значительные массивы информации, что обеспечивает возможность совершенствования систем мониторинга, защиты и управления режимами работы энергосистемы. При этом выбор отображаемых переменных наряду с алгоритмами обработки данных и способами их отображения играет решающую роль в процессе принятия решений в диспетчерских центрах. Одна из ключевых тенденций в области визуализации измерительной информации от УСВИ для диспетчерского персонала обусловлена повышением репрезентативности состояния системы за счет большей скорости обновления данных в рамках визуализируемой модели ЭЭС. Однако не менее важное направление связано с идентификацией аварийных состояний за счет обработки поступающих потоков данных от УСВИ в темпе процесса и последующим формированием аварийных сигналов для повышения ситуационной осведомленности оперативно-диспетчерского персонала в диспетчерских центрах и на отдельных объектах в рамках энергосистемы.

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 литературы

1. Tate J.E. Event Detection and Visualization Based on Phasor Measurement Units for Improved Situational Awareness. Urbana, Illinois: University of Illinois at Urbana-Champaign, 2008.
2. Wang W. Advanced Wide-Area Monitoring System Design, Implementation, and Application. Knoxville: The University of Tennessee, 2021. 139 p.
3. Schlaepfer F., Kelly T.C., Dewey A.G. An Interactive Load Flow Program // IEEE Trans. Power Appar. Syst. 1972. Vol. PAS-91. Is. 1. Pp. 78-84. doi: 10.1109/TPAS.1972.293293.
4. Pires de Azevedo G., Sieckenius de Souza C., Feijo B. Enhancing the human-computer interface of power system applications // IEEE Trans. Power Syst. 1996. Vol. 11. Is. 2. Pp. 646-653. doi: 10.1109/59.496134
5. Weber J.D., Overbye T.J. Voltage contours for power system visualization // IEEE Trans. Power Syst. 2000. Vol. 15. Is. 1. Pp. 404-409. doi: 10.1109/59.852151
6. Visualization of Power Systems and Components. URL: https://pserc.wisc.edu/wp-content/uploads/sites/755/2018/08/S-18_ Final-Report_Nov-2005.pdf. (дата обращения 02.04.2022)
7. An interactive, extensible environment for power system simulation on the PMU time frame with a cyber security application / T.J. Overbye, Z. Mao, K.S. Shetye, J.D. Weber // IEEE Texas Power and Energy Conference (TPEC). TX, USA: IEEE, 2017. Pp. 1-6. doi: 10.1109/TPEC.2017.7868264
8. Mahadev P.M., Christie R.D. Envisioning power system data: concepts and a prototype system state representation // IEEE Trans. Power Syst. 1993. Vol. 8. Is. 3. Pp. 1084-1090. doi: 10.1109/59.260890
9. Hock K.P., McGuiness D. Future State Visualization in Power Grid // IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe). Palermo: IEEE, 2018. Pp. 1-6. doi: 10.1109/EEEIC.2018.8494435
10. Davis C.M., Tate J.E., Overbye T.J. Wide Area Phasor Data Visualization // 39th North Am. Power Symp. IEEE, 2007. Pp. 246-252. doi: 10.1109/NAPS.2007.4402318
11. Wide area power system visualization using real-time synchrophasor measurements /G. Zhang, S.Lee, R.Caroll, J.Zuo, L. Beard, Y. Liu // IEEE PES Gen. Meet. IEEE, 2010. Pp. 1-7. doi: 10.1109/PES.2010.5588188
12. Wide-area visualization tool development for displaying Thailand power grid dynamics / B. Sriraphanth, W. Wangdee, P. Phunkasem, B. Tanboonjit, S. Chumnanvanichkul // International Electrical Engineering Congress (iEECON). Pattaya, Thailand: IEEE, 2017. Pp. 1-4. doi: 10.1109/IEECON.2017.8075748
13. Animated vectors for visualization of power system phenomena / J. Gronquist, W. Sethares, F.Alvarado, R. Lasseter // IEEE Trans. Power Syst. 1996. Vol. 11. Is. 1. Pp. 267-273. doi: 10.1109/59.486105
14. Design of Visualization Interface for Transmission Congestions / Y.-K Wu, X.C. Lee, C.Y. Hu, Po-En Su // Energy Procedia. 2017. Vol. 141. Pp. 432-437. doi: 10.1016/j.egypro.2017.11.056
15. Overbye T.J., Weber J. Smart Grid Wide-Area Transmission System Visualization // Engineering. 2015. Vol. 1. Is. 4. Pp. 466-474. doi: 10.15302/J-ENG-2015098

16. Using PMU Data to Increase Situational Awareness Final Project Report. https://documents.pserc.wisc.edu/documents/publications/reports/2010_reports/S-36_Final-Report_Sept-2010.pdf. (дата обращения 02.04.2022)
17. Advanced graphics zoom in on operations / M.D. Anderson, H.J. Pottinger, C.M. Schroeder, R. Adapa // IEEE Comput. Appl. Power. 1993. Vol. 6. Is. 2. Pp. 25-28. doi: 10.1109/67.207468
18. Human factor aspects of power system flow animation / D.A. Wiegmann, G.R. Essenberg, T.J. Overbye, Y. Sun // IEEE Trans. Power Syst. 2005. Vol. 20. Is. 3. Pp. 1233-1240. doi: 10.1109/TPWRS.2005.851967
19. Human factors aspects of power system voltage contour visualizations / D.A. Wiegmann, A.M. Rich, T.J. Overbye, Y. Sun // IEEE Trans. Power Syst. 2003. Vol. 18, Is. 1. Pp. 76-82. doi: 10.1109/TPWRS.2002.807060
20. Animated vectors for visualization of power system phenomena /J. Gronquist, W. Sethares, F. Alvarado, R. Lasseter// IEEE Trans. Power Syst. 1996. Vol. 11. Is 1. Pp. 267-273. doi: 10.1109/59.486105
21. WAMS in the control room – a TSO perspective [Electronic resource]. URL: https://www.naspi.org/sites/default/files/2021-10/2021_oct_naspi_wg_keynote_rubesa.pdf. (дата обращения 02.04.2022)
22. Interpretation and Visualization of Wide-Area PMU Measurements Using Hilbert Analysis / A.R. Messina, V. Vittal, D. Ruiz-Vega, G. Enriquez-Harper // IEEE Trans. Power Syst. 2006. Vol. 21. Is. 4. Pp. 1763-1771. doi: 10.1109/TPWRS.2006.881153
23. Su H.-Y., Liu T.-Y. A PMU-Based Method for Smart Transmission Grid Voltage Security Visualization and Monitoring // Energies. 2017. Vol. 10(8). 1103. doi: 10.3390/en10081103
24. Using phasor data for visualization and data mining in smart-grid applications / A. Mukherjee, R. Vallakati, V. Lachenaud, P. Ranganathan // IEEE First Int. Conf. DC Microgrids (ICDCM). Atlanta, GA, USA: IEEE, 2015. Pp. 13-18. doi: 10.1109/ICDCM.2015.7152002
25. Visualization and Characterization of Stability Swings via GPS-Synchronized Data / G. Cokkinides, A. Sakis Meliopoulos, G. Stefopoulos, R. Alaileh, A. Mohan // 40th Annual Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS). Waikoloa, HI, USA: IEEE, 2007. Pp. 120-120. doi: 10.1109/HICSS.2007.607

Поступила в редакцию 21 марта 2022 г.

INFORMATION IN ENGLISH

DYNAMIC VISUALIZATION METHODS OF ELECTRIC POWER SYSTEM STATE BASED ON SYNCHRONIZED VECTOR MEASUREMENTS

Rustam T. Valiev

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Department of Automated Electric Systems, Ural Power Engineering Institute, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin», Yekaterinburg, Russia, https://orcid.org/0000-0002-8603-3246

Petr M. Erokhin

D.Sc. (Engineering), Professor, Full Professor Researcher, Department of Automated Electric Systems, Ural Power Engineering Institute, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin», Yekaterinburg, Russia

Andrey V. Pazderin

D.Sc. (Engineering), Professor, Head of the Department, Department of Automated Electric Systems, Ural Power Engineering Institute, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin», Yekaterinburg, Russia. E-mail: a.v.pazderin@urfu.ru, http://orcid.org/0000-0003-4826-2387

The use of synchronized vector measurement technology based on high-precision measurement of electrical regime parameters at various points of the EPS can significantly increase the observability of the processes occurring in the power system. Real-time visualization of the SVM makes it possible to achieve an increase in situational awareness of operational dispatch personnel, both in dispatch centers and at individual power system facilities, allowing responsible persons to respond faster to disturbances that arise in the system. The existing systems for data collection and operational dispatch control of both foreign and domestic manufacturers allow visualization of SVM both at the pace of the process and after the fact, keeping retrospective data, in case of disturbances in the EPS. The main visualization methods, as a rule, include: the use of contours (gradient display) of EPS characteristics (voltage angles, power flows in the system, etc.), the placement of pie charts and indicators to display bus voltage, load power lines, etc. and the use of combined indicators for displaying the direction of power flows in the system. Among the key trends in the field of visualization of measurement information for dispatching personnel, it is worth highlighting the increase in the representativeness of the system state due to a higher data update rate within the framework of the visualized EPS model and the identification of emergency conditions due to the processing of incoming data streams from PMU at the pace of the process with subsequent alarm formation for the dispatcher.

Keywords: state assessment, synchronized vector measurements, EPS state visualization.

REFERENCES

1. Tate J.E. Event Detection and Visualization Based on Phasor Measurement Units for Improved Situational Awareness. Urbana. Illinois, University of Illinois at Urbana-Champaign, 2008.
2. Wang W. Advanced Wide-Area Monitoring System Design, Implementation, and Application. Knoxville, The University of Tennessee, 2021. 139 p.
3. Schlaepfer F., Kelly T.C., Dewey A.G. An Interactive Load Flow Program. IEEE Trans. Power Appar. Syst. 1972, vol. PAS-91, Is. 1, pp. 78-84. doi: 10.1109/TPAS.1972.293293
4. Pires de Azevedo G., Sieckenius de Souza C., Feijo B. Enhancing the human-computer interface of power system applications. IEEE Trans. Power Syst. 1996, vol. 11, Is. 2,

pp. 646-653. doi: 10.1109/59.496134
5. Weber J.D., Overbye T.J. Voltage contours for power system visualization. IEEE Trans. Power Syst, 2000, vol. 15, Is. 1, pp. 404-409. doi: 10.1109/59.852151
6. Visualization of Power Systems and Components. Available at: https://pserc.wisc.edu/wp-content/uploads/sites/755/2018/08/S-18_Final-Report_Nov-2005.pdf (accessed 02 April 2022)
7. Overbye T.J., Mao Z., Shetye K.S., Weber J.D. An interactive, extensible environment for power system simulation on the PMU time frame with a cyber security application. IEEE Texas Power and Energy Conference (TPEC). IEEE, 2017, pp. 1-6. doi: 10.1109/TPEC.2017.7868264
8. Mahadev P.M., Christie R.D. Envisioning power system data: concepts and a prototype system state representation. IEEE Trans. Power Syst. 1993, vol. 8, Is. 3, pp. 1084-1090. doi: 10.1109/59.260890
9. Hock K.P., McGuiness D. Future State Visualization in Power Grid. IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe). IEEE, 2018, pp. 1-6. doi: 10.1109/EEEIC.2018.8494435
10. Davis C.M., Tate J.E., Overbye T.J. Wide Area Phasor Data Visualization. 39th North Am. Power Symp. IEEE, 2007, pp. 246-252. doi: 10.1109/NAPS.2007.4402318
11. Zhang G., Lee S., Caroll R., Zuo J., Beard L., Liu Y. Wide area power system visualization using real-time synchrophasor measurements. IEEE PES Gen. Meet. IEEE, 2010, pp. 1-7. doi: 10.1109/PES.2010.5588188
12. Sriraphanth B., Wangdee W., Phunkasem P., Tanboonjit B., Chumnanvanichkul S. Wide-area visualization tool development for displaying Thailand power grid dynamics. International Electrical Engineering Congress (iEECON). IEEE, 2017, pp. 1-4. doi: 10.1109/IEECON.2017.8075748
13. Gronquist J., Sethares W., Alvarado F., Lasseter R. Animated vectors for visualization of power system phenomena. IEEE Trans. Power Syst. 1996, vol. 11, Is. 1, pp. 267-273. doi: 10.1109/59.486105
14. Wu Y.-K., Lee X.C., Hu C.Y., Su Po-En. Design of Visualization Interface for Transmission Congestions. Energy Procedia, 2017, vol. 141, pp. 432-437. doi: 10.1016/j.egypro.2017.11.056
15. Overbye T.J., Weber J. Smart Grid Wide-Area Transmission System Visualization. Engineering, 2015, vol. 1, Is. 4, pp. 466-474. doi: 10.15302/J-ENG-2015098
16. Using PMU Data to Increase Situational Awareness Final Project Report. Available at: https://documents.pserc.wisc.edu/documents/publications/reports/2010_reports/S-36_Final-Report_Sept-2010.pdf (accessed 02 April 2022)
17. Anderson M.D., Pottinger H.J., Schroeder C.M., Adapa R. Advanced graphics zoom in on operations. IEEE Comput. Appl. Power, 1993, vol. 6, Is. 2, pp. 25-28. doi: 10.1109/67.207468
18. Wiegmann D.A., Essenberg G.R., Overbye T.J., Sun Y. Human factor aspects of power system flow animation. IEEE Trans. Power Syst. 2005, vol. 20, Is. 3, pp. 1233-1240. doi: 10.1109/TPWRS.2005.851967
19. Wiegmann D.A., Rich A.M., Overbye T.J., Sun Y. Human factors aspects of power system voltage contour visualizations. IEEE Trans. Power Syst. 2003, vol. 18, Is. 1, pp. 76-82. doi: 10.1109/TPWRS.2002.807060
20. Gronquist J., Sethares W., Alvarado F., Lasseter R. Animated vectors for visualization of power system phenomena. IEEE Trans. Power Syst. 1996, vol. 11, Is. 1, pp. 267-273. doi: 10.1109/59.486105
21. WAMS in the control room – a TSO perspective [Electronic resource]. Available at: https://www.naspi.org/sites/default/files/2021-10/ 2021_oct_ naspi_wg_keynote_rubesa.pdf. (accessed 02 April 2022)
22. Messina A.R., Vittal V., Ruiz-Vega D., Enriquez-Harper G. Interpretation and Visualization of Wide-Area PMU Measurements Using Hilbert Analysis. IEEE Trans. Power Syst. 2006, vol. 21, Is. 4, pp. 1763-1771. doi: 10.1109/TPWRS.2006.881153
23. Su H.-Y., Liu T.-Y. A PMU-Based Method for Smart Transmission Grid Voltage Security Visualization and Monitoring. Energies, 2017, vol. 10(8), 1103. doi: 10.3390/en10081103
24. Mukherjee A., Vallakati R., Lachenaud V., Ranganathan P. Using phasor data for visualization and data mining in smart-grid applications. IEEE First Int. Conf. DC Microgrids (ICDCM). IEEE, 2015, pp. 13-18. doi: 10.1109/ICDCM.2015.7152002
25. Cokkinides G., Sakis Meliopoulos A., Stefopoulos G., Alaileh R., Mohan A. Visualization and Characterization of Stability Swings via GPS-Synchronized Data. 40th Annual Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS). IEEE, 2007, pp. 120-120. doi: 10.1109/HICSS.2007.607

Валиев Р.Т., Ерохин П.М., Паздерин А.В. Обзор методов динамической визуализации состояния электроэнергетических систем на основе синхронизированных векторных измерений // Электротехнические системы и комплексы. 2022. № 2(55). С. 47-54. https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-2(55)-47-54

Valiev R.T., Erokhin P.M., Pazderin A.V. Dynamic Visualization Methods of Electric Power System State Based on Synchronized Vector Measurements. *Elektrotekhnicheskie sistemy i kompleksy* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2022, no. 2(55), pp. 47-54. (In Russian). https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-2(55)-47-54

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ

УДК 621.311 https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-2(55)-55-61

Корнилов Г.П.[1], Газизова О.В.[1, 2], Абдулвелеев И.Р.[1], Лыгин М.М.[1], Бочкарев А.А.[1]

[1] Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова
[2] Тюменский индустриальный университет, филиал ТИУ в Тобольске

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЗАВОДСКИХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Развитие собственной генерации электрической энергии является одной из особенностей металлургических производств. Благодаря использованию вторичных энергоресурсов – доменного и коксового газов – электроэнергия, производимая на заводских электростанциях, существенно дешевле покупной, получаемой из энергосистемы. Собственные электростанции крупнейших российских металлургических комбинатов – ПАО «ММК», ПАО «НЛМК», ПАО «Северсталь» – покрывают в настоящее время 60-70 % общего потребления электроэнергии на каждом из этих предприятий. Статья посвящена исследованию резервов снижения потребления электроэнергии в системе собственных нужд одной из старейших электростанций ПАО «ММК». Рассматриваемая электростанция имеет в своем составе 8 энергетических котлов и 9 турбогенераторов мощностью более 200 МВт, она обеспечивает электроэнергией и теплом основные цеха предприятия, а также один из районов города. Транспортировка и подача основных компонентов технологического производства – воды, воздуха и топлива – осуществляется нерегулируемыми асинхронными электроприводами. Наиболее мощными и ответственными из них являются двигатели питательных насосов, которые осуществляют подачу воды к котлам с заданными параметрами – расходом и давлением. На сегодняшний день регулирование давления в системе производят ручным дросселированием за счет включения или отключения одного из насосов. Актуальной и практически значимой проблемой является обеспечение основных параметров питательных насосов за счет регулирования скорости электроприводов, что существенно повысит энергоэффективность станции. На математической модели проведено исследование режимов работы группы насосов с общим коллектором, где особое внимание уделено моделированию гидравлической части системы. В статье рассмотрены наиболее эффективные способы поддержания требуемого уровня давления. Согласно результатам комплексных исследований, проведенных на разработанной модели, авторами предложено каскадно-частотное управление регулируемых электроприводов питательных насосов. Внедрение такого решения обеспечит снижение потребления электроэнергии одного из насосов более чем на 20%.

Ключевые слова: электростанция, повышение эффективности, дросселирование, регулируемый привод, преобразователь частоты, питательные насосы, каскадно-частотное регулирование, заводское электроснабжение.

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день известны два типа заводских электростанций: конденсационные (КЭС) и тепловые (ТЭС). Особенностью ТЭС является когенерация – возможность выработки тепловой и электрической энергии одновременно благодаря наличию в технологической схеме противодавленческой турбины с отбором пара на теплофикацию и собственные нужды.

Объектом исследования в данной статье является центральная электростанция (ЦЭС) крупного металлургического предприятия – ПАО «ММК», в которой большинство потребителей собственных нужд – насосов и вентиляторов – работают на генераторном напряжении [1-4]. На станции установлено 13 питательных насосов и 2 насоса пароохлаждения. Питательные электронасосы (ПЭН) обеспечивают подачу очищенной и подогретой воды в питательные магистрали котлов и подключены по всасыванию к двум общим коллекторам, собирающим воду из всех деаэраторных баков. По нагнетанию все насосы включены в общий напорный коллектор, секционированный задвижками.

Регулирование давления в коллекторе осуществляется двумя способами:

1. Использование одного из ПЭН в качестве насоса-регулятора. Обычно выбирают насос небольшой мощности, который поддерживает давление в коллекторе на заданном уровне за счет включения и отключения.

2. Ручное дросселирование задвижкой.

Существенным резервом повышения энергетической эффективности ПЭН является замена ручного регулирования подачи воды на автоматическое за счет применения преобразователей частоты (ПЧ) [5-10].

Для решения поставленной задачи проведены экспериментальные исследования энергетических показателей ответственных приводов насосов с целью выявления необходимости и возможности установки частотных преобразователей, обеспечивающих существенное снижение потребления электроэнергии и приемлемые сроки окупаемости приобретаемого оборудования.

Отдельного внимания заслуживает разработка и исследование математической модели каскадно-частотного управления многодвигательных регулируемых электроприводов питательных насосов [11-13].

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПИТАТЕЛЬНОГО НАСОСА

Выбор питательных насосов в качестве объекта исследования обусловлен следующими причинами:

а) достаточно большая установленная мощность электродвигателей насосов может обеспечить существенную экономию электроэнергии при рациональном управлении их производительностью;

© Корнилов Г.П., Газизова О.В., Абдулвелеев И.Р., Лыгин М.М., Бочкарев А.А., 2022

б) наличие двигателей различной мощности дает широкие возможности выбора их сочетаний для поддержания необходимых параметров – расхода и напора воды.

С учетом сказанного, безальтернативным, научно обоснованным и подтвержденным на практике способом управления подачей воды является применение ПЧ в электроприводах питательных насосов. Кроме того, переход на частотное регулирование позволяет существенно повысить энергоэффективность и улучшить экономические показатели электростанции.

В настоящее время приводы питательных насосов осуществляются от асинхронных двигателей мощностью 320-630 кВт и напряжением 3,15 кВ. Среднегодовая производительность питательной воды составляет 1100 т/ч и, как правило, колеблется от 730 до 1400 т/ч. Режим работы питательных насосов должен быть таким, чтобы в нагнетательном коллекторе поддерживалось номинальное давление 41 - 45 кгс/см². Выход за пределы данного интервала не допускается ни при каких условиях. Поэтому работают 3 или 4 насоса, тогда как остальные насосы должны находиться в резерве [14, 15].

Для исследования стабилизации давления в коллекторе котла и анализа энергоэффективности системы собственных нужд ЦЭС разработана математическая модель, реализованная в программном комплексе Matlab Simulink и включающая в себя электромеханическую и гидравлическую части модели ПЭН и модель потребителя.

Ниже рассмотрены вопросы моделирования работы группы ПЭН при работе на общий водяной коллектор, из которого осуществляется подача воды в котлы [16]. Моделируемый комплекс насосов и потребителя упрощенно показан на **рис. 1**.

Для моделирования работы ПЭН используется следующее уравнение центробежного насоса:

$$\frac{dQ_i}{dt} = \frac{S_т}{l\rho}\left(P_i + P_{вх} - P_{вых} - R_{гΣ}Q_i^2\right), \qquad (1)$$

где Q_i – расход жидкости насоса; $S_т$ – площадь сечения выходного трубопровода насоса; l – длина трубопровода; ρ – плотность жидкости; P_i – давление, создаваемое насосом; $P_{вх}$ – давление на входе трубопровода; $P_{вых}$ – давление на выходе из отводящего трубопровода; $R_{гΣ}$ – суммарное гидравлическое сопротивление участка трубопровода.

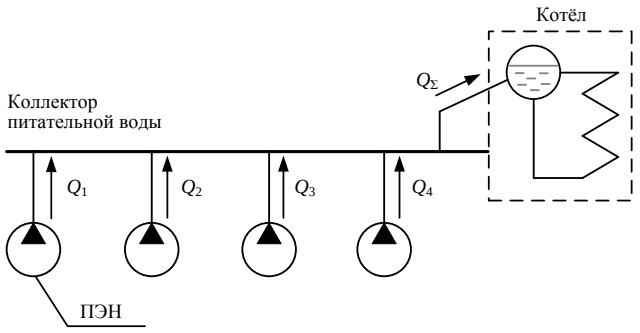


Рис. 1. Работа группы ПЭН на общий коллектор

Давление P_i в формуле (1), развиваемое насосом, зависит от скорости вращения следующим образом:

$$P_i = \left(\frac{\omega}{\omega_{ном}}\right)^2 k_п, \qquad (2)$$

где $\omega_{ном}$, ω – номинальная и действительная скорости вращения насоса; $k_п$ – коэффициент пересчета скорости в давление, зависящий от конструкции насоса.

Таким образом, с учетом формул (1) и (2) можно записать выражения для развиваемой насосом гидравлической мощности и момента на валу:

$$P_г = P_i Q_i, \qquad (3)$$

где $P_г$ – гидравлическая мощность насоса.

$$M_i = \frac{P_i Q_i}{\eta\omega}, \qquad (4)$$

где M_i – момент на валу насоса; η – КПД насоса.

Отметим также, что модель насоса дополнена подсистемой, определяющей изменение механического КПД насоса при изменении скорости вращения. Изменение КПД в зависимости от угловой скорости насоса определяется с помощью формулы Муди, преобразованной для насосов:

$$\eta = 1 - \frac{1-\eta_{ном}}{\left(\frac{\omega}{\omega_{ном}}\right)^{0,36}}, \qquad (5)$$

где $\eta_{ном}$ – номинальный КПД насоса.

В модели насоса гидравлическое сопротивление разделено на две составляющие: непосредственно сопротивление насоса и сопротивление регулирующей задвижки. Обычно насосы имеют обратные клапаны, поэтому используется интегратор с нижним ограничением равным нулю. Таким образом, расход не может быть отрицательным.

Для моделирования потребителя можно использовать следующую зависимость:

$$P = R_{тк}Q_Σ^2 + P_с, \qquad (6)$$

где $Q_Σ$ – суммарный расход всех насосов в коллекторе; $R_{тк}$ – приведенное гидравлическое сопротивление коллектора; $P_с$ – статическое давление (напор).

При моделировании работы нескольких насосов на общий коллектор необходимо просуммировать их расходы, а сигнал давления, полученный на входе коллектора, подать на соответствующий вход насосов (**рис. 2**). В настоящее время привод насосов осуществляется от асинхронных двигателей с прямым пуском от сети, но в будущем планируется применение систем плавного пуска или частотных преобразователей. Для моделирования приводных двигателей использовались известные уравнения напряжений, токов и потокосцеплений асинхронного двигателя, приведенные к 2-фазной системе координат *d-q*. Уравнение движения электропривода питательного насоса имеет вид

$$M_{эм} - M_i = J_Σ \frac{d\omega}{dt}, \qquad (7)$$

где $M_{эм}$ – электромагнитный момент двигателя; $J_Σ$ – суммарный момент инерции.

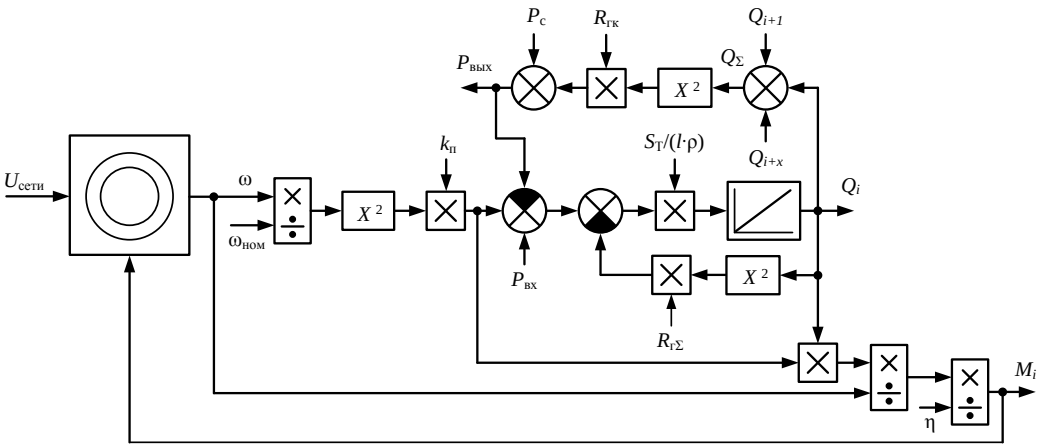


Рис. 2. Структурная схема модели ПЭН, работающего на общий коллектор от нерегулируемого асинхронного двигателя

Рассмотрим процесс определения параметров модели на примере одного из питательных насосов, параметры которого представлены в **табл. 1**. Исходя из паспортных данных насоса, по двум характерным точкам расхода (0 и 300 м^3/ч) рассчитывается гидравлическое сопротивление насоса:

$$R_г = \frac{P_0 - P_i}{Q_i^2}, \qquad (8)$$

где P_0 = 5148 кПа – давление при нулевом расходе.

Характеристика $P = f(Q)$ для одного насоса, полученная по представленным в **табл. 1** параметрам, показана на **рис. 3** (кривая 1). Также на рисунке приведены характеристики для системы с 2, 3 и 4-мя насосами соответственно, работающих на общего потребителя при разных расходах потребляемой воды. Характерной особенностью рассматриваемого потребителя является наличие противодавления из-за давления в котлах и необходимости подъема воды на высоту.

На **рис. 3** показаны диапазоны возможной регулировки давления при изменении расхода. Из-за наличия противодавления и сочетания параметров потребителя и насосов диапазон регулирования давления находится в пределах 4-4,8 МПа. Диапазон регулирования при использовании ПЧ находится приблизительно в этих же пределах и будет уточнен далее на динамической модели.

Значение гидравлического сопротивления коллектора $R_{гк}$ может меняться в процессе работы. Определим значение сопротивления, относительно которого будет возможно изменение режима работы системы при моделировании. Из данных рабочего режима станции, полученных опытным путем, рассчитаем значение $R_{гк}$ согласно (6). Примем в качестве расчетного режима ситуацию, когда три насоса работают с расходом 300 м^3/ч и один – 100 м^3/ч (точка «*A*» на **рис. 3**). В результате 4 насоса работают с суммарным расходом 1000 м^3/ч (или 0,278 м^3/с), при этом в коллекторе создается давление 4,511 МПа. Отсюда гидравлическое сопротивление коллектора составит

$$R_{гк} = \frac{P - P_с}{Q_Σ^2} = \frac{(4{,}511 - 4)\cdot 10^6}{0{,}278^2} = 6612\,\frac{кПа\cdot с^2}{м^6}. \qquad (9)$$

Таблица 1

Параметры питательного насоса

Параметр	Значение
Номинальная мощность двигателя $P_{ном}$, кВт	630
Номинальная скорость $n_{ном}$, об/мин	1480
Номинальное напряжение $U_{ном}$, кВ	3,15
Номинальный расход $Q_{ном}$, м^3/ч	300
Номинальный напор $H_{ном}$, м вод. ст.	480
Номинальное давление $P_{i.ном}$, кПа	4707
Коэффициент $k_п$, кПа	5148
Гидравлическое сопротивление насоса $R_г$, кПа·с^2/м^6	63549

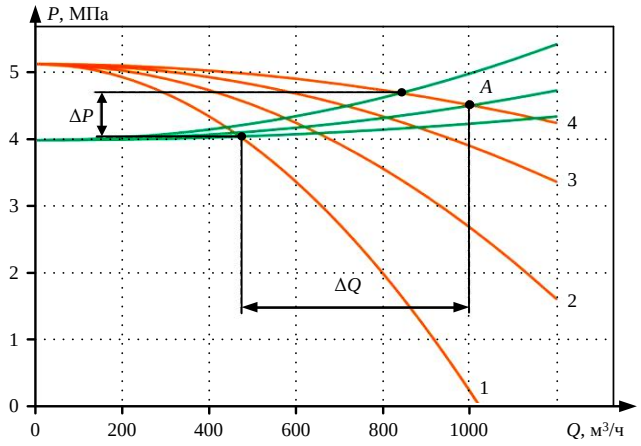


Рис. 3. Характеристика *P=f(Q)* системы из нескольких насосов и потребителя при разном расходе

ИССЛЕДОВАНИЕ КАСКАДНО-ЧАСТОТНОГО УПРАВЛЕНИЯ РЕГУЛИРУЕМЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ПИТАТЕЛЬНЫХ НАСОСОВ

В целях повышения энергоэффективности станции и снижения потребления электроэнергии предложено использование каскадно-частотного управления многодвигательных регулируемых электроприводов питательных насосов. При питании асинхронного двигателя от ПЧ с системой регулирования скорости свойства объекта управления для внешнего наблюдателя существенно линеаризуются. Для этих целей вполне допустимо внутренний контур регулирования момента представить инерционным звеном, как это показано на **рис. 4**.

В предлагаемой системе с ПЧ задание на скорость формирует регулятор давления. Концепция построения такой системы регулирования показана на **рис. 5**.

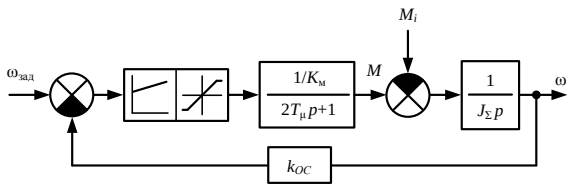


Рис. 4. Структурная схема контура регулирования момента при использовании ПЧ с векторным управлением

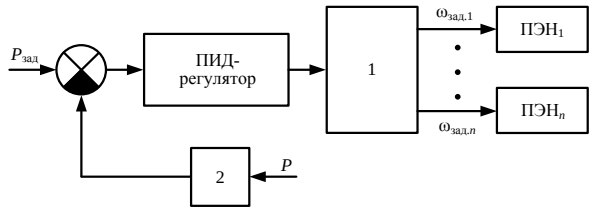


Рис. 5. Принцип построения регулятора давления при частотном управлении ПЭН:
1 – блок распределения заданий скорости;
2 – блок масштабирования и фильтрации

Блок распределения заданий скорости может осуществлять функцию выравнивания загрузки насосных агрегатов по току или производить отключение «лишнего» насоса (в таком случае необходимо предусмотреть возможность адаптации системы, то есть автоматическую подстройку коэффициентов регулятора).

Рассмотрим вариант каскадно-частотного управления системой из четырех насосов, в которой три двигателя работают от сети, а скорость четвертого регулируется преобразователем частоты. Задание скорости для привода с ПЧ формирует ПИД(или ПИ)-регулятор в функции стабилизации давления. Результаты моделирования пуска и работы системы поддержания давления показаны на **рис. 6**.

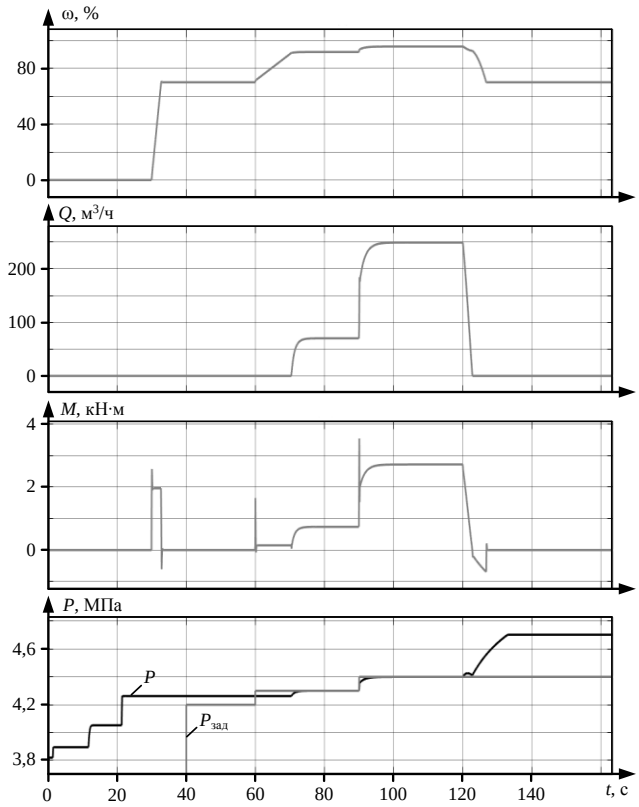


Рис. 6. Результаты моделирования каскадно-частотного управления питательных насосов с регулируемым приводом

В момент времени t=40 с происходит запуск ПЧ и включение регулятора. Далее для демонстрации диапазона регулирования при t=60 с и t=90 с ступенчато изменяется заданное давление. В момент времени t=120 с меняются параметры потребителя воды (эквивалентное гидравлическое сопротивление общего коллектора). Видно, что при учете противодавления, нижняя граница скорости двигателя с ПЧ при регулировании составляет примерно 90-93% от номинальной. Требуемый уровень стабилизации давления в системе ЦЭС обеспечивается в полной мере.

Расчет экономического эффекта

Подача питательной воды в течение года меняется в диапазоне 730-1400 т/ч. В работе всегда находятся три-четыре насоса, а ещё восемь – в резерве. Регулирование производительности осуществляется дросселированием на насосе ПЭН-3 или включением и отключением насоса ПЭН-6 меньшей мощности.

В **табл. 2** показаны результаты расчёта потребляемой насосом ПЭН-3 мощности при регулировании производительности дросселированием. Информация о напоре и расходе взята из характеристики насоса. В расчётах удельный вес воды γ принят равным 1, а КПД насоса η = 0,7.

Питательные насосы подают воду из всасывающего коллектора в нагнетательный. Перепад высоты, который необходимо для этого преодолеть, составляет 4 м. Для уверенного преодоления горизонтального участка перепад высот принимается равным 5 м.

Для расчётов режимов работы, обеспечивающих различную производительность при статическом напоре 5 м, была взята из справочной литературы естественная характеристика насоса и построено семейство расчётных рабочих характеристик. В **табл. 3** показаны результаты расчёта требуемой мощности при регулировании производительности насоса изменением частоты вращения, а на **рис. 7** приведены характеристики насоса при номинальной и пониженной частоте вращения. Для расчёта использованы следующие соотношения:

$$\frac{Q_{ном}}{Q} = \frac{n_{ном}}{n}; \quad (10)$$

$$\frac{H_{ном}}{H} = \left(\frac{n_{ном}}{n}\right)^2; \quad (11)$$

$$\frac{P_{ном}}{P} = \left(\frac{n_{ном}}{n}\right)^3. \quad (12)$$

Таблица 2

Потребляемая насосом мощность при дросселировании

Величина открытия задвижки, %	100	85	70	55	40	25
Поток Q, м^3/ч	300	255	210	165	120	75
Напор H, м вод. ст.	480	503	530	555	580	600
Скорость вращения n, об/мин	1477,5					
Мощность P, кВт	560	499	433	356	270	175

Таблица 3

Потребляемая насосом мощность при изменении частоты вращения

Рабочая частота ПЧ *f*, Гц	50	37,5	35,4	30
Поток *Q*, м^3/ч	300	255	212	180
Напор *H*, м вод. ст.	480	270	240	173
Скорость вращения *n*, об/мин	1478	1108	1046	887
Мощность с ПЧ *P*, кВт	560	236	200	121
Мощность без ПЧ *P*, кВт	560	506	498	485
Экономия мощности Δ*P*, кВт	0	270	298	364

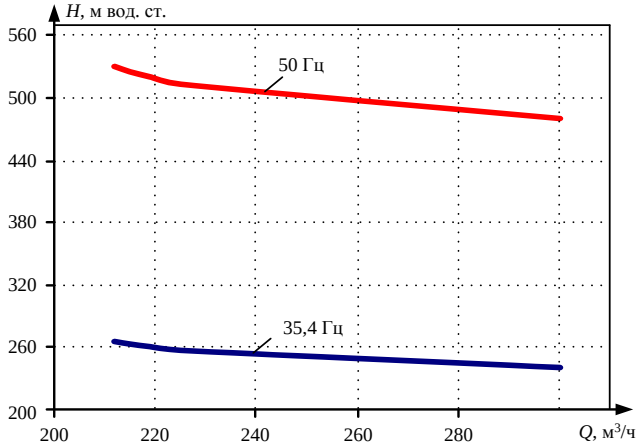


Рис. 7. Характеристики насоса при номинальной и пониженной частоте вращения

Анализ показал, что среднее потребление питательной воды котлами в течение года составило примерно 1100 м^3/ч, что соответствует производительности трёх ПЭН в 300 м^3/ч и одного насоса в 200 м^3/ч. Если двигатель этого насоса работает от ПЧ, то при заданной производительности потребляемая мощность существенно снижается по сравнению с дросселированием.

Заключение

В ходе исследований проблемы повышения энергоэффективности центральной электростанции выявлены основные факторы, оказывающие влияние на стабилизацию уровня давления в общем выходном коллекторе и экономию электроэнергии при работе электроприводов питательных насосов. Подробно изложены основные принципы математического моделирования подобных объектов и представлены результаты исследований, полученных на разработанной модели. В работе авторами предложена система каскадно-частотного управления электроприводами насосов в условиях существующей схемы, при которой часть двигателей работает от сети, а один – с регулированием скорости посредством ПЧ. Реализация предлагаемого технического решения в условиях действующего производства позволит достичь следующих результатов:

1. Стабилизация уровня давления в общем выходном коллекторе в соответствии с технологическими требованиями.

2. Высокая надежность и стабильность поддержания заданного технологического режима для ответственных электроприемников собственных нужд промышленного предприятия при различных возмущающих воздействиях.

3. Существенное снижение потребляемой мощности двигателей питательных насосов за счет использования частотного регулирования по сравнению с дросселированием.

Работа выполнена при финансовой поддержке стипендии Президента Российской Федерации для молодых учёных–кандидатов наук СП-1841.2022.1.

Список литературы

1. Hoang A.T., Nguyen T.V., Nguyen B.T. The Novel Design of Feed-water Control System for Thermal Power Plant Using Super-critical Start-up Motor-Boiler Feed-water Pump // PES/IAS PowerAfrica. IEEE, 2020. Pp. 1-5. doi: 10.1109/PowerAfrica49420.2020.9219903
2. Zhiyong H., Renmu H., Yanhui. X. Effect of Steam Pressure Fluctuation in Turbine Steam Pipe on Stability of Power System // 3rd International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies. IEEE, 2008. Pp. 1127-1131. doi: 10.1109/DRPT.2008.4523576
3. Состояние и перспективы развития систем электроснабжения металлургических предприятий с собственными электростанциями / Г.П. Корнилов, А.В. Варганова, А.Н. Шеметов, О.В. Газизова, Р.Р. Храмшин, Ю.Н. Кондрашова, И.Р. Абдулвелеев, А.А. Бочкарев // Изв. вузов. Электромеханика. 2021. Т. 64. №4-5. С. 79-89. doi: 10.17213/0136-3360-2021-4-5-79-89
4. Особенности электроснабжения металлургического комбината и возможные перспективы его развития / Г.П. Корнилов, И.Р. Абдулвелеев, О.В. Газизова, Л.А. Копцев // Металлург. 2021. № 7. С. 81-89.
5. Энергосбережение в теплотехническом хозяйстве города средствами регулируемого электропривода: монография / Крылов Ю.А., Медведев В.Н., Карандаев А.С., Корнилов Г.П. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2012. 202 с.
6. Способы повышения устойчивости частотно-регулируемых электроприводов при нарушениях электроснабжения / Г.П. Корнилов, Т.Р. Храмшин, О.И. Карандаева, А.Р. Губайдуллин, Р.Р. Галлямов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2011. №4. С. 79-84.
7. Способы повышения надежности ответственных электроприводов заводских электростанций металлургических производств / К.Э. Одинцов, М.Ю. Петушков, Е.Ф. Иванов, А.А. Бочкарев, М.М. Лыгин // Электротехнические системы и комплексы. 2021. № 4(53). С. 28-32. doi: 10.18503/2311-8318-2021-4(53)-28-32
8. 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). IEEE, 2019. Pp. 1-4. doi: 10.1109/ICOECS46375.2019.8949945.
9. Advanced Electric Drive Control System of Continuous Hot-Dip Galvanizing Line / G.P. Kornilov, I.R. Abdulveleev, T.R. Khramshin, V.V. Shokhin // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). IEEE, 2020. Pp. 1-6. doi: 10.1109/ICIEAM48468.2020.9111905
10. Study of the Compensating Ability of Synchronous Motors in the Power Supply System of a Metallurgical Enterprise / G.P. Kornilov, I.R. Abdulveleev, T.R. Khramshin, A.A. Nikolaev // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). IEEE, 2020. Pp. 1-7. doi: 10.1109/ICIEAM48468.2020.9112039
11. Ciontu M., Bratu C. Program for Efficiency Analaizing for Variable Speed Drive of Pumps // 3rd International Symposium on Electrical and Electronics Engineering (ISEEE). IEEE,

2010. Pp. 298-302. doi: 10.1109/ISEEE.2010.5628496
12. Rizov P., Gueorgiev V. Influence of the Excitation Regime of Turbo-generators on the Own Needs Supply Stable Operation // 15th International Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA). IEEE, 2017. Pp. 267-270. doi: 10.1109/ELMA.2017.7955446
13. Ahmed A., Moharam B., Rashad E. Power Saving of Multi Pump-Motor Systems Using Variable Speed Drives // 20th International Middle East Power Systems Conference (MEPCON). IEEE, 2018. Pp. 839-844. doi: 10.1109/MEPCON.2018.8635157
14. Analysis of Causes of Boiler Accidents in Power Plant and Accident Handling Based on Mathematical Statistics / G. Lian, Y. Niu, X. Zhang, Y. Lu, H. Li // International Conference on Engineering Simulation and Intelligent Control (ESAIC). IEEE, 2018. Pp. 17-20. doi: 10.1109/ESAIC.2018.00012
15. The System for Stabilizing Voltage for Essential Consumers in Industrial Grids / G.P. Kornilov, I.R. Abdulveleev, R.R. Khramshin, O.V. Gazizova // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). IEEE, 2021. Pp. 209-213. doi: 10.1109/ICIEAM51226.2021.9446443
16. Bocquel A., Janning J. Analysis of a 300 MW Variable Speed Drive for Pump-Storage Plant Applications // European Conference on Power Electronics and Applications. IEEE, 2005. Pp.1-10. doi: 10.1109/EPE.2005.219434

Поступила в редакцию 08 марта 2022 г.

INFORMATION IN ENGLISH

IMPROVING THE ENERGY EFFICIENCY OF INDUSTRIAL POWER PLANTS AT METALLURGICAL ENTERPRISES

Gennadiy P. Kornilov

D.Sc. (Engineering), Professor, Electric Power Supply of Industrial Enterprises Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, korn_mgn@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-2451-3850

Olga V. Gazizova

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Electric Power Supply of Industrial Enterprises Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, Electrical Power Engineering Department, Tobolsk Industrial Institute, Tobolsk Branch of the Industrial University of Tyumen, Tobolsk, Russia, logan_b_7@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-9416-672X

Ildar R. Abdulveleev

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Electric Power Supply of Industrial Enterprises Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, leggyild@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-2748-6533

Maxim M. Lygin

Postgraduate student, Electric Power Supply of Industrial Enterprises Department, Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, eligin@ya.ru,https://orcid.org/0000-0001-8884-4846

Aleksey A. Bochkarev

Undergraduate Student, Automated Electric Drive and Mechatronics Department, Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, analogsynth@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-8834-2384

The development of on-site electrical energy generation is a distinctive feature at metallurgical enterprises. Thanks to the using of secondary energy resources - blast furnace and coke oven gases, electricity produced at industrial power plants is significantly cheaper than the electricity received from the power system. On-site power plants of the largest Russian metallurgical plants, such as PJSC MMK, PJSC NLMK, PJSC Severstal, currently cover 60-70% of the total electricity consumption at these enterprises. The article is devoted to the electric energy saving reserves study in the in-house needs system at one of the oldest power plants, at PJSC MMK. This power plant includes 8 power boilers and 9 turbogenerators with a capacity of more than 200 MW; it provides electricity and heat to the main workshops of the enterprise, as well as to one city district. Transportation and supply of the main components for the technological process, such as water, air and fuel, is carried out by unregulated asynchronous electric drives. The most powerful and critical ones are the electric drives of the feed pumps, which supply water to the boilers with the specified flow rate and pressure. To date, the pressure in the system is regulated by manual throttling by turning on or off one of the pumps. An urgent and practically significant problem is to ensure the main parameters of feed pumps by controlling the electric drives speed, which will significantly increase the station energy efficiency. Using a mathematical model, a study was carried out to investigate the operating modes of a pump group with a common manifold, where special attention is paid to modeling the hydraulic part of the system. The article considers the most effective ways to maintain the required pressure level. According to the results of comprehensive studies carried out on the developed model, the authors proposed a cascade-frequency control of adjustable electric drives of feed pumps. The implementation of such a solution will reduce the pump electricity consumption by more than 20%.

Keywords: power plant, efficiency improvement, throttling, adjustable drive, frequency converter, feed pumps, cascade frequency control, factory power supply.

REFERENCES

1. Hoang A.T., Nguyen T.V., Nguyen B.T. The Novel Design of Feed-water Control System for Thermal Power Plant Using Super-critical Start-up Motor-Boiler Feed-water Pump. PES/IAS PowerAfrica. IEEE, 2020, pp. 1-5. doi: 10.1109/PowerAfrica49420.2020.9219903

2. Zhiyong H., Renmu H., Yanhui. X. Effect of Steam Pressure Fluctuation in Turbine Steam Pipe on Stability of Power Sys-tem. 3rd International Conference on Electric Utility De-regulation and Restructuring and Power Technologies. IEEE, 2008, pp. 1127-1131. doi: 10.1109/DRPT.2008.4523576
3. Kornilov G.P., Varganova A.V., Shemetov A.N., Gazizova O.V., Khramshin R.R., Kondrashova Yu.N., Abdulvele-ev I.R., Bochkarev A.A. The State and Development Pro-spects of Power Supply Systems at Metallurgical Enterprises with On-Site Power Plants. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Elektromekhanika* [Russian Electromechanics], 2021, vol. 64, no. 4-5, pp. 79-89. doi: 10.17213/0136-3360-2021-4-5-79-89 (In Russian)
4. Kornilov G.P., Abdulveleev I.R., Gazizova O.V., Koptsev L.A. Power Supply Features of Metallurgical Iron-and-Steel Works and Possible Development Prospects. *Metallurg* [Metallurgist], 2021, no. 7, pp. 81-89. (In Russian)
5. Krylov Yu.A., Medvedev V.N, Karandaev A.S, Kornilov G.P. *Energosberezhenie v teplotekhnicheskom khozyaystve goroda sredstvami reguliruemogo elektroprivoda* [Energy Saving in the Municipal Heat Engineering Economy by Means of a Regulated Electric Drive]. Magnitogorsk, NMSTU Publ., 2012. 202 p. (In Russian)
6. Kornilov G.P., Khramshin T.R., Karandaeva O.I., Gubaidullin A.R., Gallyamov R.R. Ways to Increase the Frequency-Controlled Electric Drive Stability in Case of Power Supply Disturbances. *Vestnik MGTU im. G.I. Nosova* [Bulletin of NMSTU], 2011, no. 4, pp. 79-84. (In Russian)
7. Odintsov K.E., Petushkov M.Yu., Ivanov E.F., Bochka-rev A.A., Lygin M.M. Improving the Critical Electric Drives Reliability at Industrial Power Plants of Metallurgical Enter-prises. *Elektrotekhnicheskie sistemy i kompleksy* [Electrotech-nical Systems and Complexes], 2021, no. 4(53), pp. 28-32. doi: 10.18503/2311-8318-2021-3(52)-28-329 (In Russian)
8. 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 Elec-trotechnical Complexes and Systems (ICOECS 2019). IEEE, 2019. Pp. 1-4. doi: 10.1109/ICOECS46375.2019.8949945
9. Kornilov G.P., Abdulveleev I.R., Khramshin T.R., Shokhin V.V. Advanced Electric Drive Control System of Continuous Hot-Dip Galvanizing Line. 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICI-EAM 2020). IEEE, 2020, pp. 1-6. doi: 10.1109/ICIEAM48468.2020.9111905
10. Kornilov G.P., Abdulveleev I.R., Khramshin T.R., Nikolaev A.A. Study of the Compensating Ability of Synchronous Motors in the Power Supply System of a Metallurgical Enterprise. 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applica-tions and Manufacturing (ICIEAM 2020). IEEE, 2020, pp. 1-7. doi: 10.1109/ICIEAM48468.2020.9112039
11. Ciontu M., Bratu C. Program for Efficiency Analyzing for Variable Speed Drive of Pumps. 3rd International Symposi-um on Electrical and Electronics Engineering (ISEEE 2010). IEEE, 2010, pp. 298-302. doi: 10.1109/ISEEE.2010.5628496
12. Rizov P., Gueorgiev V. Influence of the Excitation Regime of Turbo-generators on the Own Needs Supply Stable Opera-tion. 15th International Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA 2017). IEEE, 2017, pp. 267-270. doi: 10.1109/ELMA.2017.7955446.
13. Ahmed A., Moharam B., Rashad E. Power Saving of Multi Pump-Motor Systems Using Variable Speed Drives. 20th In-ternational Middle East Power Systems Conference (MEP-CON 2018). IEEE, 2018, pp. 839-844. doi: 10.1109/MEPCON.2018.8635157
14. Lian G., Niu Y., Zhang X., Lu Y., Li H. Analysis of Causes of Boiler Accidents in Power Plant and Accident Handling Based on Mathematical Statistics. International Conference on Engi-neering Simulation and Intelligent Control (ESAIC 2018). IEEE, 2018, pp. 17-20. doi: 10.1109/ESAIC.2018.00012
15. Kornilov G.P., Abdulveleev I.R., Khramshin R.R., Gaz-izova O.V. The System for Stabilizing Voltage for Essential Consumers in Industrial Grids. 2021 International Confer-ence on Industrial Engineering, Applications and Manufac-turing (ICIEAM 2021). IEEE, 2021, pp. 209-213. doi: 10.1109/ICIEAM51226.2021.9446443
16. Bocquel A., Janning J. Analysis of a 300 MW Variable Speed Drive for Pump-Storage Plant Applications. 2005 Eu-ropean Conference on Power Electronics and Applications. IEEE, 2005, pp.1-10. doi: 10.1109/EPE.2005.219434

Повышение энергетической эффективности заводских электростанций металлургических предприятий / Г.П. Корнилов, О.В. Газизова, И.Р. Абдулвелеев, М.М. Лыгин, А.А. Бочкарев // Электротехнические системы и комплексы. 2022. № 2(55). С. 55-61. https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-2(55)-55-61

Kornilov G.P., Gazizova O.V., Abdulveleev I.R., Lygin M.M., Bochkarev A.A. Improving the Energy Efficiency of Industrial Power Plants at Metallurgical Enterprises. *Elektrotekhnicheskie sistemy i kompleksy* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2022, no. 2(55), pp. 55-61. (In Russian). https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-2(55)-55-61

МОНИТОРИНГ, КОНТРОЛЬ И ДИАГНОСТИКА ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

УДК 621.316.71, 681.518.5 https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-2(55)-62-70

Королёв Н.А., Жуковский Ю.Л., Котелева Н.И.

Санкт-Петербургский горный университет

НАБЛЮДАТЕЛЬ СОСТОЯНИЯ ПОДШИПНИКОВ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ПО КОМПОНЕНТАМ ВЕКТОРОВ ПАРКА ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ

Статья посвящена подходу к созданию наблюдателя состояния подшипников как узла асинхронного двигателя, подверженного механическому износу. Под действием сил трения деградация подшипников протекает интенсивнее по сравнению с другими узлами электрической машины. Для исследования были выбраны асинхронные двигатели малой и средней мощности до 200 кВт ввиду сопоставимой стоимости подшипникового узла с электрической машиной. В основу подхода заложен метод преобразования вектора Парка мгновенных фазных значений потребляемого тока и напряжения, по которым производится анализ годографов, описываемых обобщенными векторами. Точность регистрации мгновенных значений фазных токов и напряжений достигалась за счет датчиков тока и напряжения на эффекте Холла компенсационного типа с дальнейшей оцифровкой на высокоразрядном аналого-цифровом преобразователе. Изменения технического состояния подшипников, в части деградации внутренних, внешних колец или тел качения, приводит к девиации годографа тока, при этом изменяется как его траектория, так и ширина. Из-за сложности анализа форм и траекторий годографа были применены искусственные нейросетевые (ИНС) классификаторы. Выбор и обучение ИНС-классификатора был выполнен в ходе лабораторных исследований по деградации внутреннего кольца подшипника. Деградация заключалась в искусственном износе внутреннего кольца в виде раковин с различной глубиной и размером. Перед пропуском данных через ИНС-классификатор производилась их фильтрация и предобработка по разработанному алгоритму. В статье представлен эффективный способ ввода данных в классификатор. Результатом работы алгоритма и способа является достигнутая сходимость 99% и точность 98% на экспериментальных данных.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, годограф вектора Парка, потребляемый ток, дефекты подшипников, ИНС-классификатор**.**

ВВЕДЕНИЕ

С совершенствованием систем автоматизации электромеханического оборудования связанно увеличение количества контролируемых величин и усложнением ее архитектуры [1-3]. Электромеханические комплексы, основной массой которых является автоматизированный привод, являются ключевыми объектами любой промышленности и их эффективность определяет стратегию роста и развития предприятий [4, 5].

Цифровое преображение энергетики стремительно предлагает рынку новые технические решения. Тенденция такого развития сопряжена с неконтролируемым ростом мощностей вычислительной техники и контрольно-измерительных приборов. Одно из наиболее популярных направлений решения задач оптимизации связанно с заменой датчиков косвенным вычислением контролируемых величин и разработкой наблюдателей координат [6, 7].

Данная тенденция прослеживается в построении систем диагностики и мониторинга. В этой области исследований остается множество нерешенных задач. Это, в свою очередь, не позволяет разрабатывать карты оценки технического состояния привода для различных топологий технологического оборудования [8, 9].

Ключевым звеном является асинхронный двигатель (АД), который наиболее подвержен износу. Анализ данных компаний [10-12] определяет сегмент часто встречающихся неисправностей и исследований, связанных с ними, из которых особое внимание следует уделить дефектам подшипников. Нарушение целостности подшипников приводит к отклонениям в сопряженных узлах ввиду многокомпонентности электрических машин. Несвоевременное обнаружение влечет ускоренный износ и постепенную деградацию сопряженных механической (муфт, редукторов и др.) и электрической (обмотки статора, ротора) частей машин. Научный интерес вызывает поиск программно-технических решений, обеспечивающих обнаружение неисправностей подшипника на минимальных стадиях развития при минимальном количестве датчиков.

СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА ИССЛЕДОВАНИЙ

В работе [13] уделено внимание системе для оперативного мониторинга подшипников и последующей диагностике неисправностей на основе анализа данных измерения вибрации. Оценка состояния подшипника производится обученной нейронной сетью (NN) на основе спектрального анализа и анализа огибающих механических колебаний. В случае отсутствия физического доступа или заранее встроенных датчиков вибрации метод сложно применим по сравнению с анализом потребляемых токов.

Результаты экспериментальных исследований авторов статьи [14] демонстрируют эффективность дискретного вейвлет-преобразования в сочетании с индикаторами формы Кларка для классификации неисправностей подшипников и шестерней. Дискретное вейвлет-преобразование используется в качестве метода фильтрации для выделения различных полос частот. Индикаторы, использованные в этой работе, представляют собой дескрипторы геометрических фигур, полученные в результате преобразования Кларка. Эти ин-

© Королёв Н.А., Жуковский Ю.Л., Котелева Н.И., 2022

дикаторы придают особую форму при наличии механической неисправности. Результаты проведенных экспериментов демонстрируют эффективность дискретного вейвлет-преобразования для классификации неисправностей подшипников.

В статье [15] представлен поход об обнаружении нарушений в подшипнике с использованием вектора Парка. Данное исследование направлено на анализ деформации годографа относительно эталонного при дефектах подшипника. Исследователи выполнили численный анализ при различной степени дефекта на большом количестве машин, но при этом не затрагивают вопрос программного распознавания дефекта.

В источнике [16] основное внимание уделяется обнаружению неисправностей подшипников качения в асинхронных машинах на основе анализа токов статора. В частности, предлагается обрабатывать токи статора с помощью преобразования Гильберта-Хуанга. Этот подход основан на двух этапах: эмпирическое разложение по модам и преобразование Гильберта. Предлагаемый подход используется для обнаружения неисправностей подшипников в асинхронных машинах при нескольких степенях неисправности.

Авторами в статье [17] описано дискретное вейвлет-преобразование (DWT), стационарное вейвлет-преобразование (SWT) и разложения вейвлет-пакетов (WPD), а также проводится сравнительный анализ с помощью различных параметров идентификации неисправностей. Сложность данного метода состоит в обработке и разделении критериев диагностических данных.

В статье [18] представлен метод разработки эталонного сигнала исправной системы. Выделены индикаторы, соответствующие неисправности при сравнении фактического и эталонного сигналов. Описанный метод по сравнению с другими наиболее подходит к большому сегменту мощностей асинхронных двигателей с учетом вариантов нагрузки и исполнительных механизмов.

Авторским коллективом [19] представлен новый векторный подход отфильтрованного парка или расширенного парка (FPVA или FEPVA) при нарушении стержней ротора, что позволяет отстроиться от конструктивных особенностей машины. Интерес вызывают другие часто встречающиеся дефекты и применение машинной обработки диагностических данных.

Множество исследований посвящено диагностике асинхронного двигателя с использованием вектора Парка [20-22], однако недостаточное внимание уделено вопросу обработки траекторий вектора.

Имеется ряд работ, в которых показано преимущество использования мягкого датчика и принципы его разработки для различных отраслей промышленности [23]. Например, в статье [24] рассматривается один из вопросов отказоустойчивого электропривода с прямым полеориентированным управлением асинхронным двигателем (Direct Field Oriented Control). Важным моментом является некорректная работа системы управления при неисправном датчике тока Холла. Предложено использование нейронной сети для определения состояния датчика тока статора. Рабочая сверточная нейронная сеть (CNN), объединяющая алгоритм сопоставления признаков в частотной области (FDFM), используется для диагностики подшипников качения [25].

Анализируя имеющиеся подходы, авторы предлагают объединить диагностику электромеханических машин, теорию Парка и теорию нейронных сетей. Следующим шагом является создание программного датчика, который можно использовать для диагностики технического состояния электромеханического оборудования.

Основная гипотеза статьи состоит в том, что мягкий датчик, представляющий собой математический аппарат, сочетающий векторное преобразование Парка и классификатор на основе искусственной нейронной сети (ИНС-классификатор), позволит в реальном времени (или с частотой, подходящей для использования в системах управления) обнаружить дефекты подшипников в электромеханических машинах. В качестве основного диагностического узла в данном случае выбран подшипник, так как подшипник в большей степени подвержен износу за счет сил трения, чем другие детали машины, а также последовательному выходу из строя всех остальных деталей.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Основной идеей работы является преобразование вектора Парка (Горева) [26], заключающиеся в переходе к двухфазной системе токов (i_d, i_q) во вращающейся системе координат-*dq* от трехфазной системы токов, потребляемых асинхронным двигателем (i_A, i_B, i_C) [27] по следующим преобразованиям (1) и (2). Данные уравнения справедливы для реального электродвигателя [28-30].

$$i_d = \left[\sqrt{\frac{2}{3}}\right] i_A - \left[\sqrt{\frac{1}{6}}\right] i_B - \left[\sqrt{\frac{1}{6}}\right] i_C; \quad (1)$$

$$i_q = \left[\sqrt{\frac{1}{2}}\right] i_B - \left[\sqrt{\frac{1}{2}}\right] i_C, \quad (2)$$

где i_d, i_q – токи статора АД в двух фазной вращающейся системе координат-*dq*; i_A, i_B, i_C – токи статора АД в трехфазной вращающейся системе координат-*ABC*.

При допущениях, что асинхронный двигатель идеализирован и является трехфазной симметричной активно-индуктивной нагрузкой, справедливы уравнения:

$$i_d = \left[\frac{\sqrt{6}}{2}\right] i_{\max} \sin \omega t; \quad (3)$$

$$i_d = \left[\frac{\sqrt{6}}{2}\right] i_{\max} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right), \quad (4)$$

где $i_{\max}$ – максимальное амплитудное значение тока фазы, А; ω – угловая частота питания, рад/с; t – время, с.

В системе координат-dq обобщенный вектор I_S тока запишется как (5), и справедлив к (1)-(4).

$$I_S = i_d + ji_q. \quad (5)$$

Данные преобразования отображены в векторной диаграмме (**рис. 1**).

Согласно (5) обобщенный вектор в комплексной плоскости будет описывать траекторию – годограф (**рис. 2**). Наблюдается искажение траектории реального вектора тока относительно идеального при дефектах (**рис. 3-5**).

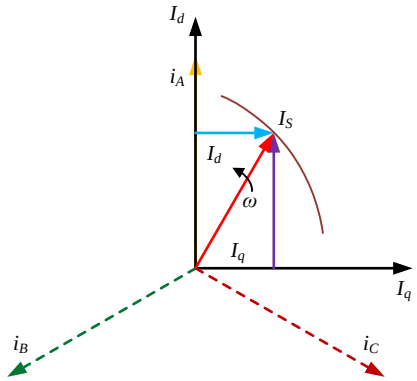


Рис. 1. Векторная диаграмма преобразования Парка (Горева)

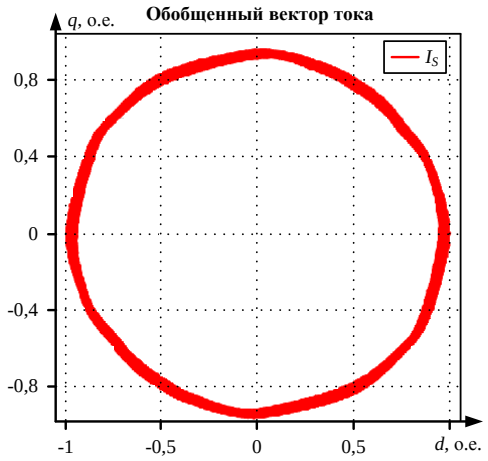


Рис. 2. Годограф обобщенного вектора тока АД без дефектов

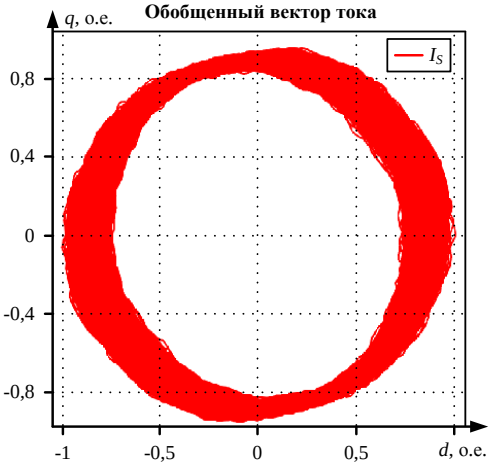


Рис. 3. Годограф обобщенного вектора тока АД с дефектом обмотки статор

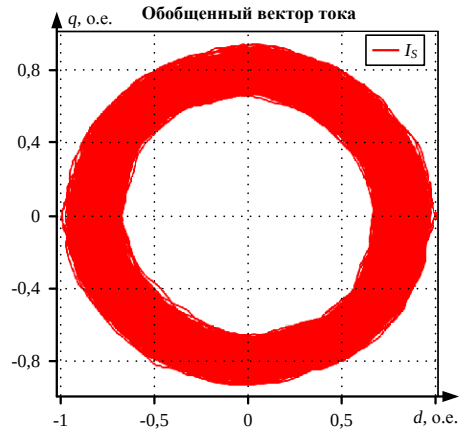


Рис. 4. Годограф обобщенного вектора тока АД с дефектом стержней ротора

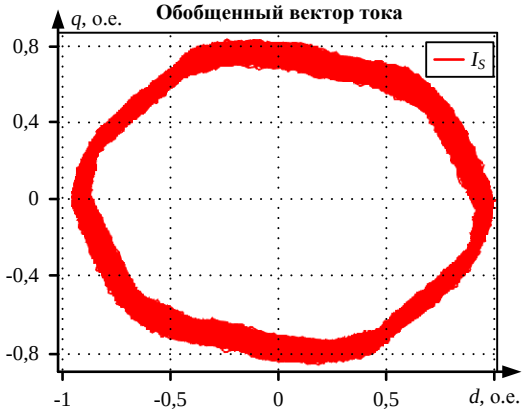


Рис. 5. Годограф обобщенного вектора тока АД с дефектом подшипника

При появлении дефектов асинхронного двигателя в части повреждения статора, ротора или механической части годограф обобщенного вектора тока изменяется относительного эталонного. В случае нарушения целостности одной из фаз статора годограф вырождается в эллипс (см. **рис. 3**). Пропорциональное изменение эллиптичности и ширины годографа вектора Парка соответствует уровню дефекта [12]. Нарушение в роторе приводит к вырождению годографа в сложную форму (см. **рис. 4**) [13]. Повреждения в механической части двигателя приводят к появлению искажений по окружности и варьирование ширины описываемого годографа, (см. **рис. 5**) [11]. Исследование сложных траекторий позволяет комплексно определять виды и интенсивность влияния дефектов на частоту вращения ротора и момент на валу электродвигателя.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследований является асинхронный двигатель с параметрами, указанными в **табл. 1** и **2**, питающийся от промышленной сети 50 Гц в продолжительном режиме S1 и постоянной нагрузкой на валу. Схема подключения АД показана на **рис. 6.** Постоянная нагрузка задается аналогичным двигателем в генераторном режиме.

Таблица 1

Паспортные данные асинхронного двигателя

Марка двигателя	$P_{ном}$, кВт	$I_{ном}$, А	n, об/мин	cosφ, о.е.	$\eta_д$, %	λ, о.е.	K_p, о.е.	K_i, о.е.
АИР132М4	11,0	23,4	1450	0,82	87,1	2,3	2,2	6,8

Таблица 2

Параметры схемы замещения

L_s, Гн	L_r, Гн	L_m, Гн	R_s, Ом	R_r, Ом
0,146	0,148	0,140	0,522	0,306

В **табл. 1**: $P_{ном}$ – номинальная мощность; $I_{ном}$ – номинальный ток АД; n – скорость вращения вала; $\eta_д$ – коэффициент полезного действия; cosφ – коэффициент мощности; λ – перегрузочная способность; K_p – кратность пускового момента; K_i – кратность пускового тока.

В **табл. 2**: L_s – индуктивность обмотки статора; L_r – индуктивность обмотки ротора; L_m – индуктивность цепи намагничивания; R_s – активное сопротивление обмотки статора; R_r – активное сопротивление обмотки ротора.

Влияние нарушения подшипников оказывает наиболее интенсивное искажение магнитного поля в воздушном зазоре, что отражено на **рис. 5** и также в работах [19]. При это данный вид дефекта обладает высокой скоростью развития, что приводит к быстрой деградации механической части электродвигателя и сопряженной электрической [20].

В соответствии с паспортными данными двигателя АИР132М4 в нем установлены радиальные шарикоподшипники серии 6208 (**рис. 7**), имеющие следующие технические характеристики **рис. 8** и **табл. 3.**

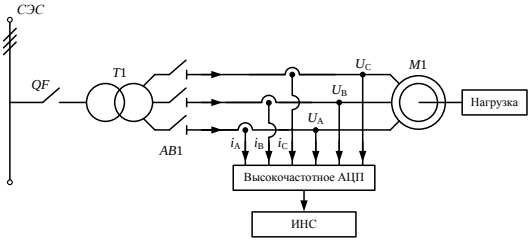


Рис. 6. Схема подключения и измерений асинхронный двигатель АИР132М4

Рис. 7. Общий вид шарикового подшипника серии 6208

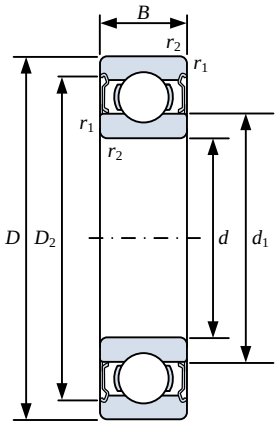


Рис. 8. Типоразмеры шарикового подшипника серии 6208

Таблица 3

Технические характеристики подшипника серии 6208

d, мм	D, мм	B, мм	d_1, мм	D_2, мм	r_1, r_2, мм
40	80	18	52,6	69,8	min 1.1

В **табл. 3:** d – диаметр отверстия; D – наружный диаметр; B – ширина; d_1 – диаметр внутреннего кольца; D_2 – диаметр наружного кольца; r_1, r_2 – размер фаски наружного кольца.

$$f_{rb} = \frac{n}{2} f_{rm} \left[1 \pm \frac{D_{ball}}{D_{pit}} \cos\beta \right], \qquad (6)$$

где f_{rm} – частота вращения ротора; n – число шариков в подшипнике; β – угол контакта; D_{pit} – диаметр окружности центров шариков; D_{ball} – диаметр шарика.

По сравнению со спектральным анализом (FFT) [21], при котором часть информации теряется в связи с применением низко- и высокочастотных фильтров, а также в области шума (-75-80 дБ), практически невозможно зарегистрировать начальные стадии проявления дефекта. Проявление дефекта подшипника в годографе возможно зарегистрировать раньше в виде искажения в его траектории, чего не обеспечивает спектр.

Дальнейший анализ метода позволил выделить ряд его преимуществ. Первое состоит в том, что для определения неисправностей достаточно всего двух датчиков тока на эффекте Холла компенсационного типа. Ток третьей фазы определяется косвенно [22].

Второе достигается за счет синхронной регистрации фазных токов (i_A, i_B, i_C) и напряжений (u_A, u_B, u_C), что позволяет исключить влияние электрической сети на диагностические данные. Искажения, обусловленные качеством электрической сети [23], проявляются в годографе напряжения и должны быть взаимно исключены при анализе годографа потребляемого тока АД (**рис. 9).**

Информативность годографа достаточна высокая. Однако, кроме уже полученных траекторий и их изменений, которые соответствуют определенным стадиям и видам как отдельных, так и ряда дефектов, предлагается подход к анализу годографа с использованием нейросетевых алгоритмов.

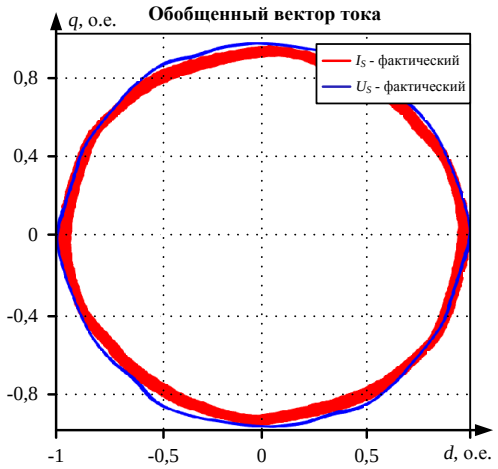


Рис. 9. Общий вид шарикового подшипника серии 6208

ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Порядок эксперимента состоит в искусственной деградации внутренних колец подшипника в виде количества деградационных раковин радиального шарикоподшипника, вызванных трением. Деградационные раковины представлены на **рис. 10.**

Этапы экспериментов:

1. Работа двигателя в идеальном (эталонном) состоянии без нагрузки в режиме холостого хода (**рис. 11**).
2. Работа двигателя в идеальном (эталонном) состоянии при номинальной нагрузке (**рис. 12**).
3. Работа двигателя при одной раковине во внутреннем кольце подшипника (**рис. 13**).

Работа двигателя при трех раковинах во внутреннем кольце подшипника (**рис. 14).**

Согласно (5) обобщенный вектор в комплексной плоскости будет описывать траекторию – годограф. Наблюдается искажение реальной траектории вектора тока по отношению к эталонной.

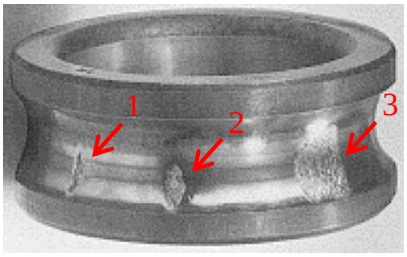


Рис. 10. Раковины радиального шарикоподшипника

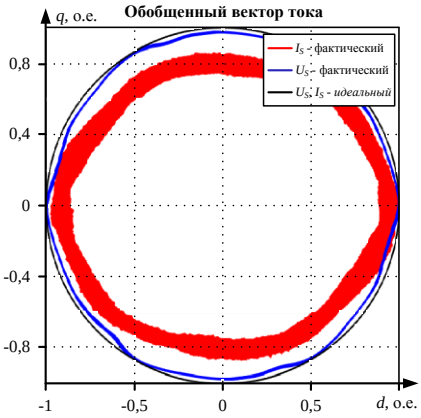


Рис. 11. Работа двигателя в идеальном (эталонном) состоянии без нагрузки в режиме холостого хода

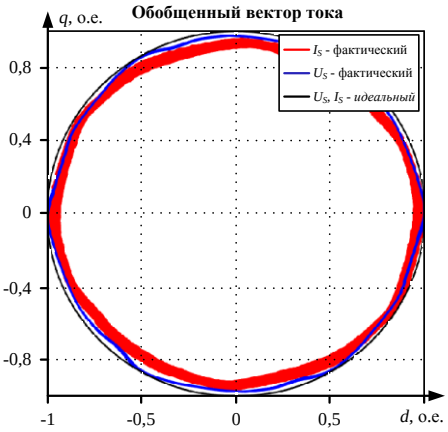


Рис. 12. Работа двигателя в идеальном (эталонном) состоянии при номинальной нагрузке

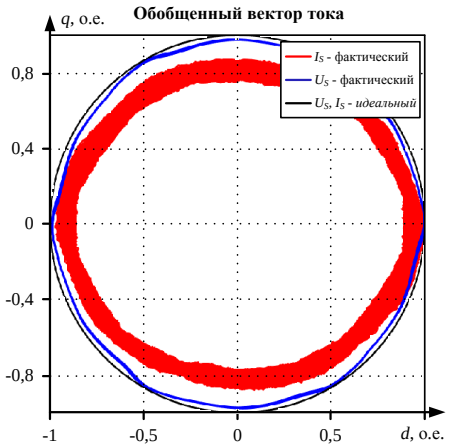


Рис. 13. Работа двигателя при одной раковине во внутреннем кольце подшипника

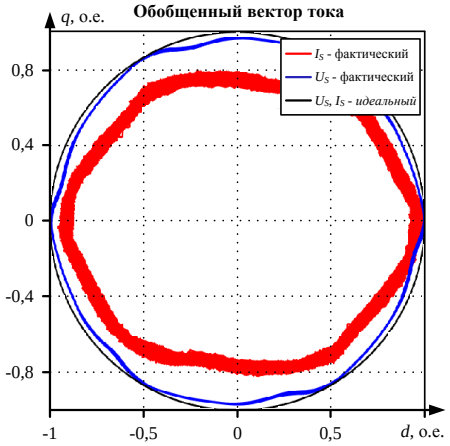


Рис. 14. Работа двигателя при трех раковинах во внутреннем кольце подшипника

Если асинхронный двигатель неисправен по статору, ротору или механическим повреждениям, годограф вектора обобщенного тока изменяется относительно эталона. При повреждении одной из фаз статора годограф вырождается в эллипс. Пропорциональное изменение эллиптичности и ширины векторного годографа Парка соответствует уровню дефекта [21]. Возмущение ротора приводит к вырождению годографа в сложную форму [22]. Повреждение механической части двигателя приводит к круговым искажениям и вариациям ширины описываемого годографа [20]. Изучение сложных траекторий позволяет комплексно определить виды и интенсивность влияния дефектов на частоту вращения ротора и момент на валу двигателя.

В данной работе для выявления изменений вектора Парка используется нейросетевой классификатор, который позволяет оценивать изменения состояния вектора Парка и своевременно сигнализирует о возникновении дефекта.

Однако для использования такого классификатора его необходимо адаптировать для обработки данных, поступающих в режиме реального времени [31, 32]. На **рис. 15** показан алгоритм, использованный при разработке ИНС-классификатора [33].

На **рис. 16** показаны результаты обучения ИНС-классификатора. Классификатор обучался с использованием трех методов: дерева решений [34], метода опорных векторов [35] и K-ближайших соседей [36]. Как видно на рисунке, лучшими оказались K-ближайшие соседи с точностью 99,9%, это хороший результат. **Рис. 17** показывает результат в виде матрицы ошибок.

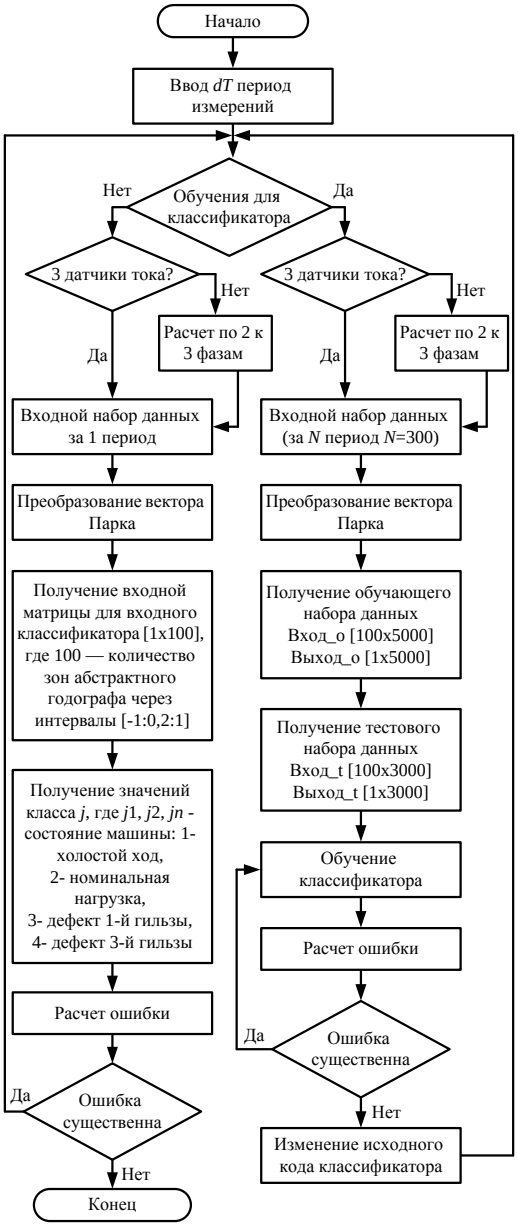


Рис. 15. Алгоритм нейросетевого классификатора

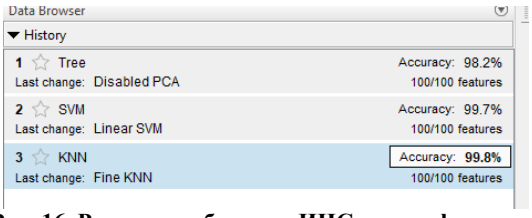


Рис. 16. Результат обучения ИНС-классификатора

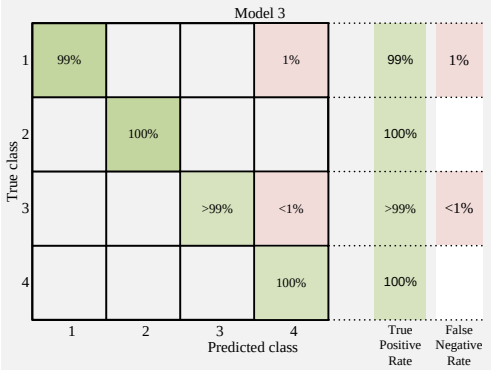


Рис. 17. Результат обучения ИНС-классификатора. Матрица ошибок

РЕЗУЛЬТАТЫ

Тестирование алгоритма ИНС-классификатора на реальных данных также дало существенные результаты. Точность составила 98%. Чрезмерно высокая точность результатов обусловлена идеализированными условиями эксперимента. В реальных условиях машина может быть подвержена нескольким типам дефектов [37]. Она может работать в возмущающих условиях и на различных режимах.

Данная работа показала правомерность предложенной методики, однако для реальных объектов она может не давать столь высоких результатов. Однако авторы считают, что для того чтобы сделать его применимым к реальным объектам, необходимо разбить годограф Парка на более мелкие зоны, что решило бы проблему возможных перекрывающихся искажений вектора Парка.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы в целом удалось доказать состоятельность гипотезы. Дефекты машин можно оценить с помощью математического аппарата, позволяющего сочетать векторное преобразование Парка и ИНС-классификатор. Использование этого математического аппарата в режиме реального времени с определенной периодичностью позволяет разработать полноценный программный датчик для измерения определенного вида дефекта. Однако точность полученных в работе результатов может быть снижена в условиях реальной эксплуатации электрических машин. Авторы подчеркивают, что основная идея метода при наступлении этих условий не изменится. Изменятся только составляющие этой методики, например, увеличится количество абстрактных зон в делении годографа Парка.

Таким образом, авторы предлагают метод определения состояния подшипника практически в реальном времени или с минимальным временем принятия решения. Авторы показали, что по одному вращению годографа Парка, то есть по одному периоду (0,02 с), можно сказать, что в подшипнике образовался дефект. Это можно осуществить, применив специальный ИНС-классификатор, который, в свою очередь, определяет, в какие из предопределенных абстрактных зон попадают текущие значения вектора Парка. Разделение на такие зоны или квадранты является основным средством повышения точности мягкого датчика. Чем ближе условия пеленга к идеальным, тем больше выделяются абстрактные зоны. Однако необходимо помнить, что выделение таких зон заложено изначально и их расширение невозможно в процессе эксплуатации, то есть в пути. Поэтому необходимо предварительно провести эксперименты в реальных полевых условиях для определения необходимой ширины рассматриваемых абстрактных зон годографа Парка.

Работа выполнена при финансовой поддержке стипендии Президента Российской Федерации для молодых учёных – кандидатов наук СП-2587.2022.1.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Автоматизированная оцифровка радиальных диаграмм / Н.В. Васильева, А.В. Бойков, О.О. Ерохина, А.Ю. Трифонов // Записки Горного института. 2021. № 247. С. 82-87. doi: 10.31897/pmi.2021.1.9

2. Safina E., Khokhlov S. Paradox of alternative energy consumption: Lean or profligacy? // International Journal for Quality Research. 2017. Vol. 11(4). Pp. 903-916. doi: 10.18421/IJQR11.04-11
3. Litvinenko V. S. Digital economy as a factor in the technological development of the mineral sector // Natural Resources Research. 2020. Vol. 29(3). Pp. 1521-1541. doi: 10.1007/s11053-019-09568-4
4. Use of active power transducers in industrial DC power systems supplying electrolysis cells / B.N. Abramovich, A.A. Veprikov, Y.A. Sychev, D.A. Lyakh // Tsvetnye Met. 2020. Vol. 2. Pp. 95-100. doi: 10.17580/tsm.2020.02.13
5. Сычев Ю.А., Зимин Р.Ю. Повышение качества электроэнергии в системах электроснабжения минерально-сырьевого комплекса с помощью гибридных фильтро-компенсирующих устройств // Записки Горного института. 2021. № 247. С. 132-140. doi: 10.1109/ICIEA.2018.8397840
6. Public-private partnership as a tool of sustainable development in the oil-refining sector: Russian case / I. Filatova, L. Nikolaichuk, D. Zakaev, I. Ilin // Sustainability. 2021. Vol. 13(9). Pp. 5153. doi: 10.3390/su13095153
7. Belsky A.A., Dobush V.S., Haikal S.F. Operation of a Single-phase Autonomous Inverter as a Part of a Low-power Wind Complex // Journal of Mining Institute. 2019. Vol. 239. Pp. 564-569. doi: 10.31897/pmi.2019.5.564
8. Kulkarni A., Terpenny J., Prabhu V. Sensor Selection Framework for Designing Fault Diagnostics System // Sensors. 2021. Vol. 21(19). Pp. 6470. doi: 10.3390/s21196470.
9. Kalista K., Liska J., Jakl J. A vibration sensor-based method for generating the precise rotor orbit shape with general notch filter method for new rotor seal design testing and diagnostics // Sensors. 2021. Vol. 21(15). Pp. 5249. doi: 10.3390/s21155249
10. Hsu J.S. Monitoring of defects in induction motors through air-gap torque observation // IEEE Transactions on Industry Applications. 1995. Vol. 31(5). Pp. 1016-1021. doi: 10.1109/28.464514
11. Diagnosis of bearing defects in induction motors using discrete wavelet transform / N. Bessous, S.E. Zouzou, W. Bentrah, S. Sbaa, M. Sahraoui, // International Journal of System Assurance Engineering and Management. 2018. Vol. 9(2). Pp. 335-343. doi: 10.1007/s13198-016-0459-6
12. Gundewar S.K., Kane P.V. Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Induction Motor in Electric Vehicle // Machines, Mechanism and Robotics. Springer, 2022. Pp. 531-537. doi: 10.1007/978-981-16-0550-5_53
13. Ewert P., Kowalski C.T, Orlowska-Kowalska T. Low-cost monitoring and diagnosis system for rolling bearing faults of the induction motor based on neural network approach // Electronics. 2020. Vol. 9(9). Pp. 1334. doi: 10.3390/electronics9091334
14. Gear and bearings fault detection using motor current signature analysis / N.G. Lo, A. Soualhi, M. Frinì, H. Razik // 2018 13th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA). IEEE, 2018. Pp. 900-905. doi: 10.1109/ICIEA.2018.8397840
15. Bearing Fault Detection in Induction Motors Using Line Currents / M. Sunder, R. Abishek, S. Sabarivelan, M. Maiti, K. Bingi // ECTI Transactions on Electrical Engineering, Electronics, and Communications. 2021. Vol. 19(2). Pp. 209–219. doi: 10.37936/ecti-eec.2021192.244163
16. An efficient Hilbert–Huang transform-based bearing faults detection in induction machines / E. Elbouchikhi, V. Choqueuse, Y. Amirat, M.E. Benbouzid, S. Turri // IEEE Transactions on Energy Conversion. 2017. Vol. 32(2). Pp. 401-413. doi: 10.1109/tec.2017.2661541
17. Kompella K.C.D., Rao M.V.G, Rao R.S. Bearing fault detection in a 3 phase induction motor using stator current frequency spectral subtraction with various wavelet decomposition techniques // Ain Shams Engineering Journal. 2018. Vol. 9(4). Pp. 2427-2439. doi: 10.1016/j.asej.2017.06.002
18. Current-based detection of mechanical unbalance in an induction machine using spectral kurtosis with reference / E. Fournier, A. Picot, J. Regnier, M.T. Yamdeu, J.-M. Andrejak, P. Maussion, // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2014. Vol. 62(3). Pp. 1879-1887. doi: 10.1109/tie.2014.2341561
19. Gyftakis K.N., Cardoso A.J.M., Antonino-Daviu J.A. Introducing the Filtered Park's and Filtered Extended Park's Vector Approach to detect broken rotor bars in induction motors independently from the rotor slots number // Mechanical Systems and Signal Processing. 2017. Vol. 93. Pp. 30-50. doi: 10.1016/j.ymssp.2017.01.046
20. Cruz M.A. Marques Cardoso A.J. Rotor cage fault diagnosis in three-phase induction motors by extended Park's vector approach // Electric Machines &Power Systems. 2000. Vol. 28(4). Pp. 289-299. doi: 10.1080/073135600268261.
21. Silva J.L.H., Cardoso A.J.M. Bearing failures diagnosis in three-phase induction motors by extended Park's vector approach // 31st Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society. IEEE, 2005. Pp. 2591-2596. doi: 10.1109/IECON.2005.1569315
22. Caseiro J.A.A., Mendes A.M.S., Cardoso A.J.M. Fault diagnosis on a PWM rectifier AC drive system with fault tolerance using the average current Park's vector approach // 2009 IEEE International Electric Machines and Drives Conference. IEEE, 2009. Pp. 695-701. doi: 10.1109/iemdc.2009.5075281
23. Curreri F., Patanè L., Xibilia M.G. Soft Sensor Transferability: A Survey // Applied Sciences. 2021. Vol. 11(16). Pp. 7710. doi: 10.3390/app11167710
24. Dybkowski M., Klimkowski K. Artificial neural network application for current sensors fault detection in the vector controlled induction motor drive // Sensors. 2019. Vol. 19(3). Pp. 571. doi: 10.3390/s19030571
25. Zhou X.A. Mao S., Li M. Novel Anti-Noise Fault Diagnosis Approach for Rolling Bearings Based on Convolutional Neural Network Fusing Frequency Domain Feature Matching Algorithm // Sensors. 2021. Vol. 21(16). Pp. 5532. doi: 10.3390/s21165532
26. Mendes A.M.S., Cardoso A.J.M. Voltage source inverter fault diagnosis in variable speed AC drives, by the average current Park's vector approach // IEEE International Electric Machines and Drives Conference. IEEE, 1999. Pp. 704-706. doi: 10.1109/iemdc.1999.769220
27. A sensor-less sliding mode control scheme for a stand-alone wound rotor synchronous generator under unbalanced load conditions / R.S. Muñoz-Aguilar, P. Rodríguez, A. Dòria-Cerezo, I. Candela, A. Luna // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2014. Vol. 60. Pp. 275-282. doi: 10.1016/j.ijepes.2014.03.003
28. Cornell E.P., Lipo T.A. Modeling and design of controlled current induction motor drive systems // IEEE Transactions on Industry Applications. 1977. Vol. 4. Pp. 321-330. doi: 10.1109/tia.1977.4503414
29. Thomson W.T., Fenger M. Current signature analysis to detect induction motor faults // IEEE Industry Applications Magazine. 2001. Vol. 7(4). Pp. 26-34. doi: 10.1109/2943.930988
30. Fenger M., LLoyd B.A., Thomson W.T. Development of a tool to detect faults in induction motors via current signature analysis // In Proceedings of the 2003 IEEE-IAS/PCA Cement Industry Conference. IEEE, 2003. Pp. 37-46. doi: 2003-05-04/09
31. Khanaki R., Mohd Radzi M.A., Marhaban M.H. Artificial neural network based maximum power point tracking controller for photovoltaic standalone system // International Journal of Green Energy. 2016. Vol. 13(3). Pp. 283-291. doi: 10.1007/s00500-021-05653-0
32. Muruganandam M., Madheswaran M. Stability analysis and implementation of chopper fed DC series motor with hybrid PID-ANN controller // International Journal of Control, Automation and Systems. 2013. Vol. 11(5). Pp. 966-975.

doi: 10.1007/s12555-012-9209-y
33. Sancho-Asensio A., Orriols-Puig A., Golobardes Robust E. Robust on-line neural learning classifier system for data stream classification tasks // Soft Computing. 2014. Vol. 18(8). 1441-1461. doi: 10.1007/s00500-014-1233-9
34. Liu L., Özsu M. T. In Encyclopedia of Database Systems. Springer Singapore, 2009. 765 p. doi: 10.1007/978-1-4614-8265-9
35. Evgeniou T., Pontil M. Support vector machines: Theory and applications // Advanced Course on Artificial Intelligence. Springer, Berlin, 1999. Pp. 249-257. doi: 10.1007/3-540-44673-7_12
36. Cunningham P. Delany S.J. k-Nearest neighbour classifiers-A Tutorial / P. Cunningham, // ACM Computing Surveys (CSUR). 2021. Vol. 54(6). Pp. 1-25. doi: 10.1145/3459665.
37. Magnetoelectric current sensors / M. Bichurin, R. Petrov, V. Leontiev, G. Semenov, O. Sokolov // Sensors. 2017. Vol. 17(6). Pp. 1271. doi: 10.3390/s17061271

Поступила в редакцию 20 января 2022 г.

INFORMATION IN ENGLISH

BEARING STATE MONITORING DEVICE FOR AN ASYNCHRONOUS MOTOR BY THE CURRENT AND VOLTAGE PARK VECTOR COMPONENTS

Nikolai A. Korolev

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

Yuriy L. Zhukovski

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

Natalia I. Koteleva

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Department of Technological Processes and Production Automation, Saint Petersburg Mining University, nkot06@inbox.ru, https://orcid.org/0000-0002-5970-4534

The article describes an approach to creating a monitoring device of the bearing state, as a node of an asynchronous motor subject to mechanical wear. Under the friction forces, the degradation of bearings proceeds more intensively compared to other electric machine components. The research object is an asynchronous motor of small and medium power up to 200 kW. The choice is due to the comparable cost of the bearing assembly with the electric machine. The registration accuracy of phase current and voltage instantaneous values was achieved by current and voltage sensors on the Hall effect of the compensation type with further digitization on a high-digit analog-to-digital converter. Changes in the bearing technical condition, in terms of degradation of the inner, outer rings or rolling elements, lead to deviation in the current hodograph. This changes both the trajectory and the width. Due to the complex analysis of the hodograph shapes and trajectories, artificial neural network (ANN) classifiers were used. The choice and training of the ANN-classifier was carried out in the course of laboratory studies on the bearing inner ring degradation. The degradation consisted in the artificial wear of the inner ring in the form of shells with different depths and sizes. Before passing the data through the ANN classifier, they were filtered and preprocessed according to the developed algorithm. The article presents an efficient way to enter data into the classifier. The result of the algorithm and method is the achieved 99% convergence and 98% accuracy on the experimental data.

Keywords: Induction motor, Park vector hodograph, current consumption, bearing defects, ANN classifier.

REFERENCES

1. Vasilyeva N.V., Boikov A.V., Erokhina O.O., Trifonov A.Y. Automated digitization of radial charts. *Zapiski Gornogo instituta* [Journal of Mining Institute], 2021, vol. 247, pp. 82–87. doi: 10.31897/pmi.2021.1.9. (In Russian)
2. Safina E., Khokhlov S. Paradox of alternative energy consumption: Lean or profligacy? International Journal for Quality Research. 2017, vol. 11(4), pp. 903–916. doi: 10.18421/IJQR11.04-11
3. Litvinenko V. Digital Economy as a Factor in the Technological Development of the Mineral Sector. Natural Resources Research, 2020, vol. 29(3), pp. 1521-1541. doi: 10.1007/s11053-019-09568-4
4. Abramovich B.N., Veprikov A.A., Sychev Y.A., Lyakh D.A. Use of active power transducers in industrial DC power systems supplying electrolysis cells. Tsvetnye Met, 2020, vol. 2, pp. 95-100. doi: 10.17580/tsm.2020.02.13
5. Sychev Y., Zimin R. Improving the quality of electricity in the power supply systems of the mineral resource complex with hybrid filter-compensating devices. *Zapiski Gornogo instituta* [Journal of Mining Institute], 2021, vol. 247, pp. 132–140. doi: 10.31897/pmi.2021.1.14 (In Russian)
6. Filatova I., Nikolaichuk L., Zakaev D., Ilin I. Public-Private Partnership as a Tool of Sustainable Development in the Oil-Refining Sector: Russian Case. Sustainability, 2021, vol. 13(9), pp. 5153. doi: 10.3390/su13095153
7. Belsky A.A., Dobush V., Haikal S.F. Operation of a Single-phase Autonomous Inverter as a Part of a Low-power Wind Complex. Journal of Mining Institute, 2019, vol. 239, pp. 564–569. doi: 10.31897/pmi.2019.5.564
8. Kulkarni A., Terpenny J., Prabhu V. Sensor Selection Framework for Designing Fault Diagnostics System. Sensors, 2021, vol. 21(19), pp. 6470. doi: 10.3390/s21196470
9. Kalista K., Liska J., Jakl J. A Vibration Sensor-Based Method for Generating the Precise Rotor Orbit Shape with General Notch Filter Method for New Rotor Seal Design Testing and Diagnostics. Sensors, 2021, vol. 21(15), pp. 5249. doi: 10.3390/s21155249
10. Hsu J. Monitoring of defects in induction motors through air-gap torque observation. IEEE Transactions on Industry Applications, 1995, vol. 31(5), pp. 1016-1021. doi: 10.1109/28.464514
11. Bessous N., Zouzou S.E., Bentrah W., Sbaa S., Sahraoui M. Diagnosis of bearing defects in induction motors using discrete wavelet transform. International Journal of System Assurance Engineering and Management, 2018, vol. 9(2), pp. 335-343. doi: 10.1007/s13198-016-0459-6

12. Gundewar S.K., Kane P.V. Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Induction Motor in Electric Vehicle. Machines, Mechanism and Robotics. Springer, 2022, pp. 531-537. doi: 10.1007/978-981-16-0550-5_53
13. Ewert P., Kowalski C.T., Orlowska-Kowalska T. Low-Cost Monitoring and Diagnosis System for Rolling Bearing Faults of the Induction Motor Based on Neural Network Approach. Electronics, 2020, vol. 9(9), pp. 1334. doi: 10.3390/electronics9091334
14. Lo N.G., Soualhi A., Frini M., Razik H. Gear and bearings fault detection using motor current signature analysis. 2018 13th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA). IEEE, 2018, pp. 900-905. doi: 10.1109/ICIEA.2018.8397840
15. Sunder M.; Abishek R.; Sabarivelan S., Maiti M., Bingi K. Bearing Fault Detection in Induction Motors Using Line Currents. ECTI Transactions on Electrical Engineering, Electronics, and Communications, 2021, vol. 19(2), pp. 209–219. doi: 10.37936/ecti-eec.2021192.244163
16. Bouchikhi E.H., Choqueuse V., Amirat Y., Benbouzid M.E.H., Turri S. An Efficient Hilbert–Huang Transform-Based Bearing Faults Detection in Induction Machines. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2017, vol. 32(2). pp. 401-413. doi: 10.1109/tec.2017.2661541
17. Kompella K.D., Rao M.V.G., Rao R.S. Bearing fault detection in a 3 phase induction motor using stator current frequency spectral subtraction with various wavelet decomposition techniques. Ain Shams Engineering Journal, 2018, vol. 9(4), pp. 2427-2439. doi: 10.1016/j.asej.2017.06.002
18. Fournier E., Picot A., Regnier J., Yamdeu M.T., Andrejak J.-M., Maussion P. Current-Based Detection of Mechanical Unbalance in an Induction Machine Using Spectral Kurtosis with Reference. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, vol. 62(3), pp. 1879-1887. doi: 10.1109/tie.2014.2341561
19. Gyftakis K.N., Cardoso A.J.M., Antonino-Daviu J.A. Introducing the Filtered Park's and Filtered Extended Park's Vector Approach to detect broken rotor bars in induction motors independently from the rotor slots number. Mechanical Systems and Signal Processing, 2017, vol. 93, pp. 30-50. doi: 10.1016/j.ymssp.2017.01.046
20. Cruz MA. Marques Cardoso A.J. Rotor Cage Fault Diagnosis in Three-Phase Induction Motors by Extended Park's Vector Approach. Electric Machines &Power Systems, 2000, vol. 28(4), pp. 289-299. doi: 10.1080/073135600268261
21. Silva J., Cardoso A. Bearing failures diagnosis in three-phase induction motors by extended Park's vector approach. 31st Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society. IEEE, 2005, pp. 2591–2596. doi: 10.1109/IECON.2005.1569315
22. Caseiro J.A.A., Mendes A.M.S., Cardoso A.J.M. Fault diagnosis on a PWM rectifier AC drive system with fault tolerance using the average current Park's vector approach. 2009 IEEE International Electric Machines and Drives Conference. IEEE, 2009, pp. 695-701. doi: 10.1109/iemdc.2009.5075281
23. Curreri F., Patanè L., Xibilia M.G. Soft Sensor Transferability: A Survey. Applied Sciences, 2021, vol. 11(16), pp. 7710. doi: 10.3390/app11167710
24. Dybkowski M., Klimkowski K. Artificial Neural Network Application for Current Sensors Fault Detection in the Vector Controlled Induction Motor Drive. Sensors, 2019, vol. 19(3), pp. 571. doi: 10.3390/s19030571
25. Zhou X., Mao S., Li M. A Novel Anti-Noise Fault Diagnosis Approach for Rolling Bearings Based on Convolutional Neural Network Fusing Frequency Domain Feature Matching Algorithm. Sensors, 2021, vol. 21(16), pp. 5532. doi: 10.3390/s21165532
26. Mendes A.M.S., Cardoso A.J.M. Voltage source inverter fault diagnosis in variable speed AC drives, by the average current Park's vector approach. IEEE International Electric Machines and Drives Conference. IEEE, 1999, pp. 704-706. doi: 10.1109/iemdc.1999.769220
27. Muñoz-Aguilar R.-S., Rodriguez P., Dòria-Cerezo A., Candela I., Luna A. A sensor-less sliding mode control scheme for a stand-alone wound rotor synchronous generator under unbalanced load conditions. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2014, vol. 60, pp. 275-282. doi: 10.1016/j.ijepes.2014.03.003
28. Cornell E.P., Lipo T.A. Modeling and Design of Controlled Current Induction Motor Drive Systems. IEEE Transactions on Industry Applications, 1977, vol. 4, pp. 321-330. doi: 10.1109/tia.1977.4503414
29. Thomson W., Fenger M. Current signature analysis to detect induction motor faults. IEEE Industry Applications Magazine, 2001, vol. 7(4), pp. 26-34. doi: 10.1109/2943.930988
30. Fenger M., LLoyd B.A., Thomson W.T. Development of a tool to detect faults in induction motors via current signature analysis In Proceedings of the 2003 IEEE-IAS/PCA Cement Industry Conference. IEEE, 2003, pp. 37-46. doi: 2003-05-04/09
31. Khanaki R., MohdRadzi M.A., Marhaban M.H. Artificial neural network based maximum power point tracking controller for photovoltaic standalone system. International Journal of Green Energy, 2016, vol. 13(3), pp. 283-291. doi: 10.1007/s00500-021-05653-0
32. Muruganandam M., Madheswaran M. Stability analysis and implementation of chopper fed DC series motor with hybrid PID-ANN controller. International Journal of Control, Automation and Systems, 2013, vol. 11(5), pp. 966-975. doi: 10.1007/s12555-012-9209-y
33. Sancho-Asensio A., Orriols-Puig A., Golobardes Robust E. Robust on-line neural learning classifier system for data stream classification tasks. Soft Computing, 2014, vol. 18(8), 1441-1461. doi: 10.1007/s00500-014-1233-9
34. Liu L., Özsu M.T. In Encyclopedia of Database Systems. Springer Singapore, 2009. 765 p. doi: 10.1007/978-1-4614-8265-9
35. Evgeniou T., Pontil M. Support vector machines: Theory and applications. Advanced Course on Artificial Intelligence. Springer, 1999, pp. 249-257. doi: 10.1007/3-540-44673-7_12
36. Cunningham P. Delany S.J. k-Nearest neighbour classifiers-A Tutorial. ACM Computing Surveys (CSUR), 2021, vol. 54(6),pp. 1-25. doi: 10.1145/3459665
37. Bichurin M., Petrov R., Leontiev V., Semenov G., Sokolov O. Magnetoelectric current sensors. Sensors, 2017, vol. 17(6), pp. 1271. doi: 10.3390/s17061271

Королёв Н.А., Жуковский Ю.Л., Котелева Н.И. Наблюдатель состояния подшипников асинхронного двигателя по компонентам векторов Парка тока и напряжения // Электротехнические системы и комплексы. 2022. № 2(55). С. 62-70. https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-2(55)-62-70

Korolev N.A., Zhukovski Yu.L., Koteleva N.I. Bearing State Monitoring Device for an Asynchronous Motor by the Current and Voltage Park Vector Components. *Elektrotekhnicheskie sistemy i kompleksy* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2022, no. 2(55), pp. 62-70. (In Russian). https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-2(55)-62-70

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 621.31 https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-2(55)-71-76

Варганова А.В., Новоселов В.И.

Тюменский индустриальный университет, филиал ТИУ в Тобольске

АЛГОРИТМ ПОИСКА ОПТИМАЛЬНОЙ ТОЧКИ ПОДКЛЮЧЕНИЯ К ВНЕШНИМ ИСТОЧНИКАМ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИЕЙ

В статье рассматривается алгоритм определения экономически обоснованных мест подключения систем электроснабжения с источниками распределенной генерации к внешней сети. Алгоритм основан на методе динамического программирования. Критерием оптимизации является минимум затрат на покупку и передачу электроэнергии от внешних источников местным сетям, учитывая при этом надежность электроснабжения в виде экономического ущерба, возникающего как у потребителей, так и поставщиков электроэнергии. Для поиска оптимального решения используются модели источников электроэнергии, которые представляют собой зависимость покупаемой мощности от тарифа на электроэнергию, потерь мощности в элементах сети и надежности электроснабжения. При оценке надежности электроснабжения учитываются особенности режимов работы схем распределительных устройств подстанции, оборудование подстанции, длина и конструкция линий электропередачи, питающих подстанцию и отходящих до исследуемой системы электроснабжения. Разработанный алгоритм позволит определять оптимальные точки подключения к внешней сети, что обеспечит экономичное и надежное функционирование систем электроснабжения, а также позволит спланировать схему электроснабжения на этапе проектирования новой или реконструкции существующей сети.

Ключевые слова: надежность электроснабжения, распределенная генерация, внешний источник, точка подключения к внешней сети, оптимизация, микрогенерация.

ВВЕДЕНИЕ

Энергетическая стратегия Российской Федерации до 2035 г. ориентирована на введение источников распределенной генерации, в том числе возобновляемых, что обеспечит дешевой и чистой электроэнергией новых потребителей. Существующим проблемам распределенной энергетики учеными посвящено большое число работ [1].

Одной из решаемых задач в данной области является проектирование оптимальных схем электроснабжения с источниками распределенной генерации, что может быть обеспечено за счет установки малой генерации в наилучших точках сети и тем самым позволит сократить потери мощности и электроэнергии [2, 3]. Данная задача решается большим числом методов в зависимости от особенностей сетей, источников и потребителей энергии, например, предлагается использовать модифицированный метод отсекающих плоскостей Келли [4], модифицированный метод динамического программирования [5], применение иммунного алгоритма [6].

Авторы [7] предлагают для повышения эффективности режимов работы систем с распределенной генерацией осуществлять экономически обоснованный выбор первичных источников энергии, что обеспечит повышение надежности и безопасности без удорожания проектируемой электротехнической системы. Уделяется внимание особенностям режимов работы систем электроснабжения с источниками распределенной генерации, работающих автономно [8].

На этапе проектирования важно оценивать эффективность внедрения источников энергии. В работе [9] данная задача решается путем созданной интеллектуальной системы, обеспечивающей моделирование и прогнозирование режимов работы энергосистем с распределенной генерацией и поиск ее наилучших режимов. Также режимные задачи рассматриваются в условиях промышленных систем электроснабжения с собственной генерацией с целью оценки надежности потребителей и устойчивости источников [10, 11].

Реконструкция существующих сетей с собственными источниками энергии и повышение эффективности их функционирования – это еще одна из исследовательских задач. Большое число работ посвящено реконфигурации электрических сетей различных уровней напряжения [12-14], разделению сложнозамкнутых сетей, в том числе и с источниками электроэнергии [15].

Решаются задачи не только режимного характера, но и вопросы регулирования отношений между поставщиками, источниками и покупателями электроэнергии. В настоящее время ведется разработка крупного программного продукта – А-Платформа – платформа распределенной генерации [16], которая в перспективе позволит обеспечить регулирование отдельных игроков рынка малой генерации.

В системах электроснабжения с возобновляемыми источниками энергии уделяется внимание повышению эффективности их режимов работы. В работе [17] авторы рассматривают вопрос поиска оптимального распределения мощности между станциями хранения энергии, в [18, 19] предлагаются методы управления режимами распределительных сетей с гибридной энергосистемой, что обеспечивает сокращение потерь.

Данная работа посвящена разработке алгоритма поиска экономически целесообразного места подключения системы электроснабжения с разнородными

© Варганова А.В., Новоселов В.И., 2022

источниками распределенной генерации к внешнему источнику электроэнергии с целью обеспечения надежного и экономного электроснабжения потребителей.

АЛГОРИТМ ПОИСКА ОПТИМАЛЬНОЙ ТОЧКИ ПОДКЛЮЧЕНИЯ К ВНЕШНЕМУ ИСТОЧНИКУ

В данной работе предлагается алгоритм, позволяющий определять оптимальную точку подключения к внешней сети с использованием метода динамического программирования. Выбор метода оптимизации обусловлен необходимостью ввода исходных данных в табличной форме, наличием нескольких составляющих целевой функции, заданием ограничений в форме равенств и неравенств. Критерием оптимизации является минимум затрат (З) на передачу электроэнергии, учитывая при этом надежность электроснабжения в виде экономического ущерба.

В общем виде задача оптимизации имеет следующий вид:

$$З = \left(С_{ЭЭ} + С_{\Delta W} + \alpha У\right) \to \min, \qquad (1)$$

где $С_{ЭЭ}$ – стоимость электроэнергии, руб.; $С_{\Delta W}$– стоимость потерь электроэнергии, руб.; α – коэффициент надежности внешнего источника; У – экономический ущерб от перерыва электроснабжения, руб.

На целевую функцию накладываются ограничения:

$$\begin{cases} \sum P_{ист} = P_{нагр} + \Delta P - P_{собств}, \\ U_{i\,\min} \le U_i \le U_{i\,\max}, \\ S_{i\,\min} \le S_i \le S_{i\,\max}, \end{cases} \qquad (2)$$

где $\Sigma P_{ист}$ – суммарная мощность источников распределенной генерации, МВт; $P_{нагр}$ – нагрузка системы электроснабжения с распределенной генерацией, МВт; ΔP – потери активной мощности в сети, МВт; $P_{собств}$ – активная мощность, вырабатывая собственными источниками системы электроснабжения, МВт; $U_{i\,\min}$, $U_{i\,\max}$– предельно допустимые потери напряжения в узле (±10% от номинального значения), кВ; $S_{i\,\min}$, $S_{i\,\max}$ – минимально и максимально допустимое значение мощности, протекающей по элементам электрической сети, определяется нагрузочной способностью объекта, МВА.

Стоимость потерь мощности определяется как

$$С_{\Delta W} = \sum_{i=1}^{M} \left(\Delta W_{(ЛЭП+Т)i} \beta_i\right), \qquad (3)$$

где M – количество источников; $\Delta W_{(ЛЭП+Т)i}$ – потери электроэнергии в линиях электропередачи и трансформаторах от возможных источников электроэнергии, МВт·ч; β_i – тариф на электроэнергию от возможных внешних источников электроэнергии, руб./МВт·ч.

Экономический ущерб определяется исходя из двух возможных вариантов:

1) если в системе электроснабжения имеются внешние источники, полностью покрывающие нагрузку потребителей, то ущерб $У_1$ определяется дополнительными затратами, возникающими по причине изменения тарифа и потерь электроэнергии в распределительных сетях при подключении к внешнему источнику:

$$У_1 = \left(\beta_2 - \beta_1\right) P_{потр} T_в + \left(\beta_2 \Delta W_{ИП} - \beta_1 \Delta W_1\right), \qquad (4)$$

где β_2 – тариф на электроэнергию внешнего источника, руб./МВт·ч; β_1 – тариф на электроэнергию основного источника, руб./МВт·ч; $P_{потр}$ – мощность потребителей, МВт; $T_в$ – годовая продолжительность аварийных отключений, ч; $\Delta W_{ИП}$ – потери электроэнергии в линиях электропередачи при передачи мощности от внешнего источника за время $T_в$, МВт·ч; ΔW_1 – потери электроэнергии в линиях электропередачи при передаче мощности от рассматриваемого источника за время $T_в$, МВт·ч;

2) если в системе имеется внешний источник, покрывающий частично нагрузку потребителей на время восстановления основного источника, то в данном случае ущерб $У_2$ будет оцениваться как

$$\begin{aligned} У_2 = у_0 \left(P_{потр} - P_{ИП}\right) T_в + \left(\beta_2 - \beta_1\right) P_{ИП} T_в + \\ + \left(\beta_2 \Delta W_{ИП} - \beta_1 \Delta W_1\right), \end{aligned} \qquad (5)$$

где $у_0$ – удельный ущерб потребителей, руб./МВт·ч; $P_{ИП}$ – мощность, потребляемая от резервного источника на время перерыва электроснабжения, МВт.

Блок-схема алгоритма поиска оптимальной точки подключения представлена на **рис. 1**.

В качестве исходных данных для расчета необходимо задать схему системы электроснабжения, модели внешних источников электроэнергии, параметры линий электропередачи от внешнего источника к системе электроснабжения. Определить величину мощности, необходимую для приема из энергосистемы. Построить эквивалентную модель внешнего источника электроэнергии методом динамического программирования и определить наилучший вариант точки подключения к внешней сети в зависимости от величины мощности внешнего источника, определяемой в соответствии с балансовым условием (уравнение 1 в системе (2)).

Модель внешнего источника электроэнергии представляет собой зависимость мощности P, принимаемой в соответствии с договором на поставку мощности от тарифа на электроэнергию β в заданном диапазоне мощности, оговоренном также в договоре на поставку мощности; потерь мощности ΔP, возникающих в трансформаторах и линиях электропередачи при передаче мощности от внешнего источника и от коэффициента надежности внешнего источника α, определяемого надежностью схемы распределительного устройства, а также надежностью линий электропередачи высокого и низкого напряжения от источника до распределительного пункта.

Более наглядно модель можно представить в табличной форме (**табл. 1**).

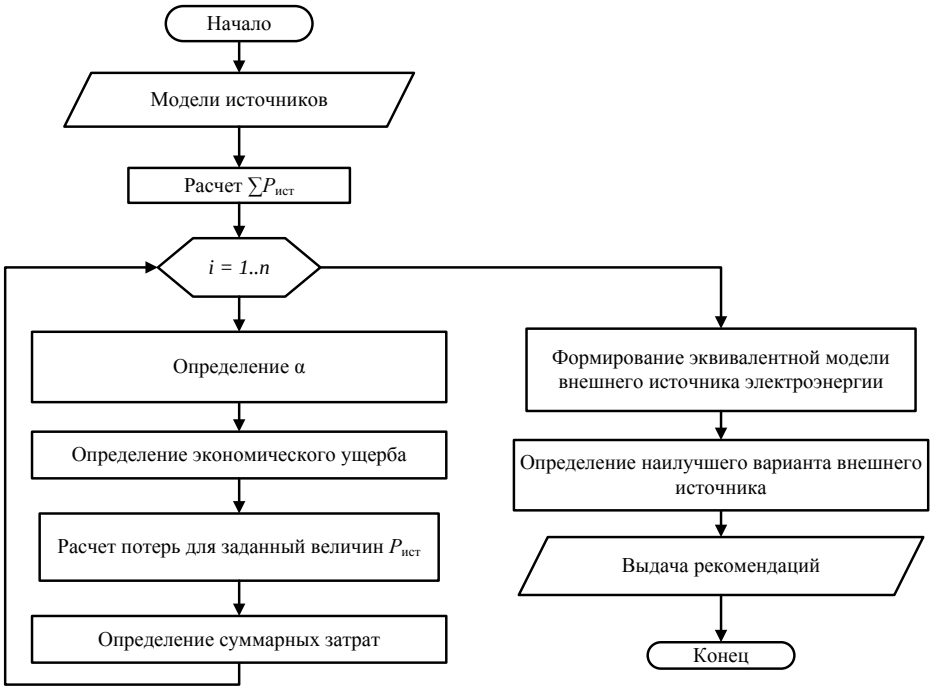


Рис. 1. Блок-схема алгоритма определения оптимальной точки подключения к внешней сети

Таблица 1

Модель внешнего источника электроэнергии

P, МВт	P_1	P_2	P_3	…	P_n
β, руб./МВт·ч	β_1	β_2	β_3	…	β_n
ΔP, МВт	ΔP_1	ΔP_2	ΔP_3	…	ΔP_n
α	α_1	α_2	α_3	…	α_n

Табличная форма модели обусловлена необходимостью задавать различные диапазоны мощностей от внешнего источника, которые соответствуют различным тарифам на электроэнергию. Модель также содержит величину потерь мощности ΔP с целью оценки потерь электроэнергии при передаче и трансформации мощности от внешнего источника в зависимости от уровня напряжения, марки и длины ЛЭП, мощности трансформатора, а также оценивается величина тарифа на электроэнергию при расчете потерь.

Для учета фактора надежности при определении экономического ущерба рассчитывается коэффициент надежности внешнего источника:

$$\alpha = T_{\text{в ВИП}}\omega_{\text{ВИП}}, \tag{6}$$

где $T_{\text{в ВИП}}$ – эквивалентное время восстановления от внешнего источника, год; $\omega_{\text{ВИП}}$ – эквивалентная величина параметра потока отказов при оценке надежности внешнего электроснабжения.

Величины $T_{\text{в ВИП}}$ и $\omega_{\text{ВИП}}$ определяются структурно-аналитическим методом [20], исходя из условия, что элементы внешнего источника (линия электропередачи высокого напряжения, схема распределительного устройства подстанции, линия низкого напряжения) соединены последовательно.

Величина параметра потока отказов точки подключения к внешней сети определяется по выражению

$$\omega_{\text{ВИП}} = \omega_{\text{ЛЭП ВН}} + \omega_{\text{РУ ПС}} + \omega_{\text{ЛЭП НН}}, \tag{7}$$

где $\omega_{\text{ЛЭП ВН}}$ – параметр потока отказов линии электропередачи от внешнего источника электроэнергии на стороне высокого напряжения подстанции, 1/год; $\omega_{\text{РУ ПС}}$ – эквивалентное значение параметра потока отказов распределительных устройств подстанции, 1/год [11]; $\omega_{\text{ЛЭП НН}}$ – параметр потока отказов линии электропередачи от внешнего источника электроэнергии на стороне низкого напряжения подстанции, 1/год.

Время восстановления определяется исходя из выражения

$$T_{\text{в ВИП}} = \frac{T'}{\omega_{\text{ВИП}}}; \tag{8}$$

$$T' = T_{\text{ЛЭП ВН}}\omega_{\text{ЛЭП ВН}} + T_{\text{РУ ПС}}\omega_{\text{РУ ПС}} + \\ + T_{\text{ЛЭП НН}}\omega_{\text{ЛЭП НН}},$$

где $T_{\text{в ЛЭП ВН}}$ – время восстановления линии электропередачи от внешнего источника электроэнергии на стороне высокого напряжения подстанции, год; $T_{\text{в РУ ПС}}$ – эквивалентное значение времени восстановления распределительных устройств подстанции, год [11]; $T_{\text{в ЛЭП НН}}$ – время восстановления линии электропередачи от внешнего источника электроэнергии на стороне низкого напряжения подстанции, год.

МОДЕЛЬ ВНЕШНЕГО ИСТОЧНИКА

Для решения поставленной задачи смоделированы источники внешнего подключения к энергосистеме в виде, приведенном в **табл. 2.**

Таблица 2

Модель внешнего источника электроэнергии

P, МВт	7	8	9	10	11
β, руб./МВт·ч	3,4	3,4	3,4	3,4	3,6
ΔP, МВт	1,4	1,6	1,8	2	2,2
α	0,00052	0,00052	0,00052	0,00052	0,00052

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Созданный подход позволяет моделировать системы электроснабжения с источниками распределенной генерации и возможностью питания от внешних источников, при этом решается задача поиска оптимального внешнего электроснабжения, которое обеспечивает надежность и экономичность режимов работы сети. Применение метода динамического программирования позволяет задавать исходные данные о внешних источниках электроэнергии, учитывая особенности их режимов работы и условий оговора на поставку электроэнергии. Разработанный алгоритм ориентирован на решение предпроектных задач при создании конфигурации новой или реконструкции существующей электрической сети, что обеспечит сокращение затрат не только на потери и прием электроэнергии из сети, но и позволит оценить надежность электроснабжения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Никулин П.А. Проблемы и перспективы развития распределенной генерации в Российской Федерации // Экономика и социум. 2018. №6 (49). С. 802-804.
2. Georgilakis P.S., Hatziargyriou N.D. Optimal distributed generation placement in power distribution networks: models, methods, and future research // IEEE Trans. Power Syst. 2003. Vol. 28. №3.
3. Meera Shareef S.D., Vinod Kumar T. A review on models and methods for optimal placement of distributed generation in power distribution systems // UEAR. 2014. Vol. 4. Issue Spl-1.
4. Оптимизация местоположения и мощности малой генерации в распределительных сетях / С.А. Ерошенко, А.А. Карпенко, С.Е. Кокин, А.В. Паздерин // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2012. №1-2. С.82-89.
5. Технико-экономическое обоснование места установки источников распределенной генерации / А.В. Варганова, Ю.М. Байрамгулова, И.Н. Гончарова, О.А. Кроткова // Электротехнические системы и комплексы. 2019. №3(44). С. 68-72.
6. Ma J. Size and location of distributed generation in distribution system based on immune algorithm // The 2nd International Conference on Complexity Science & Information Engineering, Systems Engineering Procedia 4. IEEE, 2012, pp. 124-132.
7. Ахтулов А.Л., Леонов Е.Н., Федоров В.К. Методика оптимального выбора источников энергии в электротехнических системах с распределённой генерацией // Динамика систем, механизмов и машин. 2016. №1. С. 20-25.
8. Fully Decentralized Optimal Power Flow of Multi-Area Interconnected Power Systems Based on Distributed Interior Point Method/ Lu W., Liu M., Lin S., Li L. // IEEE Transactions on Power Systems. 2016. Vol. 33. No. 1. Pp. 901-910.
9. Ерошенко С.А. Модель интеллектуальной системы оценки эффективности внедрения объектов распределённой генерации// Материалы VIII Международной научно-технической конференции. Самара: Самарский государственный технический университет, 2017. С. 41-44.
10. Илюшин П.В. Анализ особенностей сетей внутреннего электроснабжения промышленных предприятий с объектами распределённой генерации // Энергетик. 2016. №12. С. 21-25.
11. Varganova A.V., Irihov A.S., Shemetov A.N. External Power Supply Reliability Assessment to Consumers of 6-10 kV of the Substations of 35 kV and Higher // 2020 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon). IEEE, 2020. Pp. 57-62.
12. Петрова Д.Г. Методика определения точки экономического разрыва в сложнозамкнутых сетях 10 кВ // Интеллектуальная собственность и современные техника и технологии для развития экономики: материалы VI Республиканской молодежной научно-практической конференции в рамках Всероссийского студенческого форума «Инженерные кадры – будущее инновационной экономики России». Йошкар-Ола: ПГТУ, 2018. С. 80-83.
13. Сидорова В.Т., Карчин В.В. Усовершенствование методики определения точки размыкания в сложнозамкнутых воздушных сетях 110 кВ // Электроэнергетика глазами молодежи – 2017: материалы VIII Международной научно-технической конференции. Самара: СамГТУ, 2017. С. 104-107.
14. Савина Н.В., Сцепуро К.И. Реконфигурация схемы электрических сетей как средство снижения потерь электроэнергии // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2019. Т. 11. № 2(42). С. 91-102.
15. Валеев И.М., Камалиев Р.Н., Мусаев Т.А. Оценка возможности применения метода размыкания сетей с двусторонним питанием в условиях действующей системы электроснабжения городского района напряжением 6(10) кВ// Диспетчеризация и управление в электроэнергетике: Материалы докладов XII Всероссийской открытой молодежной научно-практической конференции. Казань: КГЭУ, 2017. С. 44-49.
16. Официальный сайт «А-Платформа - Российская программная платформа управления распределённой энергетикой». URL: https://a-platform.ru/ (дата обращения 25.05.2022).
17. Power optimization allocation strategy for energy storage station responding to dispatch instruction/ Lei Ting, Wang Tao, Yu Haoran, Liu Haoming // 2015 International Symposium on Smart Electric Distribution Systems and Technologies (EDST). IEEE, 2015. Pp. 177-182.
18. Mid-long term optimal dispatching method of power system with large-scale wind-photovoltaic-hydro power generation/ Zhang Q., Wangg M., Wang X., Tian S. // 2017 IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2). IEEE, 2017, pp. 1-6.
19. Optimal dispatching for active distribution network with wind-battery hybrid power system / Y. Ma, G. Zou, M. Hou, Q. Dong and J. Yang // 2017 IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC). IEEE, 2017, pp. 1-6.
20. Хорольский В.Я., Таранов М.А., Петров Д.В. Технико-экономические расчеты распределительных электрических сетей. М.: ФОРУМ: ИНФРА-М, 2015. 96 с.

Поступила в редакцию 12 февраля 2022 г.

INFORMATION IN ENGLISH

ALGORITHM FOR SEARCHING THE OPTIMAL POINT OF CONNECTION TO EXTERNAL POWER SOURCES IN DISTRIBUTED GENERATION POWER SUPPLY SYSTEMS

Aleksandra V. Varganova

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Electrical Power Engineering Department, Tobolsk Industrial Institute, Tobolsk Branch of the Industrial University of Tyumen, Tobolsk, Russia. E-mail: aleksandra-khlamova@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0003-4675-7511

Viktor I. Novoselov

PhD (Physics and Mathematics), Associate Professor, Department of Electric Power Engineering, Tyumen Industrial University Tobolsk Industrial Institute (Branch), Tobolsk, Russia, novoselovvi@tyuiu.ru, https://orcid.org/0000-0001-8342-4279

The article discusses an algorithm for determining economically feasible places for connecting power supply systems with distributed generation sources to the external network. The algorithm is based on the dynamic programming method. The optimization criterion is the minimum costs for the purchase and transmission of electricity from external sources to local networks, while taking into account the reliability of electricity supply in the form of economic damage arising from both consumers and electricity suppliers. To find the optimal solution, models of electricity sources are used, which represent the dependence of the purchased power on the electricity tariff, power losses in the network elements and the reliability of power supply. When assessing the reliability of power supply, the features of the operating modes of the substation switchgear circuits, the substation equipment, the length and design of the power lines supplying the substation and extending to the power supply system under study are taken into account. The developed algorithm will allow determining the optimal points of connection to the external network, which will ensure the economical and reliable operation of power supply systems, and will also allow planning the power supply scheme at the design stage of a new or reconstruction of an existing network.

Keywords: reliability of power supply, distributed generation, external source, point of connection to the external network, optimization, microgeneration.

REFERENCES

1. Nikulin P.A. Problems and Prospects of Development of Distributed Generation in the Russian Federation. *Ekonomika i socium* [Economics and Society], 2018, no. 6(49), pp. 802-804. (In Russian)
2. Georgilakis P.S., Hatziargyriou N.D. Optimal Distributed Generation Placement in Power Distribution Networks: Models, Methods, and Future Research. IEEE Trans. Power Syst, 2023, vol. 28, no. 3.
3. Meera Shareef S.D., Vinod Kumar T. A Review on Models and Methods for Optimal Placement of Distributed Generation in Power Distribution Systems. *UEAR*, 2014, vol. 4, issue Spl-1, Jan - June 2014.
4. Eroshenko S.A., Karpenko A.A., Kokin S.E., Pazderin A.V. Optimization of Location and Power of Small Generation in Distribution Networks. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii Problemy energetiki* [Proceedings of higher educational establishments. Energy problem], 2012, no. 1-2, pp. 82-89. (In Russian)
5. Varganova A.V., Bayramgulova Yu.M., Goncharova I.N., Krotkova O.A. Technical and economic substantiation of the place of installation of sources of distributed generation. *Elektrotekhnicheskie sistemy i kompleksy* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2019, no. 3 (44), pp. 68-72. (In Russian)
6. Ma J., Wang Y., Yang L. Size and Location of Distributed Generation in Distribution System Based on Immune Algorithm. The 2nd International Conference on Complexity Science & Information Engineering, Systems Engineering Procedia. IEEE, 2012, pp. 124-132.
7. Akhtulov A.L., Leonov E.N., FedorovV. Technique of Optimizing the Energy Sources in Electrical Systems with Distributed Generation. *Dinamika sistem mekhanizmov i mashin* [Speaker Systems, Mechanisms and Machines], 2016, no. 1, pp. 20-25. (In Russian)
8. Lu W., Liu M., Lin S., Li L. Fully Decentralized Optimal Power Flow of Multi-Area Interconnected Power Systems Based on Distributed Interior Point Method. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, vol. 33, no. 1, pp. 901-910.
9. Eroshenko S.A. A Model of an Intellectual System for Assessing the Effectiveness of the Implementation of Distributed Generation Facilities. *Materialy VIII Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* [Materials of the VIII International Scientific and Technical Conference], 2017, pp. 41-44. (In Russian)
10. Ilyushin P.V. Analysis of the Peculiarities of Internal Power Supply Networks of Industrial Enterprises With Distributed Generation Facilities. *Energetik* [Power Engineer], 2016, no. 12, pp. 21-25. (In Russian)
11. Varganova A.V., Irihov A.S., Shemetov A.N. External Power Supply Reliability Assessment to Consumers of 6-10 kV of the Substations of 35 kV and Higher. 2020 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon). IEEE, 2020, pp. 57-62.
12. Petrova D.G. Methods of determining the point of economic rupture in the complex networks of 10 kV. *Intellektualnaia sobstvennost i sovremennye tekhnika i tekhnologii dlia razvitiia ekonomiki Materialy VI respublikanskoi molodezhnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii v ramkakh Vserossiiskogo studencheskogo foruma Inzhenernye kadry budushchee innovatsionnoi ekonomiki Rossii* [Intellectual property and modern techniques and technologies for the development of the economy: materials of the VI of the Republican youth scientific and practical conference in the framework of the All-Russian Student Forum "Engineering Persons - the future of the innovation economy of Russia]. Joshkar-Ola, PGTU Publ., 2018, pp. 80-83. (In Russian)
13. Sidorova V.T., Karchin V.V. Improving the method of determining the point of opening in complex closed air networks 110 kV. *Elektroenergetika glazami molodezhi - 2017 Materialy VIII Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* [Electric power in the eyes of youth - 2017: Materials of the VIII International Scientific and Technical Conference]. Samara, SamGTU Publ., 2017, pp. 104-107. (In Russian)
14. Savina N.V., Scepuro K.I. Reconfiguration of the circuit of electrical networks as a means of reduced electricity loss. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta* [Bulletin of the Kazan State Energy University],

2019, vol. 11, no. 2(42), pp. 91-102. (In Russian)
15. Valeev I.M., Kamaliev R.N., Musaev T.A. Evaluation of the possibility of applying the method of opening of double-sided networks in the conditions of the current power supply system of the urban area of 6 (10) kV. *Dispetcherizatsiia i upravlenie v elektroenergetike Materialy dokladov XII Vserossiiskoi otkrytoi molo-dezhnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Dispatch and management in the electric power industry: materials of reports of the XII All-Russian open youth scientific and practical conference]. Kazan, KGEU Publ., 2017, pp. 44-49. (In Russian)
16. *A-Platforma – Rossijskayaprogrammnayaplatformaupravleniyaraspredelyonnojenergetikoj* [A-Platform -Russian software platform management distributed energy]. Available at: https://a-platform.ru/ (accessed 27.08.2021)
17. Lei Ting, Wang Tao, Yu Haoran, Liu Haoming Power optimization allocation strategy for energy storage station responding to dispatch instruction. 2015 International Symposium on Smart Electric Distribution Systems and Technologies (EDST). IEEE, 2015, pp. 177-182.
18. Zhang Q., Wangg M., Wang X., Tian S. Mid-long term optimal dispatching method of power system with large-scale wind-photovoltaic-hydro power generation. 2017 IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2). IEEE, 2017, pp. 1-6.
19. Ma Y., Zou G., Hou M., Dong Q., Yang J. Optimal dispatching for active distribution network with wind-battery hybrid power system. 2017 IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC). IEEE, 2017, pp. 1-6.
20. Khorolsky V.Ya., Taranov M.A., Petrov D.V. *Tekhniko-ekonomicheskie raschety raspredelitel'nykh elektricheskikh setey* [Technical and Economy Calculations for distribution cells Networks]. Moscow, Forum, INFRA-M Publ., 2015, 96 p. (In Russian)

Варганова А.В., Новоселов В.И. Алгоритм поиска оптимальной точки подключения к внешним источникам электроэнергии в системах электроснабжения с распределенной генерацией // Электротехнические системы и комплексы. 2022. № 2(55). С. 71-76. https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-2(55)-71-76

Varganova A.V., Novoselov V.I. Algorithm for Searching the Optimal Point of Connection to External Power Sources in Distributed Generation Power Supply Systems. *Elektrotekhnicheskie sistemy i kompleksy* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2022, no. 2(55), pp. 71-76. (In Russian). https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-2(55)-71-76

УДК 621.315.1 https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-2(55)-77-81

Панова Е.А.[1, 2], Сабирова Р.Р.[1], Новиков И.В.[1]

[1]Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова
[2]Тюменский индустриальный университет, филиал ТИУ в Тобольске

КОМБИНИРОВАННАЯ СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ ДВУХЦЕПНОЙ ЛЭП С ДВУМЯ ГРОЗОТРОСАМИ

В работе предложена комбинированная схема замещения двухцепной линии электропередачи с двумя грозозащитными тросами, основанная на сочетании методов фазных координат и симметричных составляющих. Предлагаемый подход к моделированию ЛЭП позволяет учесть взаимное расположение проводящих элементов на опоре (проводов и грозозащитных тросов), в том числе несимметричное друг относительно друга. Кроме того, за счет сочетания метода фазных координат с методом симметричных составляющих достигается упрощение схемы замещения в целом и процесса подготовки исходных данных. Использование комбинированной схемы замещения ЛЭП позволяет выполнять расчет несимметричного режима методом симметричных составляющих, при этом все элементы, кроме ЛЭП высокого напряжения, моделируются параметрами прямой, обратной и нулевой последовательности, а линии электропередачи – в фазных координатах. Предложенная модель ЛЭП ориентирована на выполнение расчетов параметров режима однофазного короткого замыкания в сети 110–220 кВ системы электроснабжения промышленного предприятия с целью дистанционного определения места повреждения.

Ключевые слова: линия электропередачи, фазные координаты, симметричные составляющие, взаимоиндукция, грозозащитный трос**.**

ВВЕДЕНИЕ

Решение таких задач, как определение места повреждения при однофазных коротких замыканиях на линиях электропередачи напряжением 110 кВ и выше, требует высокой точности результатов расчета параметров режима однофазного короткого замыкания. Она во многом зависит от модели линий электропередачи. Так, в [1] описано применение П-образной схемы замещения ЛЭП, а также предложена улучшенная П-образная схема замещения. Такой способ моделирования ЛЭП применяется для протяженных ЛЭП в системообразующих сетях высокого и сверхвысокого напряжения. Авторы [2] разработали ПО, которое позволяет моделировать ЛЭП и исследовать влияние таких факторов, как частота, скин-эффект и расстояние между проводниками на собственные и взаимные сопротивления линии. В [3] авторы предложили новые уточненные уравнения для расчета сопротивления заземления ЛЭП. Однако такое усложнение модели ЛЭП имеет смысл только для расчета электромагнитных переходных процессов.

Важным является учет сопротивления взаимоиндукции между проводящими элементами ЛЭП. В [4] приведены уравнения для расчета индуктивного сопротивления взаимоиндукции транспонированных ЛЭП. Авторы [5] исследовали взаимоидуктивное влияние параллельных линий разного напряжения при протекании по одной из них несимметричного тока аварийного режима. Аналогичную проблему решали авторы в [6]. Однако они предложили новый метод «виртуальной» линии. Предложенный авторами метод показал достаточную для расчетов параметров срабатывания устройств релейной защиты точность. В [7] исследовано взаимоиндуктивное влияние трехфазной ЛЭП и пересекающейся с ней линии связи, причем авторы предложили уравнения, которые позволяют исследовать такое влияние при различных углах пересечения линий. Авторы [8] решили данную проблему с использованием каскадно соединённых П-образных схем замещения, которые позволяют учесть не только взаимоиндукцию многофазной ЛЭП, но и влияние частоты и отсутствия транспозиции на сопротивление.

Целый ряд работ посвящен определению параметров ЛЭП на основе синхронизированных векторных измерений. В [9] авторы верифицируют значения параметров прямой и нулевой последовательности ЛЭП на основе синхронизированных векторных измерений токов и напряжений по концам ЛЭП. Также в работе приведено тестирование предложенного алгоритма как на транспонированной, так и на нетранспонированной линии. В [10] предложена цепочечная модель ЛЭП, которая позволяет учесть влияние погодных факторов на определение параметров линии. Данная модель предназначена для использования ее в сетях сверхвысокого напряжения. Авторы [11] разработали алгоритм оценки параметров ЛЭП и определения места повреждения, который учитывает влияние электрической дуги и величину сопротивления заземления опоры.

При моделировании ЛЭП для повышения точности результатов расчета, в зависимости от поставленной задачи, могут быть учтены различные факторы. В работе [12] авторы разработали термоэлектрическую модель ЛЭП, которая учитывает не только электрические, но и тепловые характеристики линии. Авторы [13] дополнили модель ЛЭП параметрами изоляторов для моделирования грозовых перенапряжений. В [14] авторы предложили частотнозависимую модель ЛЭП для исследования электромагнитных переходных процессов. В [15] авторы предлагают метод точного учета неоднородности поперечного сечения проводника и влияния скин-эффекта и эффекта близости на электрические параметры ЛЭП. Авторы [16] исследуют учет взаимного влияния ЛЭП разного уровня напряжения и учет этого влияния на результаты расчета параметров режимов. В [17] авторами использован метод конечных элементов для учета транспозиции ЛЭП и влияния заземления на емкость линии. Однако для расчетов параметров аварийных режимов достаточно учесть электрические параметры ЛЭП и расстояния между

© Панова Е.А., Сабирова Р.Р., Новиков И.В., 2022

проводниками, как показано, например, в [18, 19].

Все рассмотренные методы ориентированы в первую очередь на моделирование энергосистем и не могут быть использованы в условиях промышленных систем электроснабжения. Данная работа направленна на создание гибридной математической модели двухцепной ЛЭП. Предлагаемая модель учитывает фактическое расположение проводников на опоре, наличие грозозащитного троса, а также она может быть использована совместно со схемой замещения электрической сети в симметричных составляющих. Такой подход значительно сокращает время счета и упрощает схему замещения остальных элементов сети.

КОМБИНИРОВАННАЯ СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ

Предлагаемая в работе комбинированная схема замещения ЛЭП основана на сочетании методов симметричных оставляющих и фазных координат. Для вывода расчетных выражений для определения продольного сопротивления двухцепной ЛЭП с двумя грозотросами необходимо составить матрицу сопротивлений ЛЭП:

$$\dot{\mathbf{Z}} = \begin{pmatrix} \dot{\mathbf{Z}}_{ij} & \dot{\mathbf{Z}}_{\mathrm{T}j} \\ \dot{\mathbf{Z}}_{\mathrm{T}j} & \dot{\mathbf{Z}}_{\mathrm{TT}} \end{pmatrix}, \tag{1}$$

где:

– матрица собственных и взаимных сопротивлений цепей

$$\dot{\mathbf{Z}}_{ij} = \begin{pmatrix} \dot{Z}_{AA} & \dot{Z}_{BA} & \dot{Z}_{CA} & \dot{Z}_{aA} & \dot{Z}_{bA} & \dot{Z}_{cA} \\ \dot{Z}_{AB} & \dot{Z}_{BB} & \dot{Z}_{CB} & \dot{Z}_{aB} & \dot{Z}_{bB} & \dot{Z}_{cB} \\ \dot{Z}_{AC} & \dot{Z}_{BC} & \dot{Z}_{CC} & \dot{Z}_{aC} & \dot{Z}_{bC} & \dot{Z}_{cC} \\ \dot{Z}_{Aa} & \dot{Z}_{Ba} & \dot{Z}_{Ca} & \dot{Z}_{aa} & \dot{Z}_{ba} & \dot{Z}_{ca} \\ \dot{Z}_{Ab} & \dot{Z}_{Bb} & \dot{Z}_{Cb} & \dot{Z}_{ab} & \dot{Z}_{bb} & \dot{Z}_{cb} \\ \dot{Z}_{Ac} & \dot{Z}_{Bc} & \dot{Z}_{Cc} & \dot{Z}_{ac} & \dot{Z}_{bc} & \dot{Z}_{cc} \end{pmatrix}; \tag{2}$$

– матрицы сопротивлений взаимоиндукции между проводниками цепей и тросами

$$\dot{\mathbf{Z}}_{i\mathrm{T}} = \begin{pmatrix} \dot{Z}_{A\mathrm{T}1} & \dot{Z}_{B\mathrm{T}1} & \dot{Z}_{C\mathrm{T}1} & \dot{Z}_{a\mathrm{T}1} & \dot{Z}_{b\mathrm{T}1} & \dot{Z}_{c\mathrm{T}1} \\ \dot{Z}_{A\mathrm{T}2} & \dot{Z}_{B\mathrm{T}2} & \dot{Z}_{C\mathrm{T}2} & \dot{Z}_{a\mathrm{T}2} & \dot{Z}_{b\mathrm{T}2} & \dot{Z}_{c\mathrm{T}2} \end{pmatrix}; \tag{3}$$

$$\dot{\mathbf{Z}}_{\mathrm{T}j} = \begin{pmatrix} \dot{Z}_{\mathrm{T}1A} & \dot{Z}_{\mathrm{T}2A} \\ \dot{Z}_{\mathrm{T}1B} & \dot{Z}_{\mathrm{T}2B} \\ \dot{Z}_{\mathrm{T}1C} & \dot{Z}_{\mathrm{T}2C} \\ \dot{Z}_{\mathrm{T}1a} & \dot{Z}_{\mathrm{T}2a} \\ \dot{Z}_{\mathrm{T}1b} & \dot{Z}_{\mathrm{T}2b} \\ \dot{Z}_{\mathrm{T}1c} & \dot{Z}_{\mathrm{T}2c} \end{pmatrix}; \tag{4}$$

– матрица собственных и взаимных сопротивлений грозозащитных тросов

$$\dot{\mathbf{Z}}_{\mathrm{TT}} = \begin{pmatrix} \dot{Z}_{\mathrm{T}1\mathrm{T}1} & \dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}1} \\ \dot{Z}_{\mathrm{T}1\mathrm{T}2} & \dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}2} \end{pmatrix}. \tag{5}$$

Расчет собственных сопротивлений проводов и тросов, а также сопротивлений взаимоиндукции между ними предлагается выполнять по [20]:

$$\dot{Z}_{ij} = r_{\text{п}} + r_{\text{з}} + j0{,}145\lg\frac{D_{\text{з}}}{\rho_{\text{п.э}}}, \quad (i = j); \tag{6}$$

$$\dot{Z}_{ij} = r_{\text{з}} + j0{,}145\lg\frac{D_{\text{з}}}{D_{ij}}, \quad (i \neq j), \tag{7}$$

где $r_{\text{п}}$ – удельное активное сопротивление провода, Ом/км; $r_{\text{з}}$ – сопротивление, учитывающее потери активной мощности в земле от протекающего в ней тока (принимается равным 0,05 Ом/км); $D_{\text{з}}$ – глубина расположения обратного провода (принимается равной 935 м); $\rho_{\text{п.э}}$ – эквивалентный радиус провода (0,95 от действительного радиуса), м; D_{ij} – расстояние между проводящими элементами, м.

Приведенную схему замещения в фазных координатах (1) можно преобразовать в эквивалентную матрицу размерностью 3×3:

$$\dot{\mathbf{Z}}_s = \frac{1}{3}\dot{\mathbf{s}}^{-1}\left(\dot{\mathbf{Z}}_{ij} - \dot{\mathbf{Z}}_{Tj}\dot{\mathbf{Z}}_{TT}^{-1}\dot{\mathbf{Z}}_{iT}\right)\mathbf{s}, \tag{8}$$

где $\mathbf{s}$ – матрица фазового поворота, содержащая оператор $a = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$.

$$\dot{\mathbf{s}} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ a^2 & a & 1 & 0 & 0 & 0 \\ a & a^2 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & a^2 & a & 1 \\ 0 & 0 & 0 & a & a^2 & 1 \end{pmatrix}. \tag{9}$$

Из полученной матрицы $\mathbf{Z}_s$ можно определить сопротивления для комбинированной схемы замещения двухцепной ЛЭП с двумя грозозащитными тросами:

– сопротивление прямой последовательности каждой цепи (на примере первой цепи):

$$\dot{\mathbf{Z}}_{1.I} = \frac{1}{3}\frac{A}{\dot{Z}_{\mathrm{T2T1}}^2 - \dot{Z}_{\mathrm{T1T1}}\dot{Z}_{\mathrm{T2T2}}}; \tag{10}$$

$$\begin{aligned} A = {} & \dot{Z}_{AA}\dot{Z}_{\mathrm{T2T1}}^2 - \dot{Z}_{AA}\dot{Z}_{\mathrm{T1T1}}\dot{Z}_{\mathrm{T2T2}} + \dot{Z}_{A\mathrm{T1}}\dot{Z}_{\mathrm{T1}A}\dot{Z}_{\mathrm{T2T2}} - \\ & -\dot{Z}_{A\mathrm{T1}}\dot{Z}_{\mathrm{T2}A}\dot{Z}_{\mathrm{T2T1}} - \dot{Z}_{\mathrm{T1}A}\dot{Z}_{A\mathrm{T2}}\dot{Z}_{\mathrm{T2T1}} + \dot{Z}_{A\mathrm{T2}}\dot{Z}_{\mathrm{T2}A}\dot{Z}_{\mathrm{T2T1}} + \\ & +\dot{Z}_{BB}\dot{Z}_{\mathrm{T2T1}}^2 + \dot{Z}_{CC}\dot{Z}_{\mathrm{T2T1}}^2 - \dot{Z}_{BB}\dot{Z}_{\mathrm{T1T1}}\dot{Z}_{\mathrm{T2T2}} + \dot{Z}_{B\mathrm{T1}}\dot{Z}_{\mathrm{T1}B}\dot{Z}_{\mathrm{T2T2}} - \\ & -\dot{Z}_{B\mathrm{T1}}\dot{Z}_{\mathrm{T2}B}\dot{Z}_{\mathrm{T2T1}} - \dot{Z}_{\mathrm{T1}B}\dot{Z}_{B\mathrm{T2}}\dot{Z}_{\mathrm{T2T1}} - \dot{Z}_{B\mathrm{T2}}\dot{Z}_{\mathrm{T2}B}\dot{Z}_{\mathrm{T1T1}} - \\ & -\dot{Z}_{CC}\dot{Z}_{\mathrm{T1T1}}\dot{Z}_{\mathrm{T2T2}} + \dot{Z}_{C\mathrm{T1}}\dot{Z}_{\mathrm{T1}C}\dot{Z}_{\mathrm{T2T2}} - \dot{Z}_{C\mathrm{T1}}\dot{Z}_{\mathrm{T2}C}\dot{Z}_{\mathrm{T2T1}} - \\ & -\dot{Z}_{\mathrm{T1}C}\dot{Z}_{C\mathrm{T2}}\dot{Z}_{\mathrm{T2T1}} + \dot{Z}_{C\mathrm{T2}}\dot{Z}_{\mathrm{T2}C}\dot{Z}_{\mathrm{T1T1}} + \\ & +a\Big(\dot{Z}_{AB}\dot{Z}_{\mathrm{T2T1}}^2 + \dot{Z}_{CA}\dot{Z}_{\mathrm{T2T1}}^2 - \dot{Z}_{AB}\dot{Z}_{\mathrm{T1T1}}\dot{Z}_{\mathrm{T2T2}} + \\ & +\dot{Z}_{A\mathrm{T1}}\dot{Z}_{\mathrm{T1B}}\dot{Z}_{\mathrm{T2T2}} - \dot{Z}_{A\mathrm{T1}}\dot{Z}_{\mathrm{T2B}}\dot{Z}_{\mathrm{T2T2}} - \dot{Z}_{A\mathrm{T2}}\dot{Z}_{\mathrm{T1B}}\dot{Z}_{\mathrm{T2T2}} + \\ & +\dot{Z}_{A\mathrm{T2}}\dot{Z}_{\mathrm{T2B}}\dot{Z}_{\mathrm{T1T1}} - \dot{Z}_{CA}\dot{Z}_{\mathrm{T1T1}}\dot{Z}_{\mathrm{T2T2}} + \dot{Z}_{\mathrm{T1}A}\dot{Z}_{C\mathrm{T1}}\dot{Z}_{\mathrm{T2T2}} - \\ & -\dot{Z}_{\mathrm{T1}A}\dot{Z}_{C\mathrm{T2}}\dot{Z}_{\mathrm{T2T1}} - \dot{Z}_{A\mathrm{T2}}\dot{Z}_{C\mathrm{T1}}\dot{Z}_{\mathrm{T2T1}} + \dot{Z}_{\mathrm{T2}A}\dot{Z}_{C\mathrm{T1}}\dot{Z}_{\mathrm{T1T1}} + \\ & +\dot{Z}_{BC}\dot{Z}_{\mathrm{T2T1}}^2 - \dot{Z}_{BC}\dot{Z}_{\mathrm{T1T1}}\dot{Z}_{\mathrm{T2T2}} + \dot{Z}_{B\mathrm{T1}}\dot{Z}_{\mathrm{T1}C}\dot{Z}_{\mathrm{T2T2}} - \\ & -\dot{Z}_{B\mathrm{T1}}\dot{Z}_{\mathrm{T1C}}\dot{Z}_{\mathrm{T2T1}} - \dot{Z}_{B\mathrm{T2}}\dot{Z}_{\mathrm{T1}C}\dot{Z}_{\mathrm{T2T1}} + \dot{Z}_{B\mathrm{T2}}\dot{Z}_{\mathrm{T2}C}\dot{Z}_{\mathrm{T1T1}}\Big) + \\ & +a^2\Big(\dot{Z}_{BA}\dot{Z}_{\mathrm{T2T1}}^2 + \dot{Z}_{AC}\dot{Z}_{\mathrm{T2T1}}^2 + \dot{Z}_{CB}\dot{Z}_{\mathrm{T2T1}}^2 - \dot{Z}_{BA}\dot{Z}_{\mathrm{T1T1}}\dot{Z}_{\mathrm{T2T2}} - \end{aligned}$$

$$+\dot{Z}_{\mathrm{T}1A}\dot{Z}_{\mathrm{BT}1}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}2}-\dot{Z}_{\mathrm{T}1A}\dot{Z}_{\mathrm{BT}2}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}1}-\dot{Z}_{BT1}\dot{Z}_{\mathrm{T}2A}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}1}+$$
$$+\dot{Z}_{\mathrm{T}2A}\dot{Z}_{\mathrm{BT}2}\dot{Z}_{\mathrm{T}1\mathrm{T}1}-\dot{Z}_{AC}\dot{Z}_{\mathrm{T}1\mathrm{T}1}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}2}+\dot{Z}_{AT1}\dot{Z}_{\mathrm{T}1C}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}2}-$$
$$-\dot{Z}_{AT1}\dot{Z}_{\mathrm{T}1C}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}2}-\dot{Z}_{AT1}\dot{Z}_{\mathrm{T}2C}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}1}+\dot{Z}_{AT2}\dot{Z}_{\mathrm{T}1C}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}1}+$$
$$+\dot{Z}_{AT2}\dot{Z}_{\mathrm{T}2C}\dot{Z}_{\mathrm{T}1\mathrm{T}1}-\dot{Z}_{CB}\dot{Z}_{\mathrm{T}1\mathrm{T}1}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}2}+\dot{Z}_{\mathrm{T}1B}\dot{Z}_{CT1}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}2}+$$
$$+\dot{Z}_{\mathrm{T}1B}\dot{Z}_{CT2}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}1}-\dot{Z}_{CT1}\dot{Z}_{\mathrm{T}2B}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}1}+\dot{Z}_{\mathrm{T}2B}\dot{Z}_{CT2}\dot{Z}_{\mathrm{T}1\mathrm{T}1}\Big);$$

– сопротивление взаимоиндукции прямой последовательности между цепями:

$$\dot{\mathbf{Z}}_{1.I-II}=\frac{1}{3}\frac{B}{\dot{Z}^2_{\mathrm{T}2\mathrm{T}1}-\dot{Z}_{\mathrm{T}1\mathrm{T}1}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}2}};\qquad(11)$$

$$B=\dot{Z}_{Aa}\dot{Z}^2_{\mathrm{T}2\mathrm{T}1}+\dot{Z}_{Bb}\dot{Z}^2_{\mathrm{T}2\mathrm{T}1}+\dot{Z}_{Cc}\dot{Z}^2_{\mathrm{T}2\mathrm{T}1}-$$
$$-\dot{Z}_{Aa}\dot{Z}_{\mathrm{T}1\mathrm{T}1}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}2}+\dot{Z}_{AT1}\dot{Z}_{\mathrm{T}1a}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}2}-\dot{Z}_{AT1}\dot{Z}_{\mathrm{T}2a}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}1}-$$
$$-\dot{Z}_{AT2}\dot{Z}_{\mathrm{T}1a}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}1}+\dot{Z}_{AT2}\dot{Z}_{\mathrm{T}2a}\dot{Z}_{\mathrm{T}1\mathrm{T}1}-$$
$$-\dot{Z}_{Bb}\dot{Z}_{\mathrm{T}1\mathrm{T}1}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}2}+\dot{Z}_{BT1}\dot{Z}_{\mathrm{T}1B}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}2}-\dot{Z}_{BT1}\dot{Z}_{\mathrm{T}2b}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}1}-$$
$$-\dot{Z}_{BT2}\dot{Z}_{\mathrm{T}1b}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}1}+\dot{Z}_{BT2}\dot{Z}_{\mathrm{T}2b}\dot{Z}_{\mathrm{T}1\mathrm{T}1}-$$
$$-\dot{Z}_{Cc}\dot{Z}_{\mathrm{T}1\mathrm{T}1}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}2}+\dot{Z}_{CT1}\dot{Z}_{\mathrm{T}1C}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}2}-\dot{Z}_{CT1}\dot{Z}_{\mathrm{T}2c}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}1}-$$
$$-\dot{Z}_{CT2}\dot{Z}_{\mathrm{T}1c}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}1}+\dot{Z}_{CT2}\dot{Z}_{\mathrm{T}2c}\dot{Z}_{\mathrm{T}1\mathrm{T}1}+$$
$$+a\Big(\dot{Z}_{Ab}\dot{Z}^2_{\mathrm{T}2\mathrm{T}1}+\dot{Z}_{Ca}\dot{Z}^2_{\mathrm{T}2\mathrm{T}1}+\dot{Z}_{Bc}\dot{Z}^2_{\mathrm{T}2\mathrm{T}1}-$$
$$-\dot{Z}_{Ab}\dot{Z}_{\mathrm{T}1\mathrm{T}1}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}2}+\dot{Z}_{AT1}\dot{Z}_{\mathrm{T}1b}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}2}-\dot{Z}_{AT2}\dot{Z}_{\mathrm{T}1b}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}1}+$$
$$+\dot{Z}_{AT2}\dot{Z}_{\mathrm{T}2b}\dot{Z}_{\mathrm{T}1\mathrm{T}1}-\dot{Z}_{Ca}\dot{Z}_{\mathrm{T}1\mathrm{T}1}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}2}+\dot{Z}_{CT1}\dot{Z}_{\mathrm{T}1a}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}2}-$$
$$-\dot{Z}_{CT1}\dot{Z}_{\mathrm{T}2a}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}1}-\dot{Z}_{CT2}\dot{Z}_{\mathrm{T}1a}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}1}+\dot{Z}_{CT2}\dot{Z}_{\mathrm{T}2a}\dot{Z}_{\mathrm{T}1\mathrm{T}1}-$$
$$-\dot{Z}_{AT2}\dot{Z}_{\mathrm{T}1c}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}1}-\dot{Z}_{BC}\dot{Z}_{\mathrm{T}1\mathrm{T}1}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}2}+\dot{Z}_{BT1}\dot{Z}_{\mathrm{T}1c}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}2}-$$
$$-\dot{Z}_{BT2}\dot{Z}_{\mathrm{T}1c}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}1}+\dot{Z}_{BT2}\dot{Z}_{\mathrm{T}2c}\dot{Z}_{\mathrm{T}1\mathrm{T}1}\Big)+$$
$$+a^2\Big(\dot{Z}_{Ba}\dot{Z}^2_{\mathrm{T}2\mathrm{T}1}+\dot{Z}_{Ac}\dot{Z}^2_{\mathrm{T}2\mathrm{T}1}+\dot{Z}_{Cb}\dot{Z}^2_{\mathrm{T}2\mathrm{T}1}-$$
$$-\dot{Z}_{Ba}\dot{Z}_{\mathrm{T}1\mathrm{T}1}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}2}+\dot{Z}_{BT1}\dot{Z}_{\mathrm{T}1a}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}2}-\dot{Z}_{BT1}\dot{Z}_{\mathrm{T}2a}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}1}-$$
$$-\dot{Z}_{BT1}\dot{Z}_{\mathrm{T}1a}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}1}+\dot{Z}_{BT2}\dot{Z}_{\mathrm{T}2c}\dot{Z}_{\mathrm{T}1\mathrm{T}1}+\dot{Z}_{BT2}\dot{Z}_{\mathrm{T}2a}\dot{Z}_{\mathrm{T}1\mathrm{T}1}-$$
$$-\dot{Z}_{Ac}\dot{Z}_{\mathrm{T}1\mathrm{T}1}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}2}+\dot{Z}_{AT1}\dot{Z}_{\mathrm{T}1c}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}2}-\dot{Z}_{AT1}\dot{Z}_{\mathrm{T}2c}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}1}-$$
$$-\dot{Z}_{Cb}\dot{Z}_{\mathrm{T}1\mathrm{T}1}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}2}+\dot{Z}_{CT1}\dot{Z}_{\mathrm{T}1b}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}2}-\dot{Z}_{CT1}\dot{Z}_{\mathrm{T}2b}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}1}-$$
$$-\dot{Z}_{CT1}\dot{Z}_{\mathrm{T}1b}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}1}+\dot{Z}_{CT2}\dot{Z}_{\mathrm{T}2b}\dot{Z}_{\mathrm{T}1\mathrm{T}1}\Big);$$

– сопротивление прямой последовательности каждой цепи (на примере первой цепи):

$$\dot{\mathbf{Z}}_{1.I-II}=\frac{1}{3}\frac{C}{\dot{Z}^2_{\mathrm{T}2\mathrm{T}1}-\dot{Z}_{\mathrm{T}1\mathrm{T}1}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}2}};\qquad(12)$$

$$C=\dot{Z}_{AA}\dot{Z}^2_{\mathrm{T}2\mathrm{T}1}+\dot{Z}_{AB}\dot{Z}^2_{\mathrm{T}2\mathrm{T}1}+\dot{Z}_{BA}\dot{Z}^2_{\mathrm{T}2\mathrm{T}1}+\dot{Z}_{AC}\dot{Z}^2_{\mathrm{T}2\mathrm{T}1}+$$
$$+\dot{Z}_{BB}\dot{Z}^2_{\mathrm{T}2\mathrm{T}1}+\dot{Z}_{CA}\dot{Z}^2_{\mathrm{T}2\mathrm{T}1}+\dot{Z}_{BC}\dot{Z}^2_{\mathrm{T}2\mathrm{T}1}+\dot{Z}_{CB}\dot{Z}^2_{\mathrm{T}2\mathrm{T}1}+$$
$$+\dot{Z}_{CC}\dot{Z}^2_{\mathrm{T}2\mathrm{T}1}-\dot{Z}_{AA}\dot{Z}_{\mathrm{T}1\mathrm{T}1}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}2}+\dot{Z}_{\mathrm{T}1A}\dot{Z}_{AT1}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}2}-$$
$$-\dot{Z}_{AT1}\dot{Z}_{\mathrm{T}2A}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}1}-\dot{Z}_{\mathrm{T}1A}\dot{Z}_{AT2}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}1}+\dot{Z}_{AT2}\dot{Z}_{\mathrm{T}2A}\dot{Z}_{\mathrm{T}1\mathrm{T}1}-$$
$$-\dot{Z}_{AB}\dot{Z}_{\mathrm{T}1\mathrm{T}1}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}2}-\dot{Z}_{BA}\dot{Z}_{\mathrm{T}1\mathrm{T}1}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}2}+\dot{Z}_{AT1}\dot{Z}_{\mathrm{T}2B}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}2}-$$
$$-\dot{Z}_{AT1}\dot{Z}_{\mathrm{T}2B}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}1}+\dot{Z}_{\mathrm{T}1A}\dot{Z}_{BT1}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}2}-\dot{Z}_{\mathrm{T}1A}\dot{Z}_{BT2}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}1}-$$
$$-\dot{Z}_{AT2}\dot{Z}_{\mathrm{T}1B}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}1}+\dot{Z}_{AT2}\dot{Z}_{\mathrm{T}2B}\dot{Z}_{\mathrm{T}1\mathrm{T}1}-\dot{Z}_{BT1}\dot{Z}_{\mathrm{T}2A}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}1}+$$
$$+\dot{Z}_{\mathrm{T}2A}\dot{Z}_{BT2}\dot{Z}_{\mathrm{T}1\mathrm{T}1}-\dot{Z}_{AC}\dot{Z}_{\mathrm{T}1\mathrm{T}1}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}2}+\dot{Z}_{BB}\dot{Z}_{\mathrm{T}1\mathrm{T}1}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}2}-$$
$$-\dot{Z}_{CA}\dot{Z}_{\mathrm{T}1\mathrm{T}1}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}2}+\dot{Z}_{AT1}\dot{Z}_{\mathrm{T}1C}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}2}-\dot{Z}_{AT1}\dot{Z}_{\mathrm{T}2C}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}1}+$$
$$+\dot{Z}_{\mathrm{T}1A}\dot{Z}_{CT1}\dot{Z}_{\mathrm{T}1\mathrm{T}1}-\dot{Z}_{\mathrm{T}1A}\dot{Z}_{CT2}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}1}-\dot{Z}_{AT2}\dot{Z}_{\mathrm{T}1C}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}1}+$$
$$+\dot{Z}_{AT2}\dot{Z}_{\mathrm{T}2C}\dot{Z}_{\mathrm{T}1\mathrm{T}1}+\dot{Z}_{BT1}\dot{Z}_{\mathrm{T}1B}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}2}-\dot{Z}_{BT1}\dot{Z}_{\mathrm{T}2B}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}1}-$$
$$-\dot{Z}_{\mathrm{T}1B}\dot{Z}_{BT2}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}1}-\dot{Z}_{\mathrm{T}2A}\dot{Z}_{CT1}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}1}+\dot{Z}_{\mathrm{T}2A}\dot{Z}_{CT2}\dot{Z}_{\mathrm{T}1\mathrm{T}1}+$$
$$+\dot{Z}_{BT2}\dot{Z}_{\mathrm{T}1B}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}2}-\dot{Z}_{BT1}\dot{Z}_{\mathrm{T}2B}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}1}-\dot{Z}_{\mathrm{T}1B}\dot{Z}_{BT2}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}1}-$$
$$-\dot{Z}_{\mathrm{T}2A}\dot{Z}_{CT1}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}1}+\dot{Z}_{\mathrm{T}2A}\dot{Z}_{CT2}\dot{Z}_{\mathrm{T}1\mathrm{T}1}+\dot{Z}_{BT2}\dot{Z}_{\mathrm{T}2B}\dot{Z}_{\mathrm{T}1\mathrm{T}1}-$$
$$-\dot{Z}_{BC}\dot{Z}_{\mathrm{T}1\mathrm{T}1}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}2}-\dot{Z}_{CB}\dot{Z}_{\mathrm{T}1\mathrm{T}1}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}2}+\dot{Z}_{BT1}\dot{Z}_{\mathrm{T}1C}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}2}-$$
$$-\dot{Z}_{BT1}\dot{Z}_{\mathrm{T}2C}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}1}+\dot{Z}_{\mathrm{T}1B}\dot{Z}_{CT1}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}2}+\dot{Z}_{\mathrm{T}1B}\dot{Z}_{CT2}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}1}-$$
$$-\dot{Z}_{BT2}\dot{Z}_{\mathrm{T}1C}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}1}+\dot{Z}_{BT2}\dot{Z}_{\mathrm{T}2C}\dot{Z}_{\mathrm{T}1\mathrm{T}1}-\dot{Z}_{CT1}\dot{Z}_{\mathrm{T}2B}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}1}+$$
$$+\dot{Z}_{\mathrm{T}2B}\dot{Z}_{CT2}\dot{Z}_{\mathrm{T}1\mathrm{T}1}-\dot{Z}_{CC}\dot{Z}_{\mathrm{T}1\mathrm{T}1}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}2}+\dot{Z}_{CT1}\dot{Z}_{\mathrm{T}1C}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}2}-$$
$$-\dot{Z}_{CT1}\dot{Z}_{\mathrm{T}2C}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}1}-\dot{Z}_{\mathrm{T}1C}\dot{Z}_{CT2}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}2}+\dot{Z}_{CT2}\dot{Z}_{\mathrm{T}2C}\dot{Z}_{\mathrm{T}1\mathrm{T}1};$$

– сопротивление взаимоиндукции нулевой последовательности между цепями:

$$\dot{\mathbf{Z}}_{1.I-II}=\frac{1}{3}\frac{D}{\dot{Z}^2_{\mathrm{T}2\mathrm{T}1}-\dot{Z}_{\mathrm{T}1\mathrm{T}1}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}2}};\qquad(13)$$

$$D=\dot{Z}_{Aa}\dot{Z}^2_{\mathrm{T}2\mathrm{T}1}+\dot{Z}_{Ab}\dot{Z}^2_{\mathrm{T}2\mathrm{T}1}+\dot{Z}_{BA}\dot{Z}^2_{\mathrm{T}2\mathrm{T}1}+\dot{Z}_{Ac}\dot{Z}^2_{\mathrm{T}2\mathrm{T}1}+$$
$$+\dot{Z}_{Bb}\dot{Z}^2_{\mathrm{T}2\mathrm{T}1}+\dot{Z}_{Ca}\dot{Z}^2_{\mathrm{T}2\mathrm{T}1}+\dot{Z}_{Bc}\dot{Z}^2_{\mathrm{T}2\mathrm{T}1}+\dot{Z}_{Cb}\dot{Z}^2_{\mathrm{T}2\mathrm{T}1}+$$
$$+\dot{Z}_{Cc}\dot{Z}^2_{\mathrm{T}2\mathrm{T}1}-\dot{Z}_{Aa}\dot{Z}_{\mathrm{T}1\mathrm{T}1}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}2}+\dot{Z}_{AT1}\dot{Z}_{\mathrm{T}1a}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}2}-$$
$$-\dot{Z}_{AT1}\dot{Z}_{\mathrm{T}2a}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}1}-\dot{Z}_{\mathrm{T}1a}\dot{Z}_{AT2}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}1}+\dot{Z}_{AT2}\dot{Z}_{\mathrm{T}2a}\dot{Z}_{\mathrm{T}1\mathrm{T}1}-$$
$$-\dot{Z}_{Ab}\dot{Z}_{\mathrm{T}1\mathrm{T}1}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}2}-\dot{Z}_{Ba}\dot{Z}_{\mathrm{T}1\mathrm{T}1}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}2}+\dot{Z}_{AT1}\dot{Z}_{\mathrm{T}1b}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}2}-$$
$$-\dot{Z}_{AT1}\dot{Z}_{\mathrm{T}2b}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}1}-\dot{Z}_{AT2}\dot{Z}_{\mathrm{T}1b}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}1}+\dot{Z}_{AT2}\dot{Z}_{\mathrm{T}2b}\dot{Z}_{\mathrm{T}1\mathrm{T}1}+$$
$$+\dot{Z}_{BT1}\dot{Z}_{\mathrm{T}1a}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}2}-\dot{Z}_{BT1}\dot{Z}_{\mathrm{T}2a}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}1}-\dot{Z}_{CT1}\dot{Z}_{\mathrm{T}2a}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}1}-$$
$$-\dot{Z}_{\mathrm{T}2a}\dot{Z}_{BT2}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}1}+\dot{Z}_{BT2}\dot{Z}_{\mathrm{T}2a}\dot{Z}_{\mathrm{T}1\mathrm{T}1}-\dot{Z}_{Ac}\dot{Z}_{\mathrm{T}1\mathrm{T}1}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}2}-$$
$$-\dot{Z}_{Bb}\dot{Z}_{\mathrm{T}1\mathrm{T}1}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}2}-\dot{Z}_{Ca}\dot{Z}_{\mathrm{T}1\mathrm{T}1}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}2}+\dot{Z}_{AT1}\dot{Z}_{\mathrm{T}1c}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}2}-$$
$$-\dot{Z}_{AT1}\dot{Z}_{\mathrm{T}1c}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}1}-\dot{Z}_{AT2}\dot{Z}_{\mathrm{T}1c}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}1}+\dot{Z}_{AT2}\dot{Z}_{\mathrm{T}2c}\dot{Z}_{\mathrm{T}1\mathrm{T}1}+$$
$$+\dot{Z}_{BT1}\dot{Z}_{\mathrm{T}1b}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}2}+\dot{Z}_{AT1}\dot{Z}_{\mathrm{T}1c}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}2}-\dot{Z}_{BT1}\dot{Z}_{\mathrm{T}2b}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}1}-$$
$$-\dot{Z}_{\mathrm{T}1b}\dot{Z}_{BT2}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}1}+\dot{Z}_{\mathrm{T}1b}\dot{Z}_{BT2}\dot{Z}_{\mathrm{T}1\mathrm{T}1}+\dot{Z}_{\mathrm{T}1a}\dot{Z}_{CT1}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}2}-$$
$$-\dot{Z}_{CT2}\dot{Z}_{\mathrm{T}1a}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}2}-\dot{Z}_{CT1}\dot{Z}_{\mathrm{T}2a}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}1}-\dot{Z}_{\mathrm{T}1a}\dot{Z}_{CT2}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}1}+$$
$$+\dot{Z}_{\mathrm{T}2a}\dot{Z}_{CT2}\dot{Z}_{\mathrm{T}1\mathrm{T}1}-\dot{Z}_{Bc}\dot{Z}_{\mathrm{T}1\mathrm{T}1}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}2}-\dot{Z}_{Cb}\dot{Z}_{\mathrm{T}1\mathrm{T}1}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}2}+$$
$$+\dot{Z}_{BT1}\dot{Z}_{\mathrm{T}1c}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}2}-\dot{Z}_{BT1}\dot{Z}_{\mathrm{T}2c}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}1}-\dot{Z}_{BT2}\dot{Z}_{\mathrm{T}1c}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}1}+$$
$$+\dot{Z}_{BT2}\dot{Z}_{\mathrm{T}2c}\dot{Z}_{\mathrm{T}1\mathrm{T}1}+\dot{Z}_{\mathrm{T}1b}\dot{Z}_{CT1}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}2}-\dot{Z}_{\mathrm{T}2b}\dot{Z}_{CT1}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}1}-$$
$$-\dot{Z}_{\mathrm{T}1b}\dot{Z}_{CT2}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}1}+\dot{Z}_{CT2}\dot{Z}_{\mathrm{T}2b}\dot{Z}_{\mathrm{T}1\mathrm{T}1}-\dot{Z}_{Cc}\dot{Z}_{\mathrm{T}1\mathrm{T}1}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}2}+$$
$$+\dot{Z}_{\mathrm{T}1c}\dot{Z}_{CT1}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}2}-\dot{Z}_{CT1}\dot{Z}_{\mathrm{T}2c}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}1}-\dot{Z}_{CT2}\dot{Z}_{\mathrm{T}1c}\dot{Z}_{\mathrm{T}2\mathrm{T}1}.$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены расчётные выражения для определения собственного и взаимного сопротивления двухцепной линии электропередачи с двумя грозозащитными тросами, основанная на сочетании методов фазных координат и симметричных составляющих, позволяющая выполнять расчеты параметров режима однофазного короткого замыкания на линии электропередачи с целью дистанционного определения места повреждения без излишнего усложнения схемы замещения электрической сети и отличающаяся возможностью учета несимметрии расположения проводящих элементов на опоре, что актуально для нетранспонированных ЛЭП в системах промышленного электроснабжения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Safar H. Power transmission line analysis using exact, nominal π, and modified π models // 2010 The 2nd International Conference on Computer and Automation Engineering, ICCAE 2010. IEEE, 2010. Vol. 5. Pp. 128-134. doi: 10.1109/ICCAE.2010.5451500
2. Ebrahimi R., Babaee A., Hoseynpoor M. Evaluation and calculation of overhead line impedance in distribution networks // Australian Journal of Basic and Applied Sciences. 2011. Vol. 5. No. 8. Pp. 1278-1284.
3. Tossani F., Napolitano F., Borghetti A. Inverse Laplace Transform of the Ground Impedance Matrix of Overhead Lines // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2018. Vol. 60. No. 6. Pp. 1-4. doi: 10.1109/TEMC.2017.2765207
4. Ametani A., Schinzinger R. Mutual Impedance of Transmission Lines with Earth Return // IEEE Proceedings C: Generation Transmission and Distribution. 1980. Vol. 127. No. 5. Pp. 326-328. doi: 10.1049/ip-c.1980.0050
5. Holbeck J.I., Lantz M.J., Holbeck J.I. The Effects of Mutual Induction Between Parallel Transmission Lines on Current Flow to Ground Faults // Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. 1943. Vol. 62. No. 11. Pp. 712-715. doi: 10.1109/T-AIEE.1943.5058634
6. Ukraintsev A.V., Nagay I.V. Virtual' power line method to correct the calculation of current ground faults in the parallel overhead transmission lines 110-220 kV // 2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2016 – Proceedings. IEEE, 2016. Pp. 1-4. doi: 10.1109/ICIEAM.2016.7911473
7. Fang H. Mutual inductances between crossing three-phase power lines and communication line both with earth return // IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. IEEE, 1990. Pp. 483-487. doi: 10.1109/isemc.1990.252814
8. Tavares M.C., Pissolato J., Portela C.M. New multiphase transmission line model // Proceedings of International Conference on Harmonics and Quality of Power, ICHQP. IEEE, 1998. Vol. 1. Pp. 489-494. doi: 10.1109/ICHQP.1998.759957
9. Ivanov I., Dubinin D., Zhukov A. Overhead Line Parameter Estimation Through Synchrophasor Data in Near Real-Time // 2019 2nd International Youth Scientific and Technical Conference on Relay Protection and Automation, RPA 2019. IEEE, 2019. doi: 10.1109/RPA47751.2019.8958451
10. Balametov A.B., Halilov E.D., Isayeva T.M. An Adequate Mathematical Model of an Ultrahigh-Voltage Overhead Transmission Line Using Synchronized Phasor Measurements // Iranian Journal of Science and Technology - Transactions of Electrical Engineering, 2020. Vol. 44. No. 1. Pp. 1-9. doi: 10.1007/s40998-019-00225-3
11. V Stanojevic A., Preston G., Terzija V. Synchronised measurements based algorithm for long transmission line fault analysis // IEEE Transactions on Smart Grid, 2018. Vol. 9. No. 5. Pp. 1-10. doi: 10.1109/TSG.2017.2658675
12. Kubis A., Rehtanz C. Application of a combined electro-thermal overhead line model in power flow and time-domain power system simulations // IET Generation, Transmission and Distribution, 2017. Vol. 11. No. 8. doi: 10.1049/iet-gtd.2016.1626
13. Martínez-Velasco J.A., Castro-Aranda F. Modeling of Overhead Transmission Lines for Lightning Overvoltage Calculations // Ingeniare. Revista chilena de ingeniería, 2010. Vol. 18. No. 1. doi: 10.4067/s0718-33052010000100013
14. Ye H., Strunz K. Multi-Scale and Frequency-Dependent Modeling of Electric Power Transmission Lines // IEEE Transactions on Power Delivery, 2018. Vol. 33. No. 1. Pp. 32-41. doi: 10.1109/TPWRD.2016.2630338
15. Freitas D., Guerreiro M., Neves Das, Almeida M.E., Maló Machado V. Evaluation of the longitudinal parameters of an overhead transmission line with non-homogeneous cross section // Electric Power Systems Research, 2015. Vol. 119. Pp. 478-484. doi: 10.1016/j.epsr.2014.11.003
16. Qi G., Zheng Y., Xia K., Wu W., Liao F., Shu S. Equivalent Circuit Parameters of Power Tap-Off from Insulated Shield Wires of High Voltage Transmission Lines at Different Rated Voltages // ICHVE 2018 - 2018 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application. IEEE, 2019. Pp. 1-4. doi: 10.1109/ICHVE.2018.8642003
17. Dias Pinto J.A., Coimbra A.P., Pereirinha P.G., Lemos Antunes C.F. Evaluation of the high voltage transmission line inductance and capacitance using the finite element approach // COMPEL - The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, 1998. Vol. 17. No. 1–3. Pp. 313-317. doi: 10.1108/03321649810203224
18. Murty P.S.R. The Line Parameters // Electrical Power Systems, 2017.
19. Панова Е.А., Альбрехт А.Я. Уточненные удельные электрические параметры двухцепных ЛЭП 110 кВ для дистанционного определения места повреждения // Электротехнические системы и комплексы. 2016. №4 (33). С. 35-40. doi: 10.18503 / 2311-8318-2016-4 (33) -35-40
20. Руководящие указания по релейной защите. Вып. 11. Расчет токов короткого замыкания для релейной защиты и системной автоматики в сетях 110-750 кВ. М.: Энергия, 1979. 152 с.

Поступила в редакцию 25 марта 2022 г.

INFORMATION IN ENGLISH

COMBINED EQUIVALENT CIRCUIT OF A DOUBLE-CIRCUIT POWER TRANSMISSION LINE WITH TWO LIGHTNING CABLES

Evgeniya A. Panova

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Department of Electric Power Supply of Industrial Enterprises, Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, Electrical Power Engineering Department, Tobolsk Industrial Institute, Tobolsk Branch of the Industrial University of Tyumen, Tobolsk, Russia. ea.panova@magtu.ru, https://orcid.org/0000-0001-9392-3346

Regina R. Sabirova

Student, Department of Electric Power Supply of Industrial Enterprises, Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Ivan V. Novikov

Student, Department of Electric Power Supply of Industrial Enterprises, Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

The paper proposes a combined equivalent circuit for a double-circuit power line with two lightning protection cables, based on a combination of phase coordinate and symmetrical components methods. The proposed approach to modeling power transmission lines allows introduction of the mutual arrangement of conductive elements on the tower (wires and lightning protection cables), including asymmetrical relative to each other. In addition, by combining the method of phase coordinates with the method of symmetrical components, the equivalent circuit as a whole and the process of preparing the initial data are simplified. The use of a combined equivalent circuit for power transmission lines makes it possible to calculate the unbalanced mode by the method of symmetrical components, while all elements, except for high voltage transmission lines, are modeled by the parameters of direct, reverse and zero sequence, and power lines are modeled in phase coordinates. The proposed PTL model is focused on performing calculations of the parameters of the single-phase short circuit mode in the 110-220 kV network of the industrial power supply system in order to remotely locate of the line fault.

Keywords: power line, phase coordinates, symmetrical components, mutual induction, ground wire.

REFERENCES

1. Safar H. Power transmission line analysis using exact, nominal π, and modified π models. 2010 The 2nd International Conference on Computer and Automation Engineering, ICCAE 2010. IEEE, 2010, vol. 5, pp. 128-134. doi: 10.1109/ICCAE.2010.5451500
2. Ebrahimi R., Babaee A., Hoseynpoor M. Evaluation and calculation of overhead line impedance in distribution networks. Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 2011, vol. 5, no. 8, pp. 1278-1284.
3. Tossani F., Napolitano F., Borghetti A. Inverse Laplace Transform of the Ground Impedance Matrix of Overhead Lines. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2018, vol. 60, no. 6, pp. 1-4. doi: 10.1109/TEMC.2017.2765207
4. Ametani A., Schinzinger R. Mutual Impedance of Transmission Lines with Earth Return. IEEE Proceedings C: Generation Transmission and Distribution, 1980, vol. 127, no. 5, pp. 326-328. doi: 10.1049/ip-c.1980.0050
5. Holbeck J.I., Lantz M.J., Holbeck J.I. The Effects of Mutual Induction Between Parallel Transmission Lines on Current Flow to Ground Faults. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, 1943, vol. 62, no. 11, pp. 712-715. doi: 10.1109/T-AIEE.1943.5058634
6. Ukraintsev A.V., Nagay I.V. Virtual' power line method to correct the calculation of current ground faults in the parallel overhead transmission lines 110-220 kV. 2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2016 – Proceedings. IEEE, 2016, pp. 1-4. doi: 10.1109/ICIEAM.2016.7911473
7. Fang H. Mutual inductances between crossing three-phase power lines and communication line both with earth return. IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. IEEE, 1990, pp. 483-487. doi: 10.1109/isemc.1990.252814
8. Tavares M.C., Pissolato J., Portela C.M. New multiphase transmission line model. Proceedings of International Conference on Harmonics and Quality of Power, ICHQP. IEEE, 1998, vol. 1, pp. 489-494. doi: 10.1109/ICHQP.1998.759957
9. Ivanov I., Dubinin D., Zhukov A. Overhead Line Parameter Estimation Through Synchrophasor Data in Near Real-Time. 2019 2nd International Youth Scientific and Technical Conference on Relay Protection and Automation, RPA 2019. IEEE, 2019. doi: 10.1109/RPA47751.2019.8958451
10. Balametov A.B., Halilov E.D., Isayeva T.M. An Adequate Mathematical Model of an Ultrahigh-Voltage Overhead Transmission Line Using Synchronized Phasor Measurements. Iranian Journal of Science and Technology - Transactions of Electrical Engineering, 2020, vol. 44, no. 1, pp. 1-9. doi: 10.1007/s40998-019-00225-3
11. V Stanojevic A., Preston G., Terzija V. Synchronised measurements based algorithm for long transmission line fault analysis. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, vol. 9, no. 5, pp. 1-10. doi: 10.1109/TSG.2017.2658675
12. Kubis A., Rehtanz C. Application of a combined electrothermal overhead line model in power flow and time-domain power system simulations. IET Generation, Transmission and Distribution, 2017, vol. 11, no. 8. doi: 10.1049/iet-gtd.2016.1626
13. Martínez-Velasco J.A., Castro-Aranda F. Modeling of Overhead Transmission Lines for Lightning Overvoltage Calculations. Ingeniare. Revista chilena de ingeniería, 2010, vol. 18, no. 1. doi: 10.4067/s0718-33052010000100013
14. Ye H., Strunz K. Multi-Scale and Frequency-Dependent Modeling of Electric Power Transmission Lines. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, vol. 33, no. 1, pp. 32-41. doi: 10.1109/TPWRD.2016.2630338
15. Freitas D., Guerreiro M., Neves Das, Almeida M.E., Maló Machado V. Evaluation of the longitudinal parameters of an overhead transmission line with non-homogeneous cross section. Electric Power Systems Research, 2015, vol. 119, pp. 478-484. doi: 10.1016/j.epsr.2014.11.003
16. Qi G., Zheng Y., Xia K., Wu W., Liao F., Shu S. Equivalent Circuit Parameters of Power Tap-Off from Insulated Shield Wires of High Voltage Transmission Lines at Different Rated Voltages. ICHVE 2018 - 2018 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application. IEEE, 2019, pp. 1-4. doi: 10.1109/ICHVE.2018.8642003
17. Dias Pinto J.A., Coimbra A.P., Pereirinha P.G., Lemos Antunes C.F. Evaluation of the high voltage transmission line inductance and capacitance using the finite element approach. COMPEL - The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, 1998, vol. 17, no. 1–3, pp. 313-317. doi: 10.1108/03321649810203224
18. Murty P.S.R. The Line Parameters. Electrical Power Systems, 2017.
19. Panova E.A., Al'brekht A.Ya. Specified Per-unit Parameters of Double-circuit 110 kV Overhead Lines for Distant Fault Location. *Elektrotekhnicheskie sistemy ikompleksy* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2016, no. 4(33), pp. 35-40. (In Russian). doi: 10.18503/2311-8318-2016-4(33)-35-40
20. *Rukovodyashchie ukazaniya po releynoy zashchite. Vyp. 11. Raschet tokov korotkogo zamykaniya dlya releynoy zashchity i sistemnoy avtomatiki v setyakh 110-750 kV* [Relay protection guidelines. Issue 11. Calculation of short-circuit currents for relay protection and system automation in 110-750 kV networks], Moscow, Energiya Publ., 1979. 152 p. (In Russian)

Панова Е.А., Сабирова Р.Р., Новиков И.В. Комбинированная схема замещения двухцепной ЛЭП с двумя грозотросами // Электротехнические системы и комплексы. 2022. № 2(55). С. 77-81. https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-2(55)-77-81

Panova E.A., Sabirova R.R., Novikov I.V. Combined Equivalent Circuit of a Double-Circuit Power Transmission Line with Two Lightning Cables. *Elektrotekhnicheskie sistemy i kompleksy* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2022, no. 2(55), pp. 77-81. (In Russian). https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-2(55)-77-81

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Абдулвелеев Ильдар Равильевич – канд. техн. наук, доцент, кафедра электроснабжения промышленных предприятий, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия, i.abdulveleev@magtu.ru, https://orcid.org/0000-0003-2748-6533

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

Бочкарев Алексей Андреевич – студент, кафедра автоматизированного электропривода и мехатроники, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия, analogsynth@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-8834-2384

Бузикаева Алина Валерьевна – аспирант, кафедра электропривода и автоматизации промышленных установок, Комсомольский-на-Амуре государственный университет, Комсомольск-на-Амуре, Россия, alina200954@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-7181-6435

Букреев Виктор Григорьевич – д-р техн. наук, профессор, инженерная школа энергетики, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия, shandarovaelena@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-9861-9765

Быстров Евгений Андреевич – аспирант, инженерная школа энергетики, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия, bystrov-evgen@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-1829-6845

Валиев Рустам Талгатович – канд. техн. наук, доцент, кафедра автоматизированных электрических систем, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия, https://orcid.org/0000-0002-8603-3246

Варганова Александра Владимировна – канд. техн. наук, доцент, кафедра электроэнергетики, Тюменский индустриальный университет, филиал ТИУ в Тобольске, Тобольск, Россия, aleksandra-khlamova@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0003-4675-7511

Газизова Ольга Викторовна – канд. техн. наук, доцент, кафедра электроснабжения промышленных предприятий, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия, кафедра электроэнергетики, Тюменский индустриальный университет, филиал ТИУ в Тобольске, Тобольск, Россия, logan_b_7@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-9416-672X

Дубовик Михаил Евгеньевич – аспирант, кафедра электропривода и автоматизации промышленных установок, Комсомольский-на-Амуре государственный университет, Комсомольск-на-Амуре, Россия, mihail.dubovik@bk.ru, https://orcid.org/0000-0002-7092-1409

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

Жуковский Юрий Леонидович – канд. техн. наук, доцент, учебно-научный центр цифровых технологий, Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия, Zhukovskiy_yul@pers.spmi.ru, https://orcid.org/0000-0003-0312-0019

Корнилов Геннадий Петрович – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой, кафедра электроснабжения промышленных предприятий, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия, korn_mgn@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-2451-3850

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

Котелева Наталья Ивановна – канд. техн. наук, доцент, кафедра автоматизации технологических процессов и производств, Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия, nkot06@inbox.ru, https://orcid.org/0000-0002-5970-4534

Лыгин Максим Михайлович – аспирант, кафедра электроснабжения промышленных предприятий, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия, eligin@ya.ru, https://orcid.org/0000-0001-8884-4846

Мещеряков Виктор Николаевич – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой, кафедра электропривода, Липецкий государственный технический университет, Липецк, Россия, mesherek@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0003-0984-5133

Новиков Иван Витальевич – студент, кафедра электроснабжения промышленных предприятий, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.

Новоселов Виктор Иванович – канд. физ.-мат. наук, доцент, кафедра электроэнергетики, Тюменский индустриальный университет, Тобольский индустриальный институт (филиал), Тобольск, Россия, novoselov-vi@tyuiu.ru, https:// orcid.org/0000-0001-8342-4279

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

Панова Евгения Александровна – канд. техн. наук, доцент, кафедра электроснабжения промышленных предприятий, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнито-

горск, Россия, кафедра электроэнергетики, Тюменский индустриальный университет, филиал ТИУ в Тобольске, Тобольск, Россия, ea.panova@magtu.ru, https://orcid.org/0000-0001-9392-3346

Парсункин Борис Николаевич – д-р техн. наук, профессор, кафедра автоматизированных систем управления, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия, promkim@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-1822-2632

Перевощиков Филипп Владимирович – магистрант, инженерная школа энергетики, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия, fvp2@tpu.ru, https://orcid.org/0000-0002-7932-2744

Пугачев Александр Анатольевич – д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой, кафедра промышленной электроники и электротехники, Брянский государственный технический университет, Брянск, Россия, alexander-pugachev@rambler.ru, https://orcid.org/0000-0002-1836-0923

Сабирова Регина Радиковна – студент, кафедра электроснабжения промышленных предприятий, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.

Сенцов Евгений Викторович – аспирант, кафедра электропривода, Липецкий государственный технический университет, Липецк, Россия, evgenysentsov@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0002-8383-5139

Соловьев Вячеслав Алексеевич – д-р техн. наук, профессор, кафедра электропривода и автоматизации промышленных установок, Комсомольский-на-Амуре государственный университет, Комсомольск-на-Амуре, Россия, https://orcid.org/0000-0001-7930-0601

Сухоносова Татьяна Геннадьевна – старший преподаватель, кафедра автоматизированных систем управления, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия, tgobuhova@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-1024-1612

Сухоруков Сергей Иванович – канд. техн. наук, доцент, кафедра электропривода и автоматизации промышленных установок, Комсомольский-на-Амуре государственный университет, Комсомольск-на-Амуре, Россия, sukhorukov@knastu.ru, https://orcid.org/0000-0003-1522-3517

Черный Сергей Петрович – канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой, кафедра электропривода и автоматизации промышленных установок, Комсомольский-на-Амуре государственный университет, Комсомольск-на-Амуре, Россия, kepapu@knastu.ru, https://orcid.org/0000-0002-8410-7985

Чуприна Николай Валентинович – аспирант, ассистент, кафедра промышленной электроники и электротехники, Брянский государственный технический университет, Брянск, Россия, nikochuprina212@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0001-8915-0926

Шандарова Елена Борисовна – канд. техн. наук, доцент, инженерная школа энергетики, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия, shandarovaelena@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-7473-277

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 26.03.2019 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.

По состоянию Перечня на 01.02.2022 г. журнал публикует работы по следующим научным специальностям:

05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты (технические науки);
05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы (технические науки);
05.09.10 – Электротехнология (технические науки);
05.09.12 – Силовая электроника (технические науки);
05.13.05 – Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления (технические науки);
05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы (технические науки)
05.14.04 – Промышленная теплоэнергетика (технические науки).
1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки)
2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации (технические науки)
2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (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.

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 26.03.2019 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.

По состоянию Перечня на 01.02.2022 г. журнал публикует работы по следующим научным специальностям:

05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты (технические науки);
05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы (технические науки);
05.09.10 – Электротехнология (технические науки);
05.09.12 – Силовая электроника (технические науки);
05.13.05 – Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления (технические науки);
05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы (технические науки)
05.14.04 – Промышленная теплоэнергетика (технические науки).
1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки)
2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации (технические науки)
2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (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.