

— ЭлСиК —

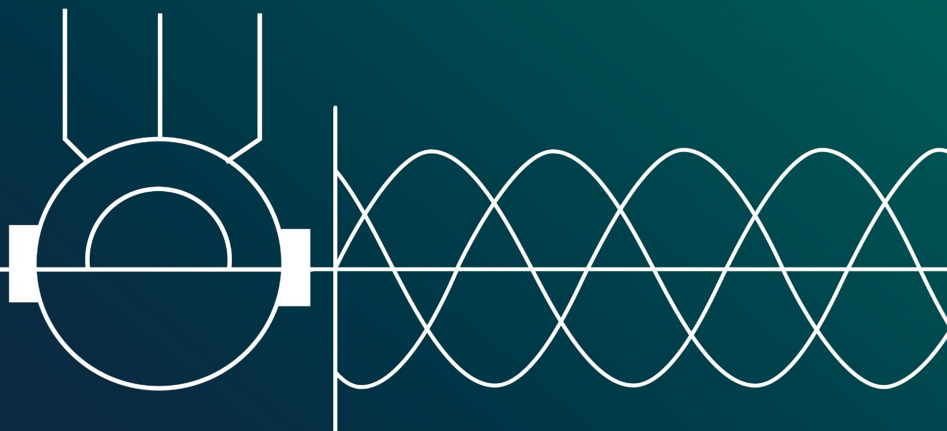
ISSN 2311-8318

ISSN (online) 2658-3151

ЭЛЕКТРО- ТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

№ 1(54)

2022 г.



СЕРГЕЙ ИВАНОВИЧ ЛУКЬЯНОВ

24 марта 2022 г. скоропостижно скончался профессор, доктор технических наук Сергей Иванович Лукьянов – профессор кафедры электроники и микроэлектроники Магнитогорского государственного технического университета.

С.И. Лукьянов родился 16 октября 1954 г. в городе Магнитогорске. Его профессиональное образование и трудовая деятельность всегда были связаны с Магнитогорским техническим университетом. В 1972 г., успешно закончив среднюю школу, он поступил на энергетический факультет Магнитогорского горно-металлургического института по специальности «Электропривод и автоматизация промышленных установок», который закончил с отличием в 1977 г. С 1977 по 1981 гг. работал в должностях научного сотрудника, а затем ассистента кафедры электротехники.

С 1981 по 1984 гг. С.И. Лукьянов обучался в очной аспирантуре Московского энергетического института (МЭИ) и в 1984 г. защитил кандидатскую диссертацию на тему «Разработка электропривода вертикальных валков слябинга 1150 с ограничением динамических нагрузок». После обучения в аспирантуре С.И. Лукьянов вернулся в МГМИ на должность ассистента кафедры электротехники.

С 1985 по 2000 гг. беспрерывно работал в должностях старшего преподавателя, а затем доцента кафедры электротехники и промышленной электроники (впоследствии электроники и микроэлектроники). В этот период помимо преподавательской деятельности С.И. Лукьянов в составе научной группы активно занимался научно-исследовательской работой, связанной с автоматизацией прокатного производства. А начиная с 1997 г., основной темой научных исследовательских работ С.И. Лукьянова стала автоматизация электропривода машин непрерывного литья заготовок. Результаты научно-исследовательской деятельности С.И. Лукьянова и его аспирантов получили внедрение на машинах непрерывного литья заготовок Магнитогорского металлургического комбината.

В 2003 г. С.И. Лукьянов в Московском энергетическом институте защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук на тему «Оптимизация электропривода тянущеправильного устройства по критерию качества непрерывнолитых заготовок». В 2004 г. ему было присвоено ученое звание профессора. В 2008 г. С.И. Лукьянов был избран членом-корреспондентом Академии электротехнических наук Российской Федерации.

С 2007 по 2013 гг. С.И. Лукьянов был назначен проректором по инновационным технологиям и инвестициям. С 2013 по 2020 гг. занимал должность директора института энергетики и автоматизированных систем, совмещая ее с должностью заведующего кафедрой электроники и микроэлектроники и продолжая преподавать на своей кафедре в должности профессора. При этом С.И. Лукьянов никогда не забывал о своей научной деятельности. Он является автором более 300 научных трудов, авторских свидетельств и патентов. Научным направлением, развиваемым под руководством С.И. Лукьянова, явились разработка систем мониторинга, диагностирования и управления металлургическими агрегатами и процессами.

Несмотря на огромную занятость на высоких должностях, Сергей Иванович всегда оставался преподавателем, оставался Учителем. Под его руководством защищено тринадцать диссертаций на соискание учёных степеней. Значительная часть сотрудников кафедры электроники и микроэлектроники являются его учениками. Сергей Иванович обладал непререкаемым авторитетом, он был отличным руководителем, мудрым наставником и отзывчивым человеком. Память о Сергее Ивановиче Лукьянове навсегда останется в сердцах его родных и друзей, коллег и учеников.

*Коллектив МГТУ, Института энергетики
и автоматизированных систем, кафедры электроники
и микроэлектроники*



Уважаемые коллеги!

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

Журнал основан в 1996 г. 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 г., «Электротехнические системы и комплексы» выпускается как журнал с периодичностью четыре номера в год.

С 26.03.2019 г. журнал входит в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук.

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.

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

ИЗДАЕТСЯ С ЯНВАРЯ 1996 Г.

№ 1(54), МАРТ 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

Председатель редакционной коллегии:

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

Главный редактор:

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

Ответственный редактор:

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

Секция теории и практики автоматизированного электропривода:

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

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

Н.Ф. Джазаров – 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, ЛПТУ,
г. Липецк, Россия.

Секция электроснабжения:

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

И.Ю. Андрияшин – канд. техн. наук,
ПАО «ММК», г. Магнитогорск, Россия.

Секции промышленной электроники, автоматики и систем управления; информационного, математического и программного обеспечения технических систем:

О.С. Логанова – 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. Ишиметьев – 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;

А.Л. Карякин – с.н.с., д-р техн. наук,
УГТУ, г. Екатеринбург, 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.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. Храмина – 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 28.03.2022. Заказ 79. Тираж 500 экз.
Цена свободная.

ELECTROTECHNICAL SYSTEMS AND COMPLEXES

PUBLISHED SINCE JAN., 1996

NO. 1(54), MARCH, 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

Head of the Editorial Board:

S.I. Luk'yanov – Professor, D.Sc. (Engineering),
NMSTU, Magnitogorsk, Russia.

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;

I.Yu. Andryushin – Ph.D. (Engineering),
MMK PJSC, Magnitogorsk, 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;

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

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

Section of Monitoring, Diagnostics and Control of Electric Equipment:

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: 28.03.2022. Order 79. Circulation: 500.
Open price.

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА.....	4
<i>Линьков С.А., Малахов О.С.</i> Сенсорное управление шаговым двигателем с программной фильтрацией канала задания угла поворота вала.....	4
<i>Белоусов А.С., Мещерыков В.Н., Баранов Д.С.</i> Моделирование системы управления электропривода намоточного станка для последующей наладки	11
<i>Амангалиев Е.З., Сарваров А.С., Косматов В.И., Петушков М.Ю., Омельченко Е.Я.</i> Электромобильный и гибридный транспорт: силовые схемы, оборудование, проблемы и перспективы развития	19
<i>Шохин В.В., Храмшин В.Р., Корнилов Г.П., Пермякова О.В.</i> Моделирование системы векторного управления асинхронным двигателем с преобразованием координат электропривода.....	29
ЭЛЕКТРО- И ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА	38
<i>Сафаралиев М.Х., Матренин П.В., Дмитриев С.А., Ахьеев Дж.С., Кокин С.Е.</i> Адаптивные ансамблевые модели для среднесрочного прогнозирования выработки электроэнергии гидроэлектростанциями в изолированных энергосистемах с учётом изменений температуры.....	38
<i>Сенюк М.Д., Дмитриева А.А.</i> Апробация алгоритма анализа динамической устойчивости и противоаварийного управления режимом синхронного генератора на многомашинной модели энергосистемы	46
<i>Газизова О.В., Панова Е.А., Кий А.В., Патшин Н.Т.</i> Анализ возможности неполнофазной работы автотрансформаторной группы узлов подстанции 500/220/110 кВ.....	54
ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ	62
<i>Дунаев М.П., Гладышев М.А., Арсентьев М.О.</i> Анализ влияния отклоняющей системы на плазмообразование установки плазменного упрочнения бандажей колесных пар.....	62
ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА, АВТОМАТИКА И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ	68
<i>Парсункин Б.Н., Андреев С.М., Самарина И.Г.</i> Автоматизированное энергосберегающее управление сжиганием смешанного газа в проходных печах листопрокатных станов	68
СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ	75

CONTENT

THEORY AND PRACTICE OF AUTOMATED ELECTRIC DRIVE.....	4
<i>Linkov S.A., Malakhov O.S.</i> Stepper Motor Sensor Control with Program Filtering of the Shaft Rotation Angle Reference Channel.....	4
<i>Belousov A.S., Meshcheryakov V.N., Baranov D.S.</i> Simulation of Winding Machine Electric Drive Control System for Subsequent Adjustment	11
<i>Amangaliyev E.Z., Sarvarov A.S., Kosmatov V.I., Petushkov M.Yu., Omelchenko E.Ya.</i> Electric and Hybrid Transport. Power Circuits, Equipment, Problems and Development Prospects	19
<i>Shokhin V.V., Khrumshin V.R., Kornilov G.P., Permyakova O.V.</i> Simulation of the Asynchronous Motor Vector Control System with an Electric Coordinate Conversion	29
POWER ENGINEERING	38
<i>Safaraliyev M.Kh., Matrenin P.V., Dmitriyev S.A., Ahyoev J.S., Kokin S.E.</i> Adaptive Ensemble Models for Medium-Term Forecasting of Power Generation by Hydropower Plants in Isolated Power Systems Taking into Account Temperature Changes.....	38
<i>Senyuk M.D., Dmitrieva A.A.</i> Approbation of the Algorithm for Synchronous Generator Mode Dynamic Stability and Emergency Control Analysis on a Multi-Machine Model of the Power System	46
<i>Gazizova O.V., Panova E.A., Kij A.V., Patshin N.T.</i> Feasibility Analysis of Incomplete-Phase Operation of the Autotransformer Group at the 500/220/110 kv Substation.....	54
INDUSTRIAL ELECTRO TECHNOLOGY	62
<i>Dunaev M.P., Gladishev M.A., Arsentev M.O.</i> The Influence of Deflecting System on Plasma Formation in the Wheel Set Plasma Hardening Unit	62
POWER ELECTRONICS, AUTOMATION AND CONTROL SYSTEMS.....	68
<i>Parsunkin B.N., Andreev S.M., Samarina I.G.</i> Energy-saving Automated Control of Mixed Gas Combustion in Heating Through-Type Furnaces of Sheet Rolling Mills	68
INFORMATION ABOUT THE AUTHORS.....	75

СЕНСОРНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ШАГОВЫМ ДВИГАТЕЛЕМ С ПРОГРАММНОЙ ФИЛЬТРАЦИЕЙ КАНАЛА ЗАДАНИЯ УГЛА ПОВОРОТА ВАЛА

Рассмотрены вопросы методов управления шаговых двигателей в системах позиционирования, проведен сравнительный анализ существующих разомкнутых и замкнутых систем управления, выявлены преимущества и недостатки. Цель исследования: создание универсального, надежного и сравнительно недорогого устройства на базе шагового двигателя для позиционирования перемещаемого объекта в сенсорном режиме. Разработана универсальная программа управления шаговым двигателем в сенсорном режиме с оптимальной программной фильтрацией канала задания угла поворота вала. Реализовано схемное решение на базе программируемого микроконтроллера ATmega 328. Проведены экспериментальные исследования работы шагового двигателя в сенсорном режиме без фильтрации и с программной фильтрацией канала управления поворота вала двигателя, построены переходные процессы перемещения, скорости, тока и сигнала управления при полном цикле работы двигателя. Даны рекомендации по настройке программного фильтра и регулятора положения. Рассчитана линейная математическая модель шагового двигателя и структурная схема замкнутой системы регулирования по отклонению угла поворота вала. В программе Matlab Simulink построены переходные процессы основных регулируемых координат электропривода в сенсорном режиме работы с фильтрацией и без фильтрации канала задания угла отклонения вала двигателя. Проведен частотный анализ разработанной замкнутой системы управления электроприводом по управляющему воздействию на предмет устойчивости и качества фильтрации помехи управляющего сигнала. Результаты работы внедрены в учебный процесс ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова» на кафедре автоматизированного электропривода и мехатроники в виде учебного лабораторного стенда для проведения лабораторных занятий по дисциплине «Наладка мехатронных комплексов и систем».

Ключевые слова: шаговый двигатель, программируемый микроконтроллер, программа управления, сенсорный режим, программный фильтр, мехатронная система, драйвер.

ВВЕДЕНИЕ

Шаговые двигатели (ШД) имеют ряд преимуществ по сравнению с двигателями постоянного тока. Они точны в позиционировании и хорошо держат момент на малых оборотах, а также имеют продолжительный срок службы за счет отсутствия щеточно-коллекторного аппарата и изолированных от окружающей среды обмоток [1-3]. Перечисленные положительные свойства ШД определили их сферу применения – устройства точного позиционирования (станки с точной подачей резца, например гравировальные и фрезерные, управление манипуляторами в робототехнике, различные автоматы и т.п.) [4-6].

Сенсорный (следающий) режим управления (ШД) широко внедрен в роботизированные медицинские или лабораторные манипуляторы типа механическая рука [7]. Мехатронные системы такого типа позволяют выполнять задачи захвата и точного позиционирования объекта в пространстве. Сравнительный анализ управления ШД показал, что реализация таких проектов в жизнь довольно затратное мероприятие. И дело не только в дороговизне механического оборудования, но и в создании оптимальных и надежных программ для микроконтроллера, управляющего ШД [8].

Анализ различных систем управления ШД, вкуче с различными алгоритмами управления, показал повышение энергопотребления с усложнением программы управления и использования замкнутых цепей управления с внешними датчиками обратных связей [9]. Реализация сложных алгоритмов работы и контроля ошибок позиционирования ШД заставляет применять

дорогостоящие высокопроизводительные микропроцессорные платформы, покупать лицензию на программное обеспечение для их программирования [10, 11]. Вместе с тем снижается их надежность.

Исходя из вышеизложенного анализа, можно сделать вывод о том, что в настоящее время существует потребность в сравнительно недорогих, универсальных бездатчиковых системах позиционирования на базе ШД, в частности сенсорный с малым энергопотреблением.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ДЛЯ ТОЧНОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ

Точное позиционирование объекта в сенсорном режиме работы манипулятора зависит от следующих факторов и задач:

- масса позиционируемого объекта не должна превышать допустимую, чтобы исключить пропуск шагов от чрезмерного статического момента на валу ШД;
- управляющий сигнал должен фильтроваться от помех аппаратным и программным фильтрами, иначе неизбежны колебания объекта;
- ограничение ускорения и случайных рывков позиционируемого объекта.

ВЫБОР И ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДА ПРОГРАММНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ

Программная фильтрация аналогового сигнала управления может быть реализована по следующим алгоритмам [12, 13]:

1. Среднеквадратичное сглаживание по двум измерениям:

$$U_{y(i)} = \frac{U_{y(i)} + U_{y(i+1)}}{2}, \quad (1)$$

где $U_{y(i)}$ и $U_{y(i+1)}$ – значения сигнала управления через промежутки времени;

2. Экспоненциальное сглаживание по двум измерениям:

$$U_{y(i)} = KU_{y(i)} + (1-K)U_{y(i+1)}, \quad (2)$$

где $(0 < K < 1)$ – коэффициент глубины фильтрации;

3. Сглаживание по трём измерениям с использованием весовых коэффициентов

$$U_{y(i)} = K1 \cdot U_{y(i-1)} + K2 \cdot U_{y(i)} + K3 \cdot U_{y(i+1)}, \quad (3)$$

где $(K1 + K2 + K3) = 1$ – весовые коэффициенты фильтрации.

Первый алгоритм фильтрации (1) лишь усредняет колебания сигнала, уменьшая их амплитуду. Наиболее оптимальным по качеству, быстродействию и удобству настройки является программный фильтр с алгоритмом экспоненциального сглаживания по двум измерениям (2). Изменяя коэффициент K в заданном диапазоне от 0 до 1, можно настраивать глубину фильтрации. Описанный алгоритм особенно эффективен в устранении высокочастотных помех, засоряющих информационный низкочастотный сигнал. Третий алгоритм (3) так же эффективен, как и второй (2), но более сложный в реализации и настройке, а значит, будет занимать больше времени на вычисления процессором.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

В качестве управляющей системы ШД применен восьмиразрядный программируемый микроконтроллер ATmega 328 (ArduinoUNO) со встроенным USB-отладчиком.

Функциональная схема лабораторной установки представлена на рис. 1, она включает в себя:

- униполярный двигатель ШДПБМГ 200-265, данные которого приведены в табл. 1;
- лабораторный блок питания БП;
- драйвер ШД;
- микроконтроллер ArduinoUNO (ATmega 328);
- датчик тока ACS712ELC;
- потенциометр $R4 = 10$ (кОм) в качестве регулятора управляющего сигнала.

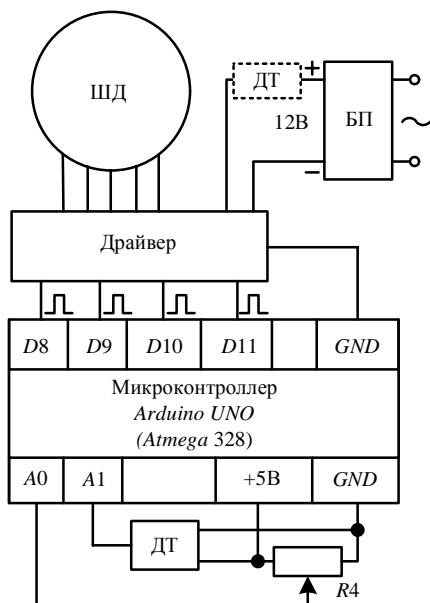


Рис. 1. Функциональная схема лабораторной установки

Таблица 1

Данные униполярного ШДПБМГ 200-265

Характеристика	Значение
Угол поворота за 1 шаг, град.	1,8
Номинальная скорость ШД, об/мин	200
Количество выводов, шт.	6
Напряжение питания, В	12
Сопротивление обмоток, Ом	70
Потребляемый ток, А	0,17

Схема драйвера ШД на базе MOSFET-транзисторов представлена на рис. 2, а фото лабораторной установки – на рис. 3. Драйвер изготовлен самостоятельно, выбраны транзисторы IRF 3205 ($VT1$) с напряжением затвора $U_3 = 3-12$ В, защитные диоды Шоттки SB5H100-E3/54 ($VD1$). По цепи управления транзистора: токоограничивающий резистор $R1 = 100$ Ом, подтягивающий резистор $R2 = 10$ кОм. Коммутационный фильтр реализован параллельной RC -цепью: $R3 = 200$ Ом, $C1 = 3300$ пФ.

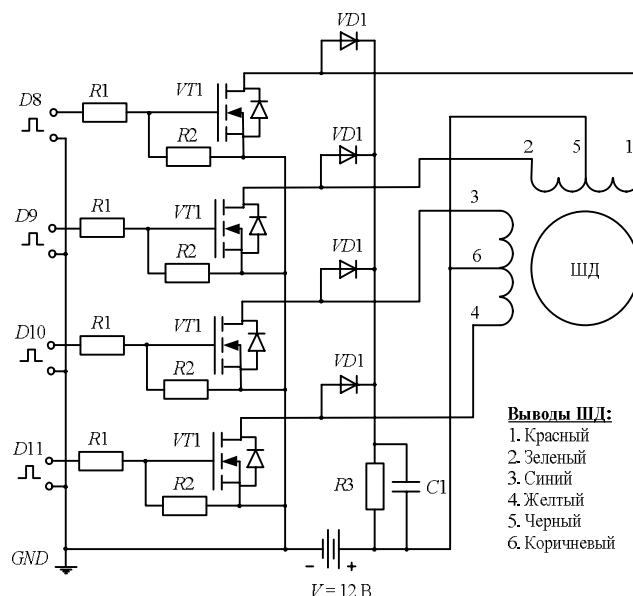


Рис. 2. Схема драйвера ШД

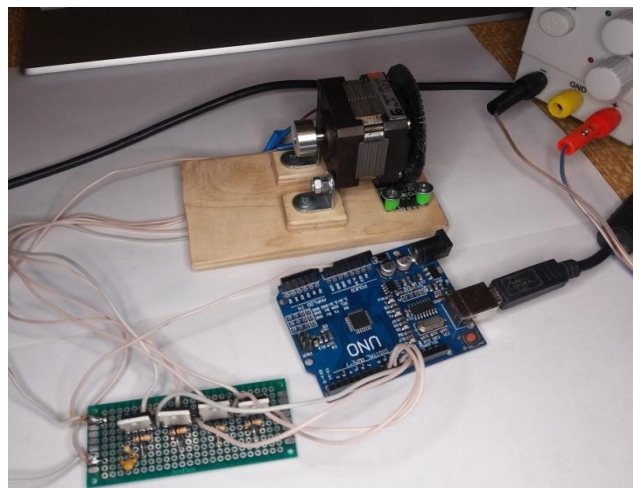


Рис. 3. Лабораторная установка для программного управления ШД

Ниже приведен код основного тела программы с комментариями в программе Arduino 1.8.10 для управления ШД в сенсорном режиме:

```
// Включение библиотеки по управлению ШД
#include<Stepper.h>
// Установка числа шагов ШД при обороте на 360°
#define STEPS 200
// Установка номеров дискретных выходов D8, D9, D10, D11 для управления ШД
Stepper stepper(STEPS, 8, 9, 10, 11);
// Обозначение A0, как вход для управляющего сигнала потенциометра R4
#define potent_pin 0
// Обозначение A1, как вход для датчика тока
#define dt_pin 1
// Объявление переменных
float val1;
float val2;
float val3 = 0.0;
float val4 = 0.0;
float val5 = 0.0;
// Обозначение коэффициента П-регулятора ks
float ks = 1;
// Обозначение коэффициентов фильтрации k и n
float k = 0.15;
float n = 0.13;
int previous = 0;
// Установка делителя числа оборотов
int d = 6;
void setup() {
// Установка номинальной скорости ШД 200 (об/мин)
stepper.setSpeed(200);
// Установка программного осциллографа
Serial.begin(9600);
}
void loop() {
// Считывание управляющего сигнала с потенциометра R4
val1 = analogRead(potent_pin);
// Считывание и обработка сигнала с датчика тока
val2 = analogRead(dt_pin) * 70 + 30200;
// Программная фильтрация сигнала управления
val3 = k * val1 + (1 - k) * val3;
val4 = n * val1 + (1 - n) * val4;
// Вычисление скорости двигателя
val5 = (val3 - val4) * 10;
// Вычисление и установка числа шагов двигателя
stepper.step((val3 - previous) / d);
previous = ks * val3;
// Вывод на программный осциллограф:
// - управляющего сигнала с потенциометра
Serial.print(val1);
Serial.print(',');
// - фильтрованного сигнала управления
Serial.print(val3);
Serial.print(',');
// - скорости двигателя
Serial.print(val5);
Serial.print(',');
// - тока двигателя
Serial.println(val2);
}
```

Разработанная система по технической реализации следит за управляющим сигналом с выхода потенциометра R4 и пропорционально поворачивает вал двигателя. Угол отклонения можно градуировать переменной d перед загрузкой программы в контроллер.

Сигнал с потенциометра U_y без программной фильтрации, засоренный помехой в его составе, неизбежно вызовет «дребезг» вала ШД – положение вала и скорость двигателя (n) постоянно колеблется относительно установившегося значения (рис. 4).

Графики переходных процессов ШД с программной фильтрацией (рис. 5) отражают полный цикл работы системы слежения с отклонением вала двигателя на 360° по и против часовой стрелки.

Программный фильтр успешно решает проблему «дребезга», сглаживая сигнал управления $U_{yф}$, который, в свою очередь, можно считать пропорциональным углу поворота вала, так как механическая характеристика ШД абсолютно жесткая, подобно синхронному двигателю. Это позволяет косвенно вычислить скорость двигателя n дифференцированием фильтрованного сигнала задания угла поворота вала $U_{yф}$.

Ограничение ускорения двигателя можно установить уменьшением максимального числа оборотов функцией «stepper.setSpeed(200);», так как приводной момент ШД, как и синхронного, тем больше, чем ниже скорость двигателя.

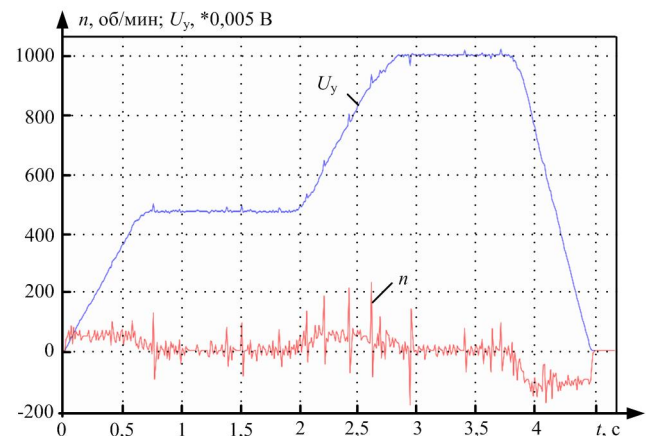


Рис. 4. Переходные процессы ШД без программной фильтрации: n – скорость; U_y – напряжение управления

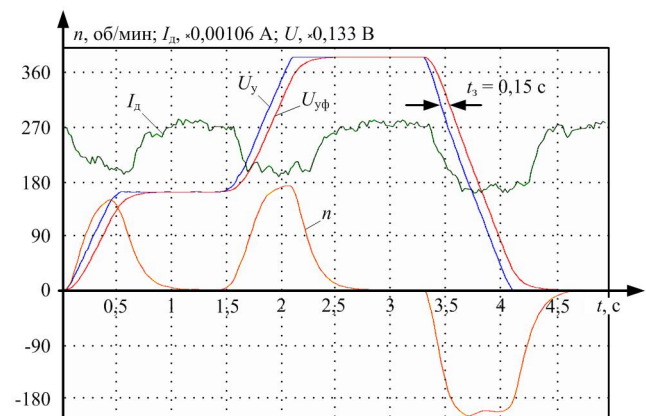


Рис. 5. Переходные процессы ШД с программной фильтрацией: n – скорость; U_y , $U_{yф}$ – напряжение управления до и после фильтрации; I_d – ток

В программном коде реализована замкнутая САУ с П-регулятором «stepper.step((val3 – previous)/d);». Настройку П-регулятора можно осуществлять переменной ks «previous = ks*val3;», который, в свою очередь, увеличивает или уменьшает разность между сигналами в последующем такте сравнения двух сигналов. Настройка полного угла поворота производится переменной d . Для 360° переменная $d=6$, таким образом можно регулировать коэффициент редукции (мультипликации) САУ.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ШД

Математическое моделирование ШД для исследования динамических режимов угловой скорости и угла поворота вала возможно по упрощенной линейной модели, позволяющей оценивать в динамике основные координаты привода (скорость, угол поворота вала) и проводить частотный анализ [14]. Линейная структурная схема ШД с драйвером (ДР), а также ее преобразованная версия представлена на рис. 6.

Преобразование структурной схемы ШД принято с допущениями: драйвер (ДР) описан безинерционным звеном, т.к. время открытия полевого транзистора $t_r = 101 \cdot 10^{-9}$ с. Передаточная функция $W_c(p)$, описывающая угловую скорость ШД, представлена колебательным звеном:

$$W_c(p) = \frac{1/c}{\frac{R_a}{c^2} J T_a p^2 + \frac{R_a}{c^2} J p + 1}, \quad (4)$$

где c – поток; R_a – сопротивление якоря; J – момент инерции двигателя; T_a – постоянная времени якоря.

Угол поворота вала ШД θ вычисляется интегрированием угловой скорости ω с коэффициентом редукции (мультипликации) i .

Построение и настройка контура регулирования угла поворота вала ШД, а также синтез регулятора, возможно на основе анализа частотных характеристик объекта регулирования, [15]. После расчета коэффициентов структурной схемы объекта регулирования (рис. 7, а), основанного на паспортных данных ШД, в программе Matlab построены частотные характеристики скорости $L_1(\omega)$ и угла поворота вала ШД $L_2(\omega)$ (рис. 7, б). Полоса пропускания частот угловой скорости ШД ограничена паспортными данными $\omega_{\max} = 21$ рад/с при номинальном моменте. При увеличении частоты напряжения U_d выше ω_{\max} , амплитуда скорости уменьшается. В реальности ШД начинает выпадать из синхронизма и «терять» шаги, что также проверено экспериментально. Рассчитанная передаточная функция объекта регулирования (4) в диапазоне рабочих частот проявляет свойства аperiodического звена.

Частотная характеристика основной регулируемой координаты – угла поворота вала $L_2(\omega)$ – в зоне рабочих частот имеет наклон -20 дБ/дек с последующим увеличением наклона -40 дБ/дек. Синтез регулятора замкнутой системы для такого типа ЛАЧХ объекта регулирования, предполагает ПИД-структуру. Реализация ПИД-регулятора на программируемом контроллере возможна, но это потребует немалых

ресурсов микропроцессора. Изначально такой задачи не ставилось. В программе Matlab промоделирована замкнутая САУ с П-регулятором угла отклонения вала ШД с фильтрацией канала задания напряжения U_d и без фильтрации, (рис. 8). Построены частотные характеристики исследуемых САУ (рис. 9) и переходные процессы (рис. 10), идентичные экспериментальным на реальной установке.

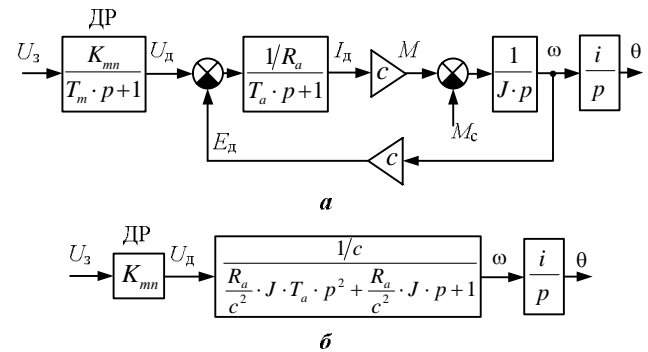


Рис. 6. Линейная структурная схема ШД: а – исходная, б – преобразованная

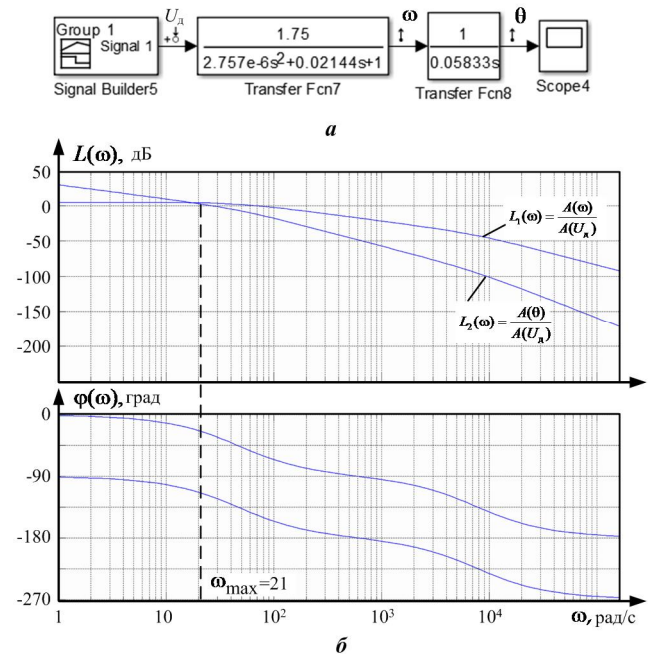


Рис. 7. Структурная схема объекта регулирования (ШД) (а), ЛАЧХ и ЛФЧХ скорости и угла поворота ШД (б)

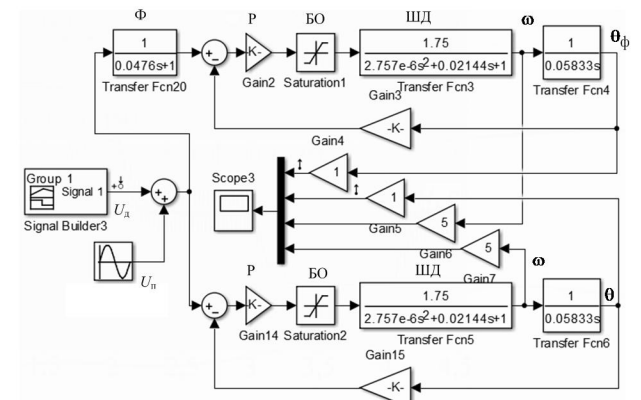


Рис. 8. Структурная схема замкнутой САУ угла поворота вала ШД

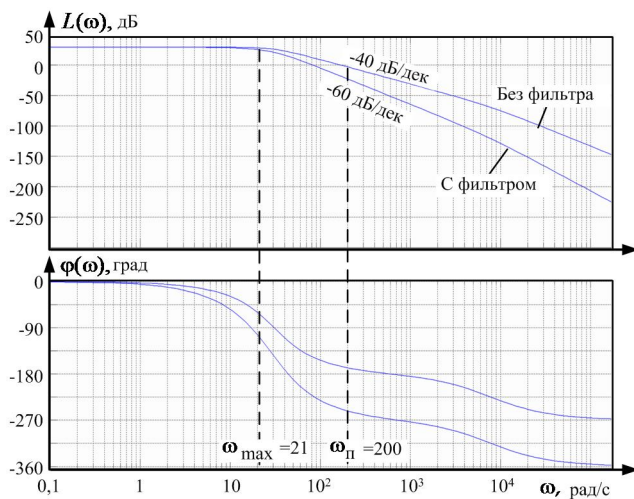


Рис. 9. ЛАЧХ и ЛФЧХ замкнутой САУ ШД с фильтрацией и без фильтрации управляющего канала

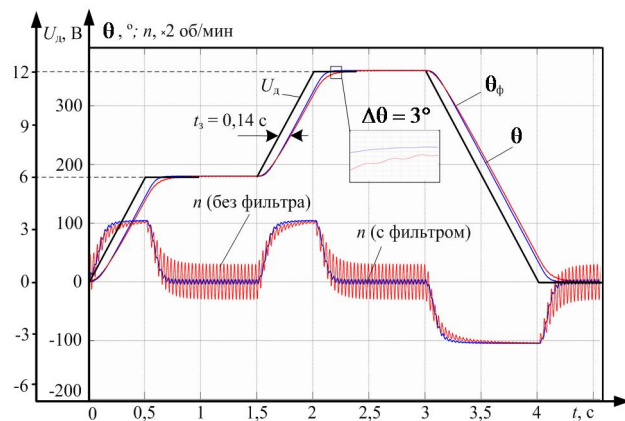


Рис. 10. Переходные процессы замкнутой САУ ШД с фильтрацией и без фильтрации управляющего канала

К сигналу задания прибавляется синусоидальный сигнал, моделирующий помеху U_n с частотой $\omega_n = 200$ рад/с и амплитудой $U_n = 1$ В. Частота сопряжения фильтра Φ устанавливается равной частоте $\omega_{\max} = 21$ рад/с, чтобы не уменьшать полосу пропускания САУ. Коэффициент обратной связи угла поворота вала рассчитан для одного полного оборота на 360° для $U_d = 12$ В.

Анализ частотных характеристик замкнутой САУ ШД показывает устойчивую работу системы в рабочем диапазоне частот от 0 до 21 рад/с (см. рис. 9). Причем программный фильтр не ограничивает полосу рабочих частот ШД, но эффективно уменьшает амплитуду помехи уже при частоте $\omega_n = 200$ рад/с, что видно на переходных процессах (см. рис. 10). Общая задержка по времени сигнала угла θ от U_d составляет $t_3 = 0,14$ с. Ошибка регулирования угла поворота вала САУ без фильтрации канала управления составляет $\Delta\theta = 3^\circ$. Данное отклонение превышает один шаг двигателя в $1,8^\circ$. Фильтрация канала сигнала управления устраняет данную ошибку («дребезг»).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная система управления обладает следующими преимуществами, по сравнению с известными системами позиционирования:

– возможность работы без использования датчика положения ротора в качестве реализации обратной связи по углу отклонения вала ШД, что значительно уменьшает капитальные затраты изделия и увеличивает его надежность;

– оптимизированный алгоритм работы программы управления ШД в сенсорном режиме работы позволяет разгрузить процессор и использовать микроконтроллер с небольшой производительностью, а значит, более дешевый с малым энергопотреблением;

– использование оптимизированного программного фильтра по каналу управления полностью исключает «дребезг» вала ШД, что подтверждается экспериментальными исследованиями и моделированием САУ.

Результаты работы внедрены в учебный процесс ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова» на кафедре автоматизированного электропривода и мехатроники в виде учебного лабораторного стенда для проведения лабораторных занятий по дисциплине «Наладка мехатронных комплексов и систем».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Перспективные методы управления шаговыми двигателями / С.П. Крючков, Р.Д. Каримов, И.И. Ямалов, А.С. Горбунов // Вестник современных исследований. 2018. №10.1(25). С. 313-315.
2. Севцов И.А., Тюрин С.А., Трусков В.А. Сравнительный анализ методов управления шаговым двигателем // Труды международного симпозиума «Надежность и качество». 2020. Т. 2. С. 103-104.
3. Elsodany N.M., Rezeki S.F., Maharem N.A. Adaptive PID control of a stepper motor driving a flexible rotor // AEJ - Alexandria Engineering Journal. 2011. Vol. 50(2). Pp. 127-136. doi: 10.1016/j.aej.2010.08.002
4. Киященко А.В. Управление шаговыми двигателями манипулятора в режиме реального времени // Решетневские чтения. 2016. Т. 1. С. 563-564.
5. Лабораторный стенд для изучения микропроцессорной системы управления параллельной работой шаговых двигателей / М.Д. Хорошевский, А.М. Макаров, Н.С. Гришанкова, Т.В. Андронов // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2017. № 12(207). С. 87-90.
6. Intelligent speed control of hybrid stepper motor considering model uncertainty using brain emotional learning / A.M. Yazdani, A. Mahmoudi, S.A. Mahmoudzadeh, P. Ghafooni, S. Mahmoudzadeh, S. Buyamin // Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering. 2018. Vol. 41. No 2. Pp. 95-104. doi: 10.1109/CJEE.2018.2849357
7. Горячев О.В., Степачкин А.О. Электрический следящий привод высокой точности на основе гибридного шагового двигателя с векторным управлением // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. № 4. С. 147-157. doi: 10.24411/2071-6168-2020-00026
8. Анализ направлений аппаратно-программных разработок по управлению шаговыми двигателями для использования в учебном процессе вузов / К.Д. Боскебеёв, Т.Х. Куаншкалиев, Ж.К. Алимсеитова, В.Н. Ничков, М.А. Ильменский, И.В. Колесников // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2016. № 4(36). С. 111-127.
9. Кузнецов И.Ю. Статистический анализ энергопотребления устройства управления шаговыми двигателями // Актуальные научные исследования в современном мире. 2020. № 7-2(63). С. 91-94.

10. Пашенко А.Н., Копычев М.М. Система управления положением динамического объекта на подвижной плоскости // Молодежная школа-семинар по проблемам управления в технических системах имени А.А. Вавилова. 2019. Т. 1. С. 28-30.
11. Каменев А.Р., Зрюмова А.Г. Разработка инструментов для управления драйверами шаговых двигателей в микропроцессорных системах // Программно-техническое обеспечение автоматизированных систем: материалы Всероссийской молодежной научно-практической конференции. Барнаул: Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, 2018. С. 192-195.
12. Чирков Д.Г., Стоцкая А.Д. Методы программной фильтрации данных для работы с ультразвуковыми датчиками в области робототехники // Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям (SCM-2020). СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2020. Т. 1. С. 155-158.
13. Фокин Г.А. Моделирование формирующего и согласованного фильтров // Информационные технологии и телекоммуникации. 2021. Т. 9. № 2. С. 77-94. doi: 10.31854/2307-1303-2021-9-2-77-94
14. Регулирование угловой скорости шагового двигателя / Р.Т. Емельянов, С.А. Аринчин, Е.С. Турышева, В.В. Макеев // Вестник КрасГАУ. 2017. № 11(134). С. 141-146.
15. Фомин Н.В. Системы подчиненного регулирования координат в электроприводах постоянного тока: учебное пособие. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2010. 199 с.

Поступила в редакцию 30 ноября 2021 г.

INFORMATION IN ENGLISH

STEPPER MOTOR SENSOR CONTROL WITH PROGRAM FILTERING OF THE SHAFT ROTATION ANGLE REFERENCE CHANNEL

Sergey A. Linkov

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

Oleg S. Malakhov

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Department of Automated Electric Drive and Mechatronics, Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, osmalahov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2716-004X>

This paper is devoted to the positioning systems of stepper motors control methods. Comparative analysis of the existing open- and closed-loop systems was carried out; their advantages and disadvantages are identified. The research purpose is the design of the universal reliable and cheap device based on stepper motor for the moving object sensor mode positioning. A stepper motor universal control program with optimal filtering of the shaft rotation angle reference channel was developed. A schematic diagram based on ATmega328 microcontroller was designed. The experimental research of the sensor mode operating stepper motor with and without program filtering was conducted. Transient processes of motion, speed, current and reference signal graphics were built. A linear mathematical model of a stepper motor and a block diagram of a closed-loop control system for the shaft rotation angle deviation have been calculated. The main adjustable coordinates transient processes of the electric drive operating in the sensor mode are built with Matlab Simulink with filtering and without filtering the motor shaft deflection angle specifying channel. A frequency analysis of the developed closed-loop electric drive control action control system is carried out for the stability and quality of filtering interference of the control signal. The research results are applied to the studying process of the Department of Automatic Electric Drive and Mechatronics, Nosov Magnitogorsk State Technical University as a laboratory stand for Adjustment of mechatronic complexes and systems course.

Keywords: stepper motor, programmable microcontroller, control program, sensor mode, program filter, mechatronic system, driver.

REFERENCES

1. Kryuchkov S.P., Karimov R.D., Yamalov I.I., Gorbunov A.S. Advanced Stepper Motor Control Methods. *Vestnik sovremennykh issledovaniy* [Bulletin of Contemporary Research], 2018, no 10.1(25), pp. 313-315. (In Russian)
2. Sevtsov I.A., Tyurin S.A., Trusov V.A. Comparative Analysis of Stepper Motor Control Methods. *Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma "Nadezhnost i kachestvo"* [Proceedings of the International Symposium "Reliability and Quality"], 2020, vol. 2, pp. 103-104. (In Russian)
3. Elsodany N. M., Rezeka S. F., Maharem N. A. Adaptive PID control of a stepper motor driving a flexible rotor. *AEJ - Alexandria Engineering Journal*, 2011, vol. 50, no. 2, pp. 127-136. doi: 10.1016/j.aej.2010.08.002
4. Kiyashchenko A. V. Real-time manipulator stepper motors control. *Reshetnevskie chteniya* [Reshetnev readings]. Krasnoyarsk, Reshetnev University Publ., 2016, pp. 563-564. (In Russian)
5. Khoroshevskiy M.D., Makarov A.M., Grishankova N.S., Andronov T.V. Laboratory stand for studying the microprocessor control system for parallel operation of stepper motors. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Volgograd State Technical University], 2017, no 12(207), pp. 87-90. (In Russian)
6. Yazdani A. M., Mahmoudi A., Mahmoudzadeh S. Intelligent speed control of hybrid stepper motor considering model uncertainty using brain emotional learning [et al.]. *Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering*, 2018, vol. 41, no. 2, pp. 95-104. doi: 10.1109/CJCE.2018.2849357
7. Goryachev O.V., Stepochkin A.O. High precision electric servo drive based on hybrid vector stepper motor. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Bulletin of the Tula State University. Technical sciences], 2020, no. 4, pp. 147-157. doi 10.24411/2071-6168-2020-00026. (In Russian)
8. Boskebeev K.D., Kuanshaliev T.Kh., Alimseitova Zh.K., Nichkov V.N., Il'menskiy M.A., Kolesnikov I.V. Analysis of the directions of hardware and software developments for the control of stepper motors for use in the educational process of universities. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii* [Caspian Journal: Management and High Technologies], 2016, no. 4(36), pp. 111-127. (In Russian)

9. Kuznetsov I.Yu. Statistical analysis of power consumption of a stepper motor controller. *Aktualnye nauchnye issledovaniya v sovremennom mire* [Actual scientific research in the modern world], 2020, no. 7-2(63), pp. 91-94. (In Ukrainian)
 10. Pashchenko A. N., Kopychev M. M. Control system for the position of a dynamic object on a moving plane. *Molodezhnaya shkola-seminar po problemam upravleniya v tekhnicheskikh sistemakh imeni A.A. Vavilova* [Vavilov Youth School-Seminar on Management Problems in Technical Systems]. Saint Petersburg, ETU "LETI" Publ., 2019, vol. 1, pp. 28-30. (In Russian)
 11. Kamenev A.R., Zryumova A.G. Development of tools for controlling stepper motor drivers in microprocessor systems. *Programmno-tekhnicheskoe obespechenie avtomatizirovannykh sistem: Materialy Vserossiyskoy molodezhnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Software and hardware support of automated systems: Materials of the All-Russian Youth Scientific and Practical Conference], Barnaul, AltSTU Publ., 2018, pp. 192-195. (In Russian)
 12. Chirkov D.G., Stotskaya A.D. Software data filtering methods for working with ultrasonic sensors in the field of robotics. *Mezhdunarodnaya konferentsiya po myagkim vychisleniyam i izmereniyam* [International Conference on Soft Computing and Measurements]. Saint Petersburg, ETU "LETI" Publ., 2020, vol. 1, pp. 155-158. (In Russian)
 13. Fokin G.A. Modeling Shaping and Matched Filters. *Informatsionnye tekhnologii i telekommunikatsii* [Information technology and telecommunications], 2021, vol. 9, no. 2, pp. 77-94. doi: 10.31854/2307-1303-2021-9-2-77-94 (In Russian)
 14. Emelyanov R.T., Arinchin S.A., Turisheva E.S., Makevich V.V. Stepper motor angular speed control. *Vestnik KrasGAU* [The Bulletin of KrasGAU], 2017, no. 11(134), pp. 141-146. (In Russian)
 15. Fomin N.V. *Sistemy podchinennogo regulirovaniya koordinat v elektropriivodakh postoyannogo toka* [Slave coordinate control systems in DC electric drives]. Magnitogorsk, Nosov Magnitogorsk State Technical University Publ., 2010. 199 p. (in Russian)
- Линьков С.А., Малахов О.С. Сенсорное управление шаговым двигателем с программной фильтрацией канала задания угла поворота вала // *Электротехнические системы и комплексы*. 2022. № 1(54). С. 4-10. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-1\(54\)-4-10](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-1(54)-4-10)
- Linkov S.A., Malakhov O.S. Stepper Motor Sensor Control with Program Filtering of the Shaft Rotation Angle Reference Channel. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2022, no. 1(54), pp. 4-10. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-1\(54\)-4-10](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-1(54)-4-10)

Белоусов А.С.¹, Мещеряков В.Н.¹, Баранов Д.С.²¹ Липецкий государственный технический университет² Воронежский государственный технический университет

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА НАМОТОЧНОГО СТАНКА ДЛЯ ПОСЛЕДУЮЩЕЙ НАЛАДКИ

В статье рассматривается вопрос моделирования системы управления электроприводом намоточного станка СНП-0,1-150В «Пульсар» с целью определения параметров регуляторов для последующей наладки. Электропривод представляет собой два регулируемых асинхронных двигателя намоточного устройства и натяжного ролика, объединенных общей системой управления, обеспечивающих намотку провода катушки электрической микромашины на определенный шаблон с поддержанием натяжения. Для технологического процесса намотки тонкого провода без общего контура характерен высокий процент брака до 50%, основной причиной которого является обрыв провода из-за высокого натяжения. Система управления должна поддерживать как можно меньшее натяжение при сохранении прежней скорости намотки, что достигается точной настройкой регуляторов, которая будет меняться в зависимости от шаблонов, диаметра и материала провода. Наладка путем нескольких итераций при смене провода займет долгое время и приведет к большому браку наматываемого провода. Уменьшить эти негативные процессы возможно путем предварительного моделирования технологического процесса, модель которого разрабатывается в данной статье. В ней поэтапно показана разработка модели, начиная от расчета электродвигателей и до построения общего контура натяжения провода. Значительный интерес в данном исследовании составляет тот факт, что приводом натяжного ролика является двухфазный асинхронный двигатель с полым ротором. Он имеет малый момент инерции, позволяющий мгновенно реагировать на любое изменение заданной скорости и момента нагрузки. Однако в силу малой распространенности регулирования этих двигателей исследовано не в полной мере и заключалось скорее в разработке новых алгоритмов и типов широтно-импульсной модуляции, чем в применении их в многоконтурных системах управления реальных технологических процессов.

Ключевые слова: моделирование, регулируемый электропривод, система управления, намоточный станок, тонкий провод, технологический процесс, регулирование натяжения, двухфазный асинхронный двигатель, трехфазный асинхронный двигатель, векторное управление, замкнутый контур.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в сфере миниатюрного электромашиностроения стоит комплексная задача обеспечения высокого качества изготовления гладких обмоток двигателей из сверхтонкого провода. Любые отклонения технологического процесса при их изготовлении влекут за собой брак, который достигает 50% [1, 2]. Намоточные станки должны обеспечивать жесткую фиксацию витков катушки для обеспечения стабильности ее параметров, что решается оптимизацией системы управления электроприводом станка [3–6].

Один из вариантов решения данной проблемы заключается в комплексной настройке системы управления электропривода шпинделя намоточного станка и привода натяжения с двумя каналами управления и поддержанием натяжения провода обмотки на минимальных значениях [7, 8]. Однако, прежде чем перейти к фактической настройке системы управления станка по разработанным принципам, было необходимо провести математическое моделирование и отследить взаимное влияние двух двигателей, определяющее натяжение наматываемой катушки, как это показано в работах [9–12]. Проблема осложнялась нехваткой данных об основных электротехнических параметрах двигателей, на основе которых должны быть рассчитаны звенья подчиненных систем регулирования, поскольку приводом натяжного ролика служил двухфазный асинхронный двигатель, системы управления которого исследованы в недостаточной степени [13, 14]. Таким образом, в данной работе стояла задача построить мо-

дели двух двигателей, затем поэтапно разработать каждый контур их систем управления и в итоге объединить их в общую систему управления электропривода станка [15], которая обеспечит контроль натяжения и в итоге позволит производить катушки микромашин с меньшим браком [16].

ПРИМЕНЯЕМЫЕ МЕТОДЫ

Основными методами исследования в данной статье являются анализ технологического процесса, математический расчет параметров электрических машин, теоретические расчеты настройки регуляторов и систем управления электроприводом, а также математическое моделирование в программной среде *Matlab Simulink* с использованием надстройки *SimPowerSystem* для моделирования в области электротехники.

Структурная схема намоточного станка СНП-0,1-150В «Пульсар» показана на **рис. 1**.

Станок работает следующим образом: провод наматывается со смоточной катушки 1 и проходит через баллоноограничитель 2, обеспечивающий защиту вращающейся петли, направляющий глазок 3 обеспечивает выпрямление провода под прямым углом. Направляющие ролики 4, 8, 9 задают траекторию движения провода, его натяжение обеспечивается роликом 5, приводимым в движение двигателем 6. Датчик натяжения 10 обеспечивает обратную связь преобразователя частоты 7, который осуществляет регулировку двигателя 6 для стабилизации натяжения провода. Через устройство укладки 11 и ролик датчика учета растяжения 12 провод попадает на намоточный шаблон, вращающийся с частотой $n = 90$ об/мин [12, 15].

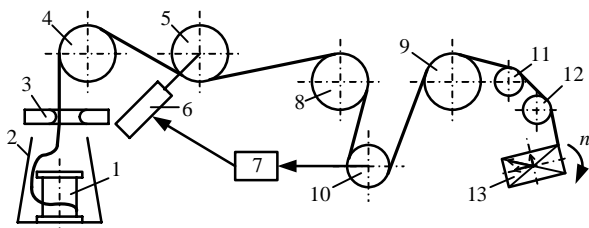


Рис. 1. Структурная схема намоточного станка

Итак, в состав станка входят два регулируемых электропривода: привод намоточного устройства (НУ), который должен поддерживать постоянную скорость намотки и привод натяжного ролика (НР), который должен поддерживать постоянное минимальное натяжение провода. Система управления (СУ) первого двигателя должна иметь два контура: тока и скорости, а СУ второго помимо тех же контуров имеет третий, технологический контур натяжения. Кроме того, полезный момент рабочих органов каждого из этих приводов будет являться нагрузкой для другого.

Технологически настройка станка состоит из двух этапов: до пуска ролик 5 тормозит провод и обеспечивает заданное натяжение $T_{ст} = 3,75 \text{ г} \cdot \text{с}^2$, затем при статической настройке во время пуска натяжение ведомой ветви провода должно приблизиться к нулю [6, 7, 16].

Электропривод НУ состоит из трехфазного асинхронного двигателя (ТАД) АИР63В4 и преобразователя частоты *TOSHIBA VF-nC3S-2004P-W* на основе трехфазного инвертора с подключением к однофазной сети, а привод НР представлен в виде двухфазного асинхронного двигателя (ДАД) ДИД-5ТВ. Предлагается подключить его к сети через аналогичный преобразователь частоты. Параметры ДАД и ТАД представлены в табл. 1 и 2 соответственно.

Таблица 1

Параметры двигателя натяжного ролика ДИД-5ТВ

Параметр	Значение
Мощность P , Вт	5
Пусковой момент $M_{п}$, мН·м	0,22
Токи обмоток статора	возбуждения $I_{1в}$, мА управления $I_{1у}$, мА
Скорость холостого хода n , об/мин	6000
Напряжение обмоток статора $U_{1в}$, $U_{1у}$, В	36
Частота f , Гц	400
КПД η , %	20
Момент инерции J , мг·м ²	0,25
Сопrotивление обмоток статора	возбуждения $R_{в}+X_{в}$, Ом управления $R_{у}+X_{у}$, Ом
	50+j50 50+j50

Таблица 2

Параметры двигателя намоточного устройства АИР63В4

Параметр	Значение
Мощность P , кВт	0,37
Синхронная скорость n , об/мин	1500
Частота f , Гц	50
КПД η , %	68
Коэффициент мощности $\cos \varphi_n$	0,7
Скольжение s_n , %	8,7
Отношение пускового момента $k_{пм}$	2,3
Отношение максимального момента λ	2,2
Отношение пускового тока $k_{пт}$	5,0
Момент инерции J , г·м ²	0,8

Для построения модели работы двигателей в среде *Matlab Simulink* предполагалось воспользоваться стандартными моделями двухфазного и трехфазного асинхронных двигателей из стандартной библиотеки *SimPowerSystem*, поскольку они учитывают больше факторов, нежели математические модели двигателей на основе основных уравнений. Для настройки моделей двигателей и в дальнейшем СУ были проведены расчеты согласно [17–19]. Для двигателя ДИД-5ТВ:

$$n = \frac{60f}{p} \Rightarrow p = \frac{60f}{n} = \frac{60 \cdot 400}{6000} = 4; \quad (1)$$

$$\omega = \frac{2\pi f}{p} = \frac{2\pi \cdot 400}{4} = 628 \text{ рад/с}; \quad (2)$$

$$X_{xy} = \frac{U_{1y}}{I_{1y}} \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_{xy}} \approx \frac{36}{0,5} = 72 \text{ Ом}; \quad (3)$$

$$X_{xb} = \frac{U_{1b}}{I_{1b}} \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_{xb}} \approx \frac{36}{1,2} = 30 \text{ Ом}; \quad (4)$$

$$X_{xx} = \sqrt{X_{xy}^2 + X_{xb}^2} = \sqrt{72^2 + 30^2} = 78 \text{ Ом}; \quad (5)$$

$$X_c = \sqrt{X_y^2 + X_b^2} = \sqrt{50^2 + 50^2} = 70,7 \text{ Ом}; \quad (6)$$

$$X_m = X_{xx} - X_c = 78 - 70,7 = 7,3 \text{ Ом}; \quad (7)$$

$$L_{1cy} = L_{1cb} = \frac{X_y}{\omega} = \frac{50}{628} = 79,6 \text{ мГн}; \quad (8)$$

$$L_m = \frac{X_m}{\omega} = \frac{7,3}{628} = 11,8 \text{ мГн}; \quad (9)$$

$$R'_r \approx \frac{k_{пм} \frac{P}{\eta}}{2k_{пт}^2 I_y^2} = \frac{1,4 \cdot \frac{5}{0,2}}{2 \cdot \left(\frac{1,2}{0,5}\right)^2 \cdot 0,5^2} \approx 12 \text{ Ом}; \quad (10)$$

$$L_r \approx 0,1 \text{ мГн}, \quad (11)$$

где p – число пар полюсов; ω – синхронная частота вращения; X_{xb} , X_{xy} , X_{xx} – индуктивные сопротивления холостого хода обмоток возбуждения, управления, статора; X_c – индуктивное сопротивление статора; X_m – индуктивное сопротивление намагничивания; L_{1cb} , L_{1cy} – индуктивности обмоток возбуждения и управления; L_m – взаимоиנדукция; R'_r – активное сопротивление ротора; L_r – индукция полого ротора, приближенная к нулю.

Расчеты двигателя АИР63В4:

$$p = \frac{60f}{n} = \frac{60 \cdot 50}{1500} = 2; \quad (12)$$

$$\omega_0 = 2\pi f = 2\pi \cdot 50 = 314 \text{ рад/с}; \quad (13)$$

$$I_H = \frac{P}{\sqrt{3}U_H \eta \cos \varphi} = \frac{370}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,680 \cdot 0,7} = 1,18 \text{ А}; \quad (14)$$

$$M_H = \frac{P_H P}{\omega_0 (1 - s_H)} = \frac{370 \cdot 2}{314 \cdot (1 - 0,087)} = 2,58 \text{ Нм}; \quad (15)$$

$$s_K = s_H \left(\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1} \right) = 0,087 \left(2,2 + \sqrt{2,2^2 - 1} \right) = 0,362; \quad (16)$$

$$\Delta P_{\text{мех}} = P_H \left(\frac{1}{\eta} - 1 \right) = 370 \cdot \left(\frac{1}{0,68} - 1 \right) = 29 \text{ Вт}; \quad (17)$$

$$R_s = \frac{U_H^2 (1 - s_H)}{2c_1 \left(1 + \frac{c_1}{s_K} \right) k_{\text{пм}} (P_H + \Delta P_{\text{мех}})} = \frac{380^2 (1 - 0,087)}{2 \cdot 1,026 \cdot \left(1 + \frac{1,026}{0,362} \right) \cdot 2,3 \cdot (370 + 29)} = 5,47 \text{ Ом}; \quad (18)$$

$$R_r = \frac{k_{\text{пм}} (P_H + \Delta P_{\text{мех}})}{3(1 - s_H) k_{\text{пт}}^2 \cdot I_H^2} = \frac{2,3 \cdot (370 + 29)}{3(1 - 0,087) 5,0^2 \cdot 1,18^2} = 9,625 \text{ Ом}; \quad (19)$$

$$L_s \cong L_r = \frac{U_H / \sqrt{3}}{2\pi f I_H \left(\sqrt{1 - \cos^2 \varphi_H} - \cos \varphi_H \cdot \frac{s_H}{s_K} \right)} = \frac{380 / \sqrt{3}}{2 \cdot 2 \cdot 50 \cdot 1,18 \left(\sqrt{1 - 0,7^2} - 0,7 \cdot \frac{0,087}{0,362} \right)} = 1,70 \text{ Гн}; \quad (20)$$

$$\beta = \frac{R_s}{c_1 R_r} = \frac{5,47}{1,026 \cdot 9,625} = 0,554; \quad (21)$$

$$x_K = c_1 R_r \sqrt{\frac{1}{s_K^2} - \beta^2} = 1,026 \cdot 9,625 \sqrt{\frac{1}{0,362^2} - 0,554^2} = 26,7 \text{ Ом}; \quad (22)$$

$$L_{s\sigma} \cong L_{r\sigma} = \frac{x_K}{2\omega_0} = \frac{26,7}{2 \cdot 314} = 0,0425 \text{ Гн}; \quad (23)$$

$$L_m = L_s - L_{s\sigma} = 1,7 - 0,0425 = 1,6575 \text{ Гн}; \quad (24)$$

$$c_1 = 1 + \frac{L_{s\sigma}}{L_m} = 1 + \frac{0,0425}{1,6575} = 1,026, \quad (25)$$

где I_H , M_H – номинальные ток статора и электромагнитный момент; s_K – критическое скольжение; $\Delta P_{\text{мех}}$ – механические потери; R_s, R_r – активные сопротивления статора и ротора; L_s, L_r – индуктивности статора и ротора; β – коэффициент соотношения сопротивлений обмоток; c_1 – конструктивный коэффициент двигателя; x_K – индуктивное сопротивление цепи короткого замыкания; $L_{s\sigma}, L_{r\sigma}$ – индуктивности статора и ротора; L_m – взаимоиндукция.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На основе описанных расчетов были построены модели скалярного управления каждым двигателем с открытыми контурами по закону $U/f = \text{const}$ (рис. 2) [20].

В СУ заданиями служат номинальные скорости двигателей, задатчики интенсивности (блоки ЗИ) обеспечивают их плавное нарастание в основном диапазоне и на малых частотах. Закон регулирования $U/f = \text{const}$ реализован в блоках *Pulse generator*, где формируемые синусоиды задания сравниваются с пилообразным несущим сигналом и формируют импульсы для ключей инверторов. ИР-компенсация реализована только для ТАД, поскольку у ДАД с полым ротором активное сопротивление ротора не зависит от скольжения. На данном этапе нагрузка двигателей представлена соответствующим статическим номинальным моментом. Механические характеристики пуска двигателей показаны на рис. 3, они позволяют говорить об адекватности расчетов параметров двигателей.

Как видно из рис. 3, для скалярного управления характерна большая амплитуда пусковых скачков момента, его колебания при приложении нагрузки и главное – низкая точность. Дальнейшее регулирование будет проводиться системами с векторным управлением и замкнутыми контурами тока и скорости. Структура такой системы представлена на рис. 4 и ранее была более подробно описана в [14, 21].

Как и у трехфазных двигателей векторное управление основано на разделении тока статора на составляющие потокосцепления и момента. Потокосцепление ротора принимается постоянным (было определено по результатам моделирования прямого пуска), а задание составляющей момента формируется ПИ-регулятором скорости РС. Затем составляющие тока статора пересчитываются в токи фаз и подаются на релейный регулятор тока, где по алгоритму коммутации формируются управляющие импульсы для ключей инвертора. В свою очередь, задание скорости формируется на выходе П-регулятора внешнего технологического контура, в данном случае контура натяжения тонкой нити. Для удобства моделирования сигнала обратной связи мы принимаем его аналогичным контуру положения.

Схема векторной СУ ТАД (рис. 5) типовая [18], значение потокосцепления ротора рассчитывается, а не

снимается по показаниям датчиков Холла. Регулятор скорости ПИ, третий контур по технологии станка не требуется – необходимо поддерживать постоянной только скорость намоточного устройства. Общая структура моделей систем векторного управления не отличается от систем скалярного, отличием является наполнение блоков *Pulse generator*, отражающая схемы на рис. 4 и 5. В обоих СУ контур тока реализован релейными регуляторами тока.

После настройки всех регуляторов на модульный оптимум при постоянном задании и постоянных номинальных статических моментах были получены следующие графики переходных процессов электромагнитного момента, угловой скорости ДАД и натяжения тонкого провода (рис. 6), электромагнитного момента и угловой скорости ТАД (рис. 7).

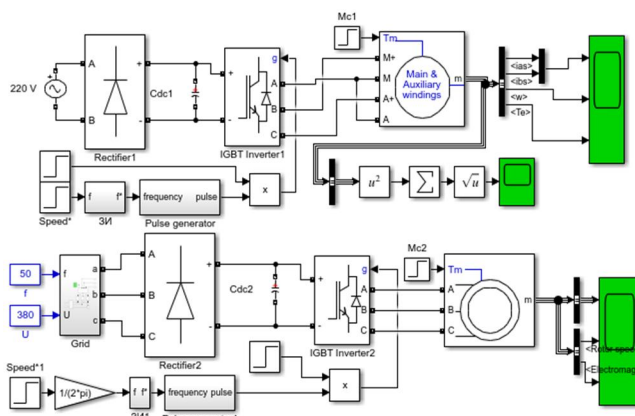


Рис. 2. Модель систем управления двигателями

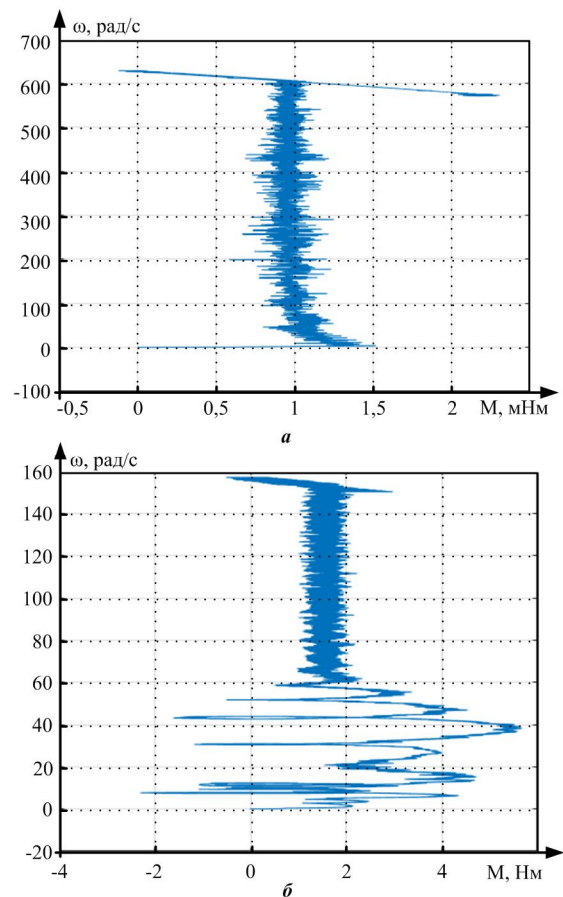


Рис. 3. Механические характеристики в скалярных системах:

а – двухфазного двигателя, б – трехфазного двигателя

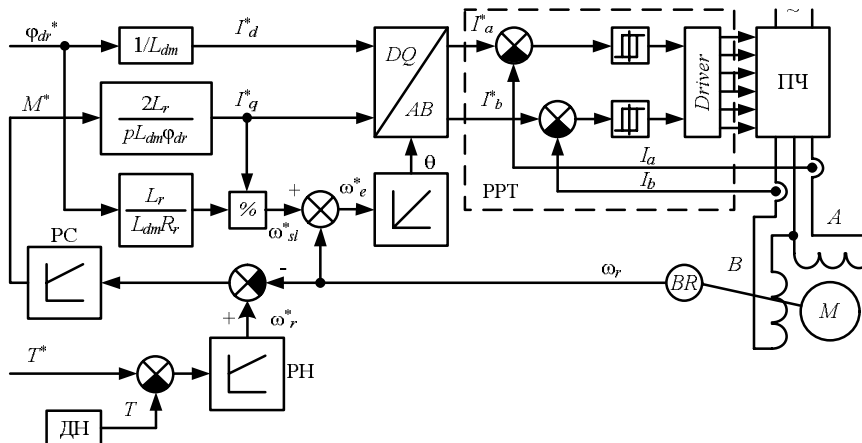


Рис. 4. Структурная схема векторной СУ двухфазным приводом

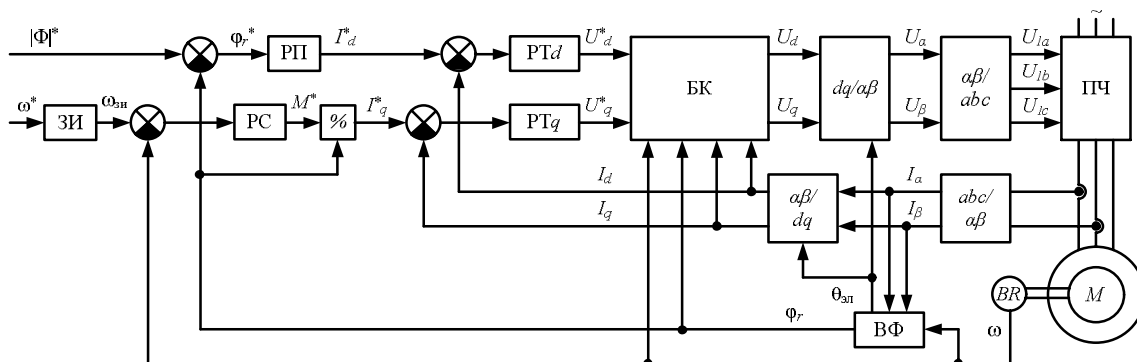


Рис. 5. Структурная схема векторной СУ трехфазным приводом

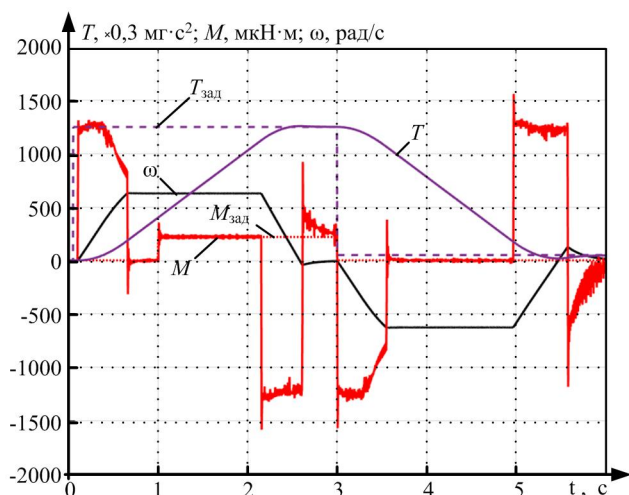


Рис. 6. Графики переходных процессов ДАД

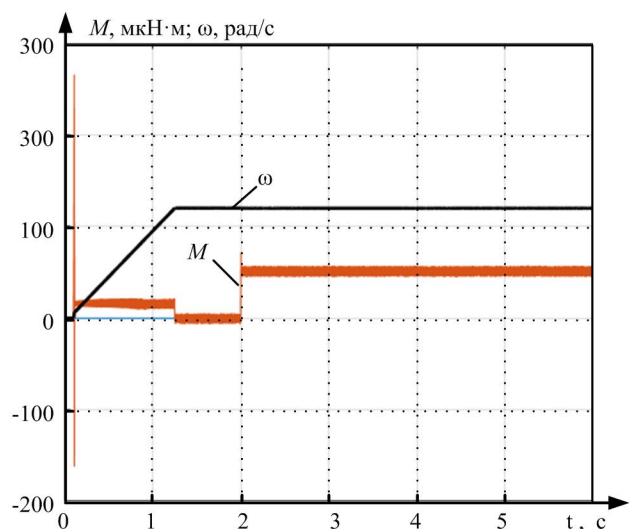


Рис. 7. Графики переходных процессов ТАД

Как видно из рисунков, при изменении нагрузки на каждый из двигателей их скорости не меняются, это дает нам право говорить о правильности настройки ПИ-регуляторов скорости. Значение электромагнитного момента ДАД становится больше номинального только при изменении скорости. Контур натяжения реализован П-регулятором, а потому для натяжения характерно малое перерегулирование, не ухудшающее свойства провода, так как его предельно допустимое натяжение в 2 раза больше заданного. До пуска НУ двухфазный двигатель НР тормозит сматываемый провод для обеспечения первоначального натяжения $T_{\text{зад}} = 3,75 \text{ г} \cdot \text{с}^2$. После выхода на установившуюся скорость двигателя на него начинает действовать статический момент нагрузки. После выхода на заданное натяжение провода включают двигатель НУ, нагрузкой для которого будет являться момент натяжного ролика, приведенный через кинематическую цепь провода, и наоборот, для ДАД нагрузкой станет приведенный момент ТАД. После этого натяжение провода можно уменьшить почти до нулевого значения. Соответственно, будут уменьшаться и моменты нагрузки каждого двигателя.

Комплексная модель такого электропривода показана на рис. 8. На рис. 9 показаны характеристики ДАД при пуске системы электропривода.

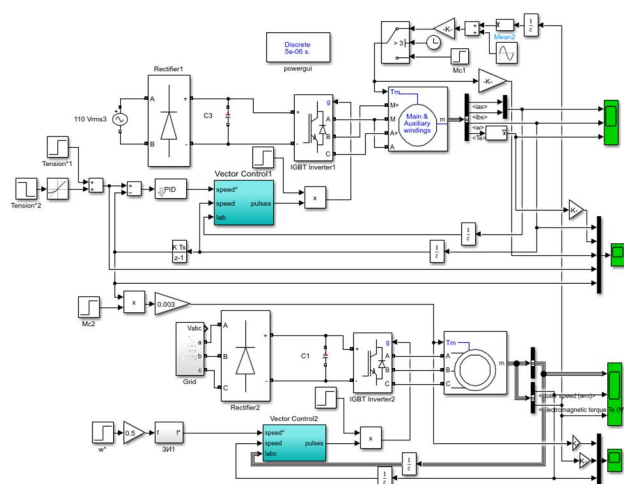


Рис. 8. Комплексная модель системы электропривода станка

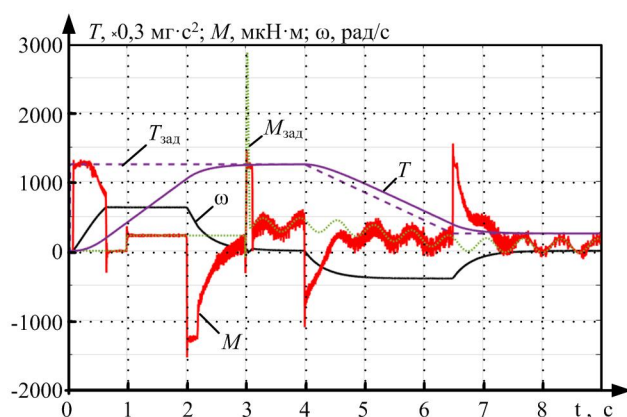


Рис. 9. Характеристики ДАД при пуске системы электропривода

Полученные графики приблизительно отражают технологический процесс работы станка. Вначале запускают ДАД НР, который обеспечивает начальное натяжение провода при воздействии статического момента нагрузки, создаваемого кинематической цепью провода. После достижения заданного натяжения в момент времени 3 с включают ТАД НУ, нагрузкой для которого служит приведенное натяжение провода. Затем через 1 с заданное натяжение начинает плавно снижаться до $0,75 \text{ г} \cdot \text{с}^2$. Из-за этого скорость ДАД становится отрицательной, под воздействием действующего момента двигатель меняет направление вращения, при этом нагрузка на ТАД ослабевает, следовательно, плавно снижается и момент нагрузки ДАД, и текущее натяжение провода. После достижения малого натяжения процессы переходят в установившийся режим. Однако важно помнить, что НУ создает вращение прямоугольного шаблона катушки, следовательно, натяжение, создаваемое НУ, будет иметь пульсирующий характер с частотой, равной частоте вращения НУ. Роль данного условия в нашей модели играет блок синусоиды, выступающий в роли поправки к моменту нагрузки, приложенному к ДАД. За счет этого его электромагнитный момент имеет ярко выраженный пульсирующий характер, однако он не оказывает влияния на текущее натяжение провода на выходе НР, которое принимает установившееся значение.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Была смоделирована работа электропривода намоточного станка, состоящего из двухфазного двигателя натяжного ролика и трехфазного двигателя намоточного устройства с регулированием от преобразователей частоты с трехстоечным инвертором напряжения и внешним контуром регулирования натяжения сматываемого провода. Благодаря правильной настройке регуляторов электропривод станка способен обеспечивать равномерную намотку провода на прямоугольный шаблон без бросков его натяжения, что является основной причиной брака. Таким образом, описываемая в статье СУ способствует снижению брака катушек электрических микромашин с 50% до целевого значения 15% [16].

Разработанная модель позволяет определять необходимые настройки регуляторов СУ до их экспериментальной апробации. Таким образом, для того чтобы обеспечить оптимальную работу станка при смене изготавливаемых изделий, не придется путем многочисленных итераций и отбраковок добиваться требуемого качества намотки. На основе данной модели возможно проводить дальнейшие исследования для катушек с квадратным, пластинчатым шаблоном и другим диаметром провода.

Статья написана при поддержке гранта РФФИ 19-48-480001 «Разработка, исследование и оптимизация энергосберегающих электротехнических и электроприводных автоматизированных комплексов для плазменных, электрометаллошлаковых и индукционных технологий и агрегатов».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лысов А.Н., Винниченко Н.Т., Лысова А.А. Прикладная теория гироскопов: учебное пособие. Ч. 3. Челябинск: Изд. центр ЮУрГУ, 2009. 255 с.
2. Ларин В.П. Технология намотки в приборо- и электроаппаратостроении: учебное пособие. СПб.: СПбГУАП, 2003. 56 с.
3. Литвиненко А.М., Баранов Д.С. К определению погрешностей изготовления катушек на намоточном станке с электрическим приводом // Вести высших учебных заведений Черноземья. 2019. № 1. С. 43-48.
4. Новиков В.А., Савва С.В., Татаринцев Н.И. Электропривод в современных технологиях: учебник для студентов вузов. М.: Академия, 2014. 400 с.
5. Еремин А. Новейшие решения по намотке катушек от компании FUR // Технологии в электронной промышленности. 2020. № 6. С. 50-53.
6. Литвиненко А.М., Баранов Д.С., Евтушенко Е.Р. Исследование особенностей изготовления катушек на намоточном станке с электрическим приводом // Вести высших учебных заведений Черноземья. 2019. № 2. С. 30-36.
7. Литвиненко А.М., Баранов Д.С. Адаптивная система управления электроприводом намоточного станка // Электротехника. 2020. № 10. С. 31-36.
8. Litvinenko A.M., Baranov D.S. An adaptive control system for a winding-machine electric drive // Russian Electrical Engineering. 2020. T. 91. No. 10. Pp. 620-625. doi: 10.3103/S1068371220100077
9. Study of Thickness Control of Strip Head Section Using Mathematical Simulation Methods / V.R. Hramshin, A.S. Karandaev, A.A. Radionov, R.R. Hramshin // Вестник ЮУрГУ. Серия: Энергетика. 2013. Вып. 13. № 1. С. 144-151.
10. Храмшин В.Р. Разработка и внедрение автоматизированных электроприводов и систем регулирования технологических параметров широкополосного стана горячей прокатки // Вестник ИГЭУ. 2012. № 6. С. 100-104.
11. Система автоматического регулирования натяжения и пегли с перекрестными связями для широкополосного стана горячей прокатки / А.С. Карандаев, С.А. Евдокимов, А.А. Чертоусов, В.Р. Храмшин // Изв. вузов. Электромеханика. 2004. №2. С. 21-27.
12. Храмшин В.Р. Разработка электротехнических систем непрерывной группы стана горячей прокатки при расширении сортамента полос: дис. ... д-ра техн. наук; Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова. Магнитогорск, 2013. 393 с.
13. Hayakwong E., Kinnaree V., Bunlaksanunusorn C. Two-phase induction motor drive improvement for PV water pumping system // 19th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), IEEE. 2016. 6 p.
14. Мещеряков В.Н., Белоусов А.С. Разработка алгоритма управления трехфазным инвертором двухфазного электропривода для снижения числа коммутаций ключевых элементов // Вестник ИГЭУ. 2019. №3. С. 49-61. doi: 10.17588/2072-2672.2019.3.049-061
15. Пат. 2704493 Российская Федерация, МПК B65H 54/08 (2006.01). Электропривод намоточного станка / А.М. Литвиненко, Д.С. Баранов; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет». №2018125577; заяв. 11.07.2018; опубл. 29.10.2019, Бюл. №31.
16. Burkovsky V.L., Litvinenko A.M., Baranov D.S. Optimal Control of Specialized Electric Drive // International Russian Automation Conference (RusAutoCon). IEEE, 2020. Pp. 16-21. doi: 10.1109/RusAutoCon 49822.2020.9208143.
17. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием: учебник для студ. высш. учеб. заведений. М.: Издательский центр «Академия», 2006. 272 с.
18. 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. doi: 10.18503/2311-8318-2018-3(40)-4-11
19. Виноградов Н. В., Виноградов Ю.Н. Как самому рассчитать и сделать электродвигатель. 3-е изд. М.: Энергия, 1974. 168 с.
20. Мещеряков В.Н., Данилов В.В. Ограничение колебаний электромагнитного момента асинхронного двигателя при скалярном частотном управлении // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2018. Т. 18. №. 3. С. 88-97. doi: 10.14529/power180311
21. Development of a Control Algorithm for Three-Phase Inverter in Two-Phase Electric Drives Reducing the Number of Commutations / A.S. Belousov, V.N. Meshcheryakov, S. Valtchev, O.V. Kryukov // 1st International Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA). IEEE, 2019. Pp. 444-449. doi: 10.1109/SUMMA48161.2019.8947487

Поступила в редакцию 06 октября 2021 г.

INFORMATION IN ENGLISH

SIMULATION OF WINDING MACHINE ELECTRIC DRIVE CONTROL SYSTEM FOR SUBSEQUENT ADJUSTMENT

Aleksey S. Belousov

Postgraduate Student, Electric Drive Department, Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia, 011bas962@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-9464-2260>

Viktor 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>

Denis S. Baranov

Postgraduate Student, Department of Electric Drive, Automation and Control in Technical Systems, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia, den.baranov.1993.@bk.ru

The paper is concerned with electric drive control system simulation for the winding machine SNP-0.1-150V "Pulsar" in order to determine the regulators parameters for subsequent adjustment. The electric drive consists of two adjustable asynchronous motors of the winding device and the tension roller, united by a common control system. They ensure that the coil wire of the electric micromachine is wound on a predetermined template while maintaining tension. The technological process of winding a thin wire without a common circuit is characterized by a high percentage of rejects up to 50%, the main reason for which is wire breakage due to high tension. The control system must maintain as little tension as possible while maintaining the same winding speed. This is achieved by fine tuning the regulators, which will vary depending on the templates, diameter and the wire material. Setting up through several iterations when changing the wire will take a long time and will lead to a large rejection of the wound wire. It is possible to reduce these negative processes by preliminary modeling of the technological process, the model of which is developed in this article. It shows the development of the model in stages, starting from the calculation of electric motors, and up to the construction of a general contour of wire tension. One of the most interesting research issues is the fact that the tension roller is driven by a two-phase induction motor with a hollow rotor. It has a low moment of inertia that makes it possible to instantly react to any change in the set speed and load torque. However, due to its low prevalence, the regulation of this type of motors has not been fully investigated and consisted rather in the development of new control algorithms and types of pulse-width modulation, than in their application in closed multi-loop control systems of real technological processes.

Keywords: simulation, variable speed drive, control system, winding machine, thin wire, process technology, tension control, two-phase induction motor, three-phase asynchronous motor, vector control, closed loop.

REFERENCES

1. Lysov A.N., Vinichenko N.T., Lysova A.A. *Prikladnaya teoriya giroskopov* [Applied theory of gyroscopes]. Chelyabinsk, SUSU Publ., 2009. 255 p. (In Russian)
2. Larin V.P. *Tekhnologiya namotki v priboro- i elektroapparatoiroenii* [Winding technology in instrument and electrical apparatus construction]. Saint Petersburg, SPbSUAI Publ. 2003. 56 p. (In Russian)
3. Litvinenko A.M. Baranov D.S. To the determination of errors in the manufacture of coils on a winding machine with an electric drive. *Vesti vysshikh uchebnykh zavedeniy Chernozemya* [News of Higher Educational Institutions of the Chernozem Region], 2019, no. 1, pp. 43-48. (In Russian)
4. Novilov 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)
5. Eremin A. The latest coil winding solutions from FUR. *Tekhnologii v elektronnoy promyshlennosti* [Technologies in the electronics industry], 2020, no. 6, pp. 28-31. (In Russian)
6. Litvinenko A.M. Baranov D.S., Evtushenko E.R. The research of the features of the manufacture of coils on a winding machine with an electric drive. *Vesti vysshikh uchebnykh zavedeniy Chernozemya* [News of Higher Educational Institutions of the Chernozem Region], 2019, no. 2, pp. 30-36. (In Russian)
7. Litvinenko A.M. Baranov D.S. Adaptive control system for the electric drive of the washing machine. *Elektrotehnika* [Electrical engineering], 2020, no. 10, pp. 31-36. (In Russian)
8. Litvinenko A.M., Baranov D.S. An adaptive control system for a winding-machine electric drive. 2020 Russian Electrical Engineering. 2020. Vol. 91. No. 10. Pp. 620-625. doi: 10.3103/S1068371220100077
9. Hramshin V.R., Karandaev A.S., Radionov A.A., Hramshin R.R. Study of Thickness Control of Strip Head Section Using Mathematical Simulation Methods. *Vestnik YuUrGU. Seriya: Energetika* [Bulletin of South Ural State University. Series: Power Engineering], 2013, vol. 13, no. 1, pp. 144-151.
10. Hramshin V.R. Developing and Implementation of Automated Electric Drive and Systems of Controlling the Process Parameters of Wide-Strip Hot Rolling Mill. *Vestnik IGEU* [Bulletin of Ivanovo State Power Engineering University], 2012, no. 6, pp. 100-104. (In Russian)
11. Karandaev A.S., Yevdokimov S.A., Chertousov A.A., Hramshin V.R. System of Automatic Control of Strain and Height of Loops with Cross Couplings for Thick-Gage Hot Rolling Mill. *Izv. Vuzov. Elektromekhanika* [HEIs News. Electrical engineering], 2004, no.2, pp. 21-27. (In Russian)
12. Hramshin V.R. *Razrabotka elektrotekhnicheskikh sistem nepreryvnoy gruppy stana goryachey prokatki pri rasshirenii sortamenta polos.* Doct. Diss. [Development of electrotechnical systems of continuous hot rolling mill group when expanding assortment of bands. Doct. Diss.]. Magnitogorsk, 2013. 360 p.
13. Hayakwong E., Kinnare V., Bunlaksanunusorn C. Two-phase induction motor drive improvement for PV water pumping system. 19th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). IEEE, 2016, pp. 1-6.
14. Meshcheryakov V.N., Belousov A.S. Development of a control algorithm for three-phase inverter of two-phase electric drive to reduce the number of switching. *Vestnik IGEU* [Bulletin of the Ivanovo State Technical University], 2019, no. 3, pp. 49-61. DOI 10.17588/2072-2672.2019.3.049-061. (In Russian)
15. Litvinenko A.M., Baranov D.S. *Elektroprivod namotchnogo stanka* [Electric drive of the winding machine]. Patent RF no. 2704493, 2019.

16. Burkovsky V.L., Litvinenko A.M., Baranov, D.S. Optimal Control of Specialized Electric Drive. 2020 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). 2020, pp. 16-21. doi: 10.1109/RusAutoCon 49822.2020.9208143
17. Sokolovsky G.G. *Elektroprivody peremennogo toka s chastotnym regulirovaniem* [AC drives with frequency regulation]. Moscow, Academiya Publ., 2006. 272 p. (In Russian)
18. Meshcheryakov 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 komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2018, no. 3(40), pp. 4-11. doi: 10.18503/2311-8318-2018-3(40)-4-11. (In Russian)
19. Vinogradov N.V., Vinogradov Yu.N. *Kak samomy rasschitat i sdelat elektrodvigatel* [How to calculate and make an electric motor yourself]. Moscow, Energija Publ., 1974. 168 p. (In Russian)
20. Meshcheryakov V.N., Danilov V.V. Limiting electromagnetic torque fluctuations of an induction motor with scalar control. *Vestnik Juzhno-Uralskogo Gosudarstvennogo Universiteta* [Bulletin of the South Ural State University], 2018, vol. 18, no. 3, pp. 88-97. doi: 10.14529/power180311. (In Russian)
21. Belousov A.S. et al. Development of a Control Algorithm for Three-Phase Inverter in Two-Phase Electric Drives Reducing the Number of Commutations / A.S. Belousov, V.N. Meshcheryakov, S. Valtchev, O.V. Kryukov. 2019 1st International Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA). IEEE, 2019, pp. 444-449. doi: 10.1109/SUMMA48161. 2019.8947487

Белоусов А.С., Мещеряков В.Н., Баранов Д.С. Моделирование системы управления электропривода намоточного станка для последующей наладки // Электротехнические системы и комплексы. 2022. № 1(54). С. 11-18. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-1\(54\)-11-18](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-1(54)-11-18)

Belousov A.S., Meshcheryakov V.N., Baranov D.S. Simulation of Winding Machine Electric Drive Control System for Subsequent Adjustment. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2022, no. 1(54), pp. 11-18. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-1\(54\)-11-18](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-1(54)-11-18)

Амангалиев Е.З.¹, Сарваров А.С.², Косматов В.И.², Петушков М.Ю.², Омельченко Е.Я.²¹Алматинский университет энергетики и связи им. Г.Д. Даукеева, Алматы, Республика Казахстан²Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

ЭЛЕКТРОМОБИЛЬНЫЙ И ГИБРИДНЫЙ ТРАНСПОРТ: СИЛОВЫЕ СХЕМЫ, ОБОРУДОВАНИЕ, ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

В настоящее время в мировой практике автомобилестроения сложилась устойчивая тенденция применения электропривода для движения транспорта вместо двигателей внутреннего сгорания (ДВС) или в гибридных системах, сочетающих электро- и ДВС-приводы в различных долях «участия» в создании крутящего момента. Проведен анализ силовых структур наиболее развитых, имеющих практическое применение тяговых систем электро- и гибридного транспорта (электромобилей, гибридов с последовательной, параллельной и последовательно-параллельной силовыми установками). Дана оценка эксплуатационных возможностей рассмотренных систем в зависимости от степени электрификации гибридных автомобилей и влияния их на окружающую среду. Рассмотрен широкий круг публикаций в области создания стартер-генераторов и тяговых электродвигателей для гибридных автомобилей, начиная от микрогибридов и заканчивая полными гибридами, а также непосредственно электромобилей. Из них следует, что асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором и синхронные машины с электромагнитным возбуждением традиционно преобладают в разработках, доведенных до практического применения. Как наиболее перспективными, рассматриваются вентильная машина с постоянными магнитами, бесконтактная машина, синхронная машина с постоянными магнитами, вентильная индукторная машина с самовозбуждением и синхронная реактивная машина с независимым возбуждением. В качестве основных модулей силовой электроники рассматриваются в электромобилях только АИН, в гибридных – система УВН-АИН, выполненные по трехфазной мостовой схеме. Проведено сравнение основных характеристик традиционных свинцово-кислотных батарей и современных литиево-ионных, которые рассматриваются как наиболее перспективные. Отмечается, что ограниченность запасов лития требует искать новые направления в сфере создания эффективных накопителей энергии. Рассматриваются возможность и проблемы применения емкостных накопителей энергии, включая суперконденсаторы, как наиболее перспективные накопители. Отмечается также целесообразность дальнейшего развития концепции применения в электромобилях бортовых электрогенерирующих топливных элементов с использованием водородосодержащего топлива. Для оценки ситуации в России приведены показатели, характеризующие масштабность задач по развитию электротранспорта в стране в период 2020-2031 годов. Они приведены в документах Минэкономразвития РФ и нашли отражение в данной статье. В целом концепцию развития автомобилестроения сегодня целесообразно связать с водородными технологиями.

Ключевые слова: экологичность, силовые схемы, автомобильный электро- и гибридный транспорт, электропривод, ДВС-привод, электродвигатели, генераторы, силовая электроника, инверторы, выпрямители, накопители электроэнергии, аккумуляторы, конденсаторы, топливные элементы, концепция развития.

ВВЕДЕНИЕ

Начало развития электротранспорта связано с разработкой первых электродвигателей и элементов электропитания сначала на основе гальванических, а затем свинцово-кислотных аккумуляторных батарей. В России начало электродвижения отмечается со времени пробного испытания двигателя постоянного тока на небольшом судне на Неве в 1838 году. Двигатель был создан в 1834 году российским академиком Б.С. Якоби. В целом мировая история развития электромобилей начинается с 1835 года, когда шотландец Роберт Андерсон построил электромобиль-модель, который считается первым в истории [1].

Популярность и практическое применение электромобили получили в последнем десятилетии XIX века. Однако бурный рост в начале XX века производства автомобилей с двигателями внутреннего сгорания (ДВС) быстро вытеснил электромобиль из системы автомобильного транспорта практически на 100 лет.

Сегодня около 80% выбросов вредных веществ в крупных городах приходится на долю автомобильного транспорта. При этом мало кто обращает внимание на то, что для сжигания 1 кг бензина необходимо затратить 2,9 кг кислорода [1], что в масштабах планеты приводит к расходу около 90% всего кислорода, выра-

батываемого наземной растительностью. Таким образом, проблема экологичности автотранспорта приобретает все большую актуальность. Особенно жестко она обострилась в крупных мегаполисах. По этой причине в XXI веке в мире сложилась устойчивая тенденция по созданию экологичных видов транспорта и в первую очередь электромобильного.

Таким образом, традиционный автомобильный транспорт с ДВС сегодня приобретает быстроразвивающегося конкурента в лице электромобиля и гибридного аналога, в котором сочетается тяговый электропривод с традиционным ДВС-приводом. По сути, как отмечается во многих источниках информации [1-5], сегодня наблюдается переломный момент в автомобильных технологиях в сторону электродвижения.

СИЛОВЫЕ СХЕМЫ ТЯГОВЫХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРО- И ГИБРИДНОГО ТРАНСПОРТА

Силовая энергетическая установка традиционного автомобиля состоит только из ДВС, при этом электрический стартер и генератор собственных нужд не входят в состав силовой установки, так как не реализуют главную функцию транспорта – движение.

В электромобиле силовая энергетическая установка состоит из одного или нескольких тяговых электродвигателей, при этом источником энергии является только аккумуляторная батарея (АБ) или другой накопитель энергии (рис. 1).

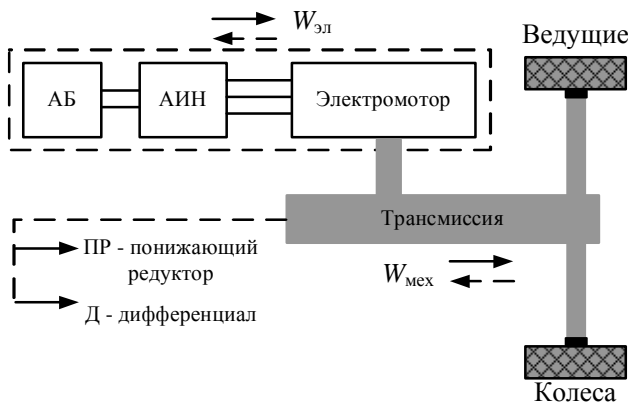


Рис. 1. Схема силовой установки электромобиля

Управляющим звеном в этой системе является автономный инвертор напряжения (АИН), если в качестве электродвигателя применяется трехфазный асинхронный или синхронный электродвигатели. В настоящее время они имеют широкое применение [6].

Долгое время тяговый электропривод в стране ассоциировался, прежде всего, с двигателями постоянного тока с реостатным регулированием с использованием релейно-контакторной аппаратуры [7]. Широтно-импульсные преобразователи (ШИП) постоянного тока и АИН с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) начали внедряться сравнительно недавно. Их применение позволяет осуществить качественное и экономичное регулирование момента тягового электропривода.

Основными препятствиями в области современного электромобилестроения являются:

- высокие стоимостные и массогабаритные показатели аккумуляторных батарей и невысокие удельные энергетические характеристики, обусловленные недостаточным уровнем развития технологий в области их создания;
- отсутствие развитой инфраструктуры станций для зарядки аккумуляторов и других накопителей энергии;
- длительное время зарядки аккумуляторных батарей (до 6-8 часов);
- ограниченный диапазон пробега транспортного средства между подзарядками;
- недостатки, обусловленные также ограниченным ресурсом аккумуляторных батарей, опасными для жизни напряжениями в системе электропитания, отсутствием научно обоснованных последствий для окружающей среды при массовой утилизации.

Для создания развитой сети зарядных станций батарей электромобилей необходим уточненный прогноз по их загрузке, оценка требуемых дополнительных мощностей по производству и поставке электроэнергии.

Безусловно, отмеченные препятствия и проблемы в этой области будут решаться быстро в тех странах и автомобильных компаниях, где уже накоплен определенный опыт по проектированию и высокотехнологичному производству электромобилей, сделаны соответствующие инвестиции и осуществляется государ-

ственная поддержка данного направления, имеется законодательная база и налажен контроль по выполнению нормативных требований по ограничению вредных выбросов в окружающую среду.

Гибридный аналог электромобиля, несмотря на заметное усложнение силовой установки, получил сегодня более широкое распространение в классе автомобилей, как наилучшее промежуточное решение [8]. На их основе удастся сгладить явно выраженные недостатки как электромобиля, так и автомобиля на основе ДВС, а именно в 2 раза снизить выбросы и на 20-30% экономить топливо при сохранении пробега без дозаправки (дозарядки). На рис. 2 приведены наиболее широко применяемые схемы гибридных силовых установок (ГСУ): последовательная схема, параллельная и последовательно-параллельная.

В рассматриваемых силовых схемах электродвигатели и генераторы представлены традиционными трехфазными машинами переменного тока.

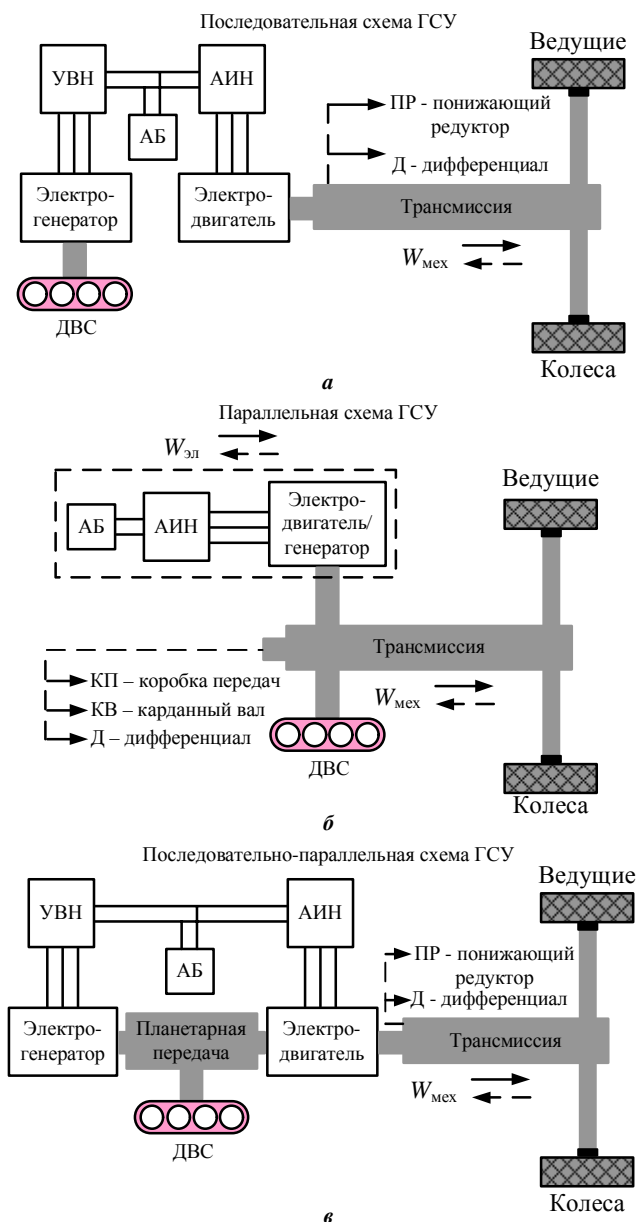


Рис. 2. Схемы гибридных силовых установок автотранспорта

В последовательной схеме ДВС может работать в заведомо экономичном режиме (минимальный расход топлива), вращая только генератор. Управление электроприводом ведущих колес осуществляется применением двухзвеного преобразователя частоты (ПЧ) по системе «управляемый выпрямитель напряжения» (УВН) – «автономный инвертор напряжения» (АИН), что обеспечивает требуемые силовые и скоростные диапазоны транспортного средства, включая торможение с рекуперацией энергии в АБ. Механическая трансмиссия в последовательной схеме ГСУ является наиболее простой. Она состоит из понижающего редуктора и дифференциала. В качестве недостатка следует отметить пониженный КПД передачи энергии от ДВС к ведущим колесам [8]. Это обусловлено двойным преобразованием энергии в системе «генератор-двигатель». Гибриды последовательного типа имеют преимущества в городском цикле движения, когда режимы разгона и торможения проявляются наиболее часто.

В параллельной схеме электромотор и ДВС могут работать одновременно через трансмиссию на ведущие колеса, что позволяет при необходимости суммировать их мощности. В условиях пониженной потребности в усилиях на ведущие колеса, а также при торможении электромотор переводится в режим генератора, что позволяет осуществлять подзарядку АБ. В городском режиме можно осуществлять движение только от аккумуляторной батареи. Также следует отметить, что данная система имеет более высокий КПД передачи энергии от ДВС к ведущим колесам. Однако доля энергии, запасаемая в АБ от генераторного режима электромотора, возвращается к ведущим колесам через двойное преобразование.

Недостатком данной системы является обязательное усложнение трансмиссии, так как ДВС требует применения ступенчатой механической передачи. Возможен вариант присоединения электромотора к другой паре колес, которые становятся ведущими от электромотора [5]. Это позволяет упростить трансмиссию от ДВС. Необходимо отметить, что в параллельной схеме периодически ведущая роль отводится ДВС, когда необходима подзарядка АБ от стационарного источника. Гибриды параллельного типа имеют преимущества при работе на магистральных маршрутах [8].

Последовательно-параллельная схема ГСУ в составе трансмиссии дополнительно содержит планетарную передачу, что безусловно приводит к её усложнению. С другой стороны, в данной схеме удастся в значительной степени использовать достоинства ДВС и электродвигателя, нивелируя их недостатки и, что очень важно, при их совместной работе повышается запас хода и увеличивается общий КПД силовой установки. Анализ предельных механических характеристик ДВС, проведенный в [9], показывает, что при решении задач оптимизации по минимуму потребления топлива необходимо осуществить выбор тягового электродвигателя с широкой зоной поддержания постоянства мощности. При объединении характеристик ДВС и электродвигателя можно получить результирующую механическую характеристику, близкую к идеальной.

Гибридные автомобили, использующие последовательно-параллельную схему, носят название Full Hybrid (дословно – полный гибрид). Соединенные через планетарный редуктор ДВС и ЭД могут передавать всю мощность на ведущие колеса. Наиболее известным представителем гибридных автомобилей с последовательно-параллельной схемой является компания Toyota и ее система Hybrid Synergy Drive (HSD) [2].

Необходимо также отметить, что система может работать раздельно, то есть как по схеме последовательного гибрида, так и по схеме параллельного.

В целом, как отмечается в [1], около 10% мощности ДВС современных автомобилей может обеспечить поддержание постоянной скорости 50 км/ч и в то же время 90% мощности используется только в режимах ускорения или движения на высокой скорости. Таким образом, совместное действие двух различных по природе создания крутящего момента двигателей в составе гибридного автомобиля может значительно усилить его возможности в широком скоростном диапазоне.

Целесообразно выдвинуть гипотезу: *«Совместное действие двух силовых установок может дать требуемый результат во многих случаях при заметно пониженной суммарной мощности ДВС и электродвигателя».*

Задача определения минимизированной суммарной мощности и соотношения мощностей ДВС и тягового электродвигателя требует исследования в рамках многокритериальной оптимизации.

КЛАССИФИКАЦИЯ ПО СТЕПЕНИ ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ

В электромобилях, как известно, нет отдельных генераторов, так как основным источником питания в них является аккумуляторная батарея, а тяговый электродвигатель работает как генератор только при торможении.

В гибридных автомобилях силовые установки имеют различные соотношения мощностей электрических машин и ДВС. По степени электрификации автомобилей можно разделить на несколько групп.

Наименее электрифицированным является традиционный автомобиль с ДВС, в котором обычно отдельными электрическими машинами являются стартер и генератор, в качестве накопителя – низковольтная аккумуляторная батарея напряжением 12 В.

Гибридные автомобили имеют широкий диапазон степени электрификации. На самой низкой ступени этого показателя находятся микрогибриды, затем по мере повышения доли использования электрической энергии выделяют следующие группы [4]:

- мягкий (среднегибридный) гибрид (MHEV);
- полный гибрид (FHEV);
- гибридный автомобиль с подзарядкой от сети «Plug-in hybrids» (PHEV);
- электромобиль с возможностью увеличения запаса хода (REV).

Микрогибриды, находясь на низшем уровне классификации, больше следует относить к обычным автомобилям. Они отличаются наличием интеллектуальной системы, позволяющей отключать генератор на этапах разгона, снижая нагрузку на ДВС, и вырабатывать электроэнергию при замедлении, оказывая тормозное

действие. В источниках информации существуют разноречивые мнения о микрогибридах, как особой группе гибридных автомобилей, к которой формально приписываются функции системы «Start-Stop», которая автоматически глушит двигатель при остановках, дополнительно снижая расход топлива и выбросы продуктов сгорания в атмосферу. Отдельным микрогибридам приписывается возможность реализации функции рекуперативного торможения.

Мягкий (среднегибридный) гибрид (MHEV) в электрической части содержит одну электрическую машину под названием «стартер-генератор», позволяющей реализовать функции глушения ДВС до полной остановки. При торможении в этой системе вырабатывается электрическая энергия для подзарядки АБ и обеспечения внутренних потребителей электроэнергией. При разгоне система «Start-Stop», будучи более развитой, тратит энергию для увеличения крутящего момента на валу ДВС, то есть электрическая машина позволяет улучшить динамику автомобиля. В этой системе имеется 2 накопителя энергии: батарея 12 В и высоковольтная батарея 48 В, позволяющая в большей степени принять энергию рекуперативного торможения и вырабатывать значительно большую мощность при поддержке ДВС. Следует отметить, что среднегибридный силовой агрегат не позволяет обеспечить самостоятельную электрическую тягу автомобиля.

Полный гибрид (FHEV) позволяет реализовать движение транспортного средства за счет совместного действия электродвигателя и ДВС, а также отдельно при работе одного из двигателей. В автомобиле этой группы установлены электродвигатель достаточно большой мощности, высоковольтная АБ большой емкости накопления и более мощная силовая электроника.

Одним из удачных вариантов полного гибрида является электрополноприводный гибрид, в котором ДВС и электродвигатель приводят во вращение отдельно передние и задние колеса [10].

Полный гибридный автомобиль позволяет преодолевать короткие расстояния на городских скоростях без запуска ДВС и, соответственно, без расхода топлива.

При наличии эффективной системы рекуперации энергии от торможения нет необходимости заряжать гибриды от внешнего источника. ДВС в этих системах могут быть использованы для подзарядки АБ.

Гибридный автомобиль с подзарядкой от сети «Plug-in hybrids» (PHEV) обладает всеми преимуществами электроавтомобиля. Главным его недостатком остается ограниченность пробега между интервалами заряда от сети и потребностью обустройства сети зарядных станций. При использовании заряда АБ движение транспортного средства остается возможным за счет ДВС.

Электроавтомобиль с возможностью увеличения запаса хода (REV) также является гибридным автомобилем, хотя базовой основой является электроавтомобиль, в котором используется ДВС только для зарядки аккумулятора. ДВС при этом не может быть использован в качестве основного источника энергии.

ЭЛЕКТРОМОТОРЫ В ГИБРИДНЫХ УСТАНОВКАХ

Стартер-генераторы, являясь совмещенными электромеханическими преобразователями, заменяют две электрические машины – электродвигатель (стартер)

и генератор. Попытка их совмещения вызвана необходимостью снижения массогабаритных показателей гибридного транспорта. В электрическом транспорте обычно применяют две электрические машины (стартер и генератор) практически одинаковой мощности. Однако эти машины имеют совершенно различные механические и электромеханические характеристики. Стартер, как известно, работает кратковременно при относительно малой скорости, потребляя значительные величины тока для создания больших моментов в стартовом режиме, а генератор, наоборот, создает малые моменты сопротивления, работая в длительном режиме при высокой скорости.

Для уменьшения величины тока в стартерном режиме и габаритов стартер-генератора в бортовой сети, наряду с напряжением 12 В, в мягких гибридах создается напряжение 48 В. В полных гибридах применяются, как уже отмечалось, более мощные электродвигатели, позволяющие наряду со стартовым режимом работать при движении вместе с ДВС или самостоятельно преодолевать определенные расстояния.

В [11] проведен анализ разработок в области создания стартер-генераторов для гибридных автомобилей любого исполнения, начиная от микрогибридов и заканчивая полными гибридами. В них в качестве базовых приняты следующие электрические машины:

- асинхронная машина с короткозамкнутым ротором;
- синхронная машина с электромагнитным возбуждением;
- вентильная машина с постоянными магнитами;
- бесконтактная машина;
- синхронная машина с постоянными магнитами;
- вентильная индукторная машина с самовозбуждением.

Эти машины перечислены в последовательности уменьшения количества разработок на их основе.

Асинхронные и синхронные машины, являясь традиционными, продолжают оставаться основными в отечественном тяговом электроприводе. В материалах, приведенных в [12], отмечается, что крупные зарубежные компании, осуществляющие массовое производство электроавтомобилей и гибридных автомобилей, применяют в первую очередь СД с постоянными магнитами и АД с медной короткозамкнутой обмоткой ротора. Предполагается рост стоимости СД с постоянными магнитами, так как наблюдается непрерывный рост стоимости редкоземельных постоянных магнитов. В целом необходимо отметить, что преобладающим в применениях в электротранспорте пока остается АД с короткозамкнутым ротором [6].

В то же время необходимо отметить рост публикаций, в которых отражены результаты исследований, открывающие новые возможности нетрадиционных электрических машин, таких как *вентильная индукторная машина* с различными способами возбуждения (самовозбуждением, магнитоэлектрическим возбуждением и независимым возбуждением) [7, 9, 13-17] и *синхронная реактивная машина с независимым возбуждением* [18-28].

Вентильно-индукторный привод (ВИП) представляется во многих публикациях в качестве перспективного типа тягового электропривода. Наиболее обстоятельно его возможности обобщены в [9], где на основе анализа результатов длительных исследований особо выделяется **ВИП с независимым возбуждением**. Отмечается, что данная машина является передовой отечественной разработкой, которая может стать базовой для перевооружения электрического транспорта, для создания отечественных гибридных транспортных средств нового поколения на основе объединения достижений электромеханики, силовой и управляющей электроники с использованием сетевых технологий. ВИП в сравнении с традиционными АД и СД с электромагнитным возбуждением и СД с постоянными магнитами обладают рядом достоинств [9, 16-18]:

- простота, технологичность, ремонтпригодность и устойчивость к механическим воздействиям, существенно меньшая стоимость по сравнению с СД с постоянными магнитами;

- широкий диапазон рабочих скоростей – от нескольких об/мин до 10 тыс.;

- замечательные регулировочные возможности, обеспечивающие типовую тяговую характеристику транспортного средства и широкий диапазон регулирования в зоне ослабления поля – до 10:1.

В то же время в [7] отмечается, что вентильно-индукторная машина с независимым возбуждением при всех отмеченных преимуществах еще не доработана до оптимальной конструкции и сложнее в изготовлении по сравнению с классической вентильно-индукторной машиной с самовозбуждением. В этой связи они пока не находят массового применения в качестве тяговых электродвигателей по многим причинам [12].

Синхронная реактивная машина с независимым возбуждением (СРМНВ) является не менее перспективной системой тягового электропривода, имеющая в сравнении с АД увеличенный удельный момент на 30-40%, облегченный тепловой режим за счет «холодного» ротора, а благодаря простоте конструкции ротора и малым затратам меди становится дешевле на 15-25% [19]. О больших потенциальных возможностях этой машины отмечается и в зарубежных публикациях, как, например, [20, 21]. В отечественных публикациях по тематике СРМНВ [22-31] приведены результаты исследований, посвященные вопросам теории и практики СРМНВ в плане применения их в тяговом электроприводе, как наиболее перспективного типа.

Достоинства СРМНВ и ВИП с независимым возбуждением во многом совпадают. В частности, наряду с простотой конструкции и повышенной надежностью, отмечается высокая перегрузочная способность по моменту (до 10 крат) [19, 24, 25, 30], повышенная *живучесть и технологичность изготовления*, обусловленные возможностью изготовления в корпусе серийного АД с простой однослойной обмоткой статора. Кроме этого, выделяются такие преимущества, как простая система управления преобразователем, малые величины электромагнитной и механической инерции при управлении по каналам якоря и возбуждения, а также возможность получения высоких угловых скоростей благодаря большой механической прочности ротора.

В целом целесообразно отметить, что в современном гибридном и электрическом транспорте наибольшее развитие получил асинхронный короткозамкнутый двигатель, который по совокупности эксплуатационных показателей и соотношению цена-качество, благодаря развитию силовой электроники, реализующей частотное регулирование АД, систем и алгоритмов микропроцессорного управления удовлетворяет основным требованиям, предъявляемым тяговому электроприводе.

СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

Современная силовая электроника, получив стремительное развитие благодаря широкому применению в промышленных электроприводах и технологических установках, успешно начала внедряться в современный электротранспорт и во многие области жизнедеятельности. При этом электрооборудование/гибридные автомобили становятся самыми массовыми потребителями приборов силовой электроники для тяговых электроприводов, в системах быстрой зарядки и управления накопителями энергии.

В основе элементной базы преобразователей лежат современные полностью управляемые транзисторные/тиристорные ключи (IGBT, GCT, IGCT, SIT и др.). Самым динамичным сегодня является рынок IGBT силовых модулей. Его расширение происходит и за счет применения их в электрооборудовании/гибридном транспорте.

Основными функциональными модулями силовой автономной электроники, как это видно из схем силовых установок электрооборудования/гибридных автомобилей (рис. 1 и 2), являются «автономный инвертор напряжения» (АИН) и «управляемый выпрямитель напряжения» (УВН). В электрооборудовании используются только АИН, а в гибридных – система УВН-АИН. Все модули выполнены по трехфазной мостовой схеме (рис. 3).

Целесообразно подчеркнуть, что управляемый выпрямитель напряжения и автономный инвертор напряжения являются **обратимыми преобразователями напряжения (ОПН)** [32], то есть могут работать в выпрямительном и инверторном режиме, передавая энергию из сети переменного тока в цепь постоянного и обратно, то есть меняя направление потока мощности. На основе двух ОПН созданы современные рекуперирующие преобразователи частоты (рис. 4). Необходимо отметить, что применительно к современным традиционным трехфазным двигателям силовая электроника на основе трехфазных модулей является эффективным средством управления процессами электро-механического преобразования энергии.

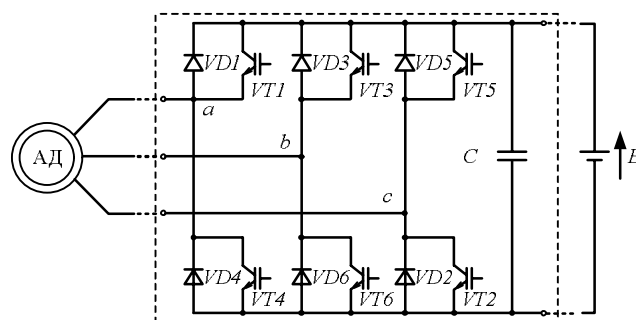


Рис. 3. Схема трехфазного модуля УВН/АИН

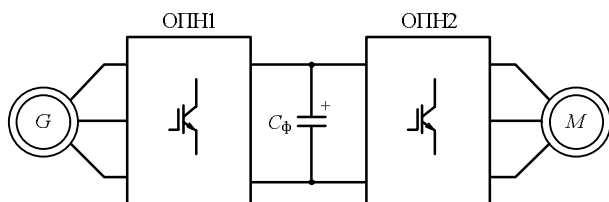


Рис. 4. Структура системы УВН-АИН

ТЯГОВЫЕ АККУМУЛЯТОРНЫЕ БАТАРЕИ И ДРУГИЕ
НАКОПИТЕЛИ И ИСТОЧНИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Аккумуляторные батареи в транспортных средствах являются традиционными накопителями электрической энергии и в зависимости от назначения (условий эксплуатации) к ним предъявляются различные требования. В традиционном автомобильном транспорте они изначально применялись в качестве стартерных. Такие АБ, как известно, весьма чувствительны к глубокому разряду, приводящему к безвозвратной частичной потере емкости. По этой причине их нельзя использовать в качестве тяговой батареи.

Целесообразно отметить, что основным требованием к тяговым АБ является устойчивость к глубокому разряду с поддержанием номинального напряжения до практически полной разрядки. В процессе работы они в среднем разряжаются до 80% от своей номинальной емкости и после зарядки восстанавливаются без потери емкости.

При создании современных тяговых батарей ставятся задачи по повышению максимальных показателей плотности энергии, запасенной на единицу объема, без существенного увеличения стоимостных показателей [1] и повышения количества циклов перезарядки, то есть длительности эксплуатации. Известно, что старые технологии свинцово-кислотных батарей обеспечивают удельную энергоемкость на уровне 90 Вт·ч/кг, а литиево-ионные элементы сегодня обеспечивают удельную энергоемкость, равную 175 Вт·ч/кг. Теоретический максимум для таких батарей определяется более чем в 300 Вт·ч/кг.

Литиевые АБ постоянно совершенствуются для применения в электромобилях и гибридах. В отношении их отмечаются следующие преимущества:

- высокая энергоемкость, позволяющая снизить габариты;
- быстрый заряд;
- надежная работа в режиме заряд-разряд.

В качестве недостатков обычно отмечают высокую стоимость, необходимость принятия дополнительных мер безопасности. Ограниченность запасов лития заставляет искать новые направления в сфере создания эффективных накопителей электрической энергии.

Емкостные накопители электрической энергии во многих публикациях рассматриваются в качестве альтернативных химических элементов [33] или им отводится вспомогательная роль приемника большой порции электроэнергии за короткое время при торможении с последующей отдачей в аккумуляторную батарею. При этом среди требований к емкостному накопителю выделяются следующие:

- напряжение емкостного накопителя при полном заряде должно в 2–3 раза превышать номинальное напряжение тягового двигателя, так как при разряде

батареи до половины от начального напряжения отдается 75% начальной энергии, а при более глубоком разряде, например при достижении 33% начального напряжения, отдается 91% изначально запасенной энергии [33].

– удельная по массе энергия – не менее 20000 Дж/кг;

- максимальный саморазряд не более 20% в сутки;
- срок службы – не менее 10 лет.

Увеличение удельной запасаемой энергии, как известно, возможно либо за счет увеличения емкости, либо за счет увеличения напряженности электрического поля конденсатора. В условиях ограничения напряжения заметное увеличение удельной по массе энергии емкостного накопителя может быть достигнуто применением суперконденсаторов.

Топливные элементы (ТЭ) являются одними из перспективных бортовых электрогенерирующих установок. Они предназначены для получения электрической энергии из водородосодержащего топлива в результате электрохимической реакции [2]. Проблемам развития водородной энергетики и совершенствованию ТЭ на основе водорода уделено всестороннее внимание в материалах [34], опубликованных в Вестнике РАН. Главная идея перехода на водородную энергетику: использование водорода как основного энергоносителя и ТЭ как генераторов электрической энергии.

ТЭ не способны накапливать электрическую энергию и предназначены для постоянной выработки электроэнергии. В них осуществляется прямое преобразование химической энергии топлива в электрическую. При этом побочными продуктами являются водяной пар и незначительное количество углекислого газа, не наносящие значительного вреда окружающей среде.

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОМОБИЛЬНОГО ТРАНСПОРТА

В зарубежном мире появление первых серийно выпускаемых электромобилей произошло 20 лет назад, когда заявила о себе всемирно известная компания Tesla Motors, финансируемая известным Илоном Маском, основателем ряда известных компаний, работающих в сфере высоких технологий [35]. В 2018 году компанией продано свыше 245 тыс. электромобилей. На фоне стремительного роста продаж, автопроизводители многих развитых стран демонстрируют заинтересованность в увеличении выпуска широкого спектра собственных электромобилей.

Состояние дел и перспективы в России к настоящему времени характеризуются тем, что постановлением правительства РФ от 7 ноября 2020 года утверждена дорожная карта, подготовленная департаментом стратегического развития и инноваций, в которую внесена важная позиция о развитии электротранспорта в стране. В ней сформулирована необходимость создания единого подхода к развитию электротранспорта путем утверждения методических рекомендаций субъектам России по их внедрению и развитию зарядной инфраструктуры, а также разработки мер по стимулированию использования электромобилей. Масштабность поставленной задачи нашла отражение в концепции по развитию производства и использованию

электротранспорта в России на период до 2030 года. Минэкономразвития РФ в этом документе сообщило первые параметры данной концепции: 1,5 млн электромобилей на дорогах страны к 2030 году, 20 000 зарядных станций, инвестиции в размере 418 млрд руб. Предпосылкой к этому явились проекты и первые образцы электромобилей Российского автопрома [36, 37]. Это электромобиль «Кама-1», созданный в 2020 году инженеринговым центром Санкт-Петербургского политехнического университета им. Петра Великого при индустриальном партнерстве КамАЗа, современный электромобиль Zetta, а также более ранние проекты и образцы 80-х годов прошлого века электромобилей АвтоВАЗа.

В энергетической стратегии России на период до 2035 года (ЭС-2035), принятой в июне 2020 года, особое внимание уделено водородной тематике. Определен комплекс ключевых мер по производству, транспортировке и потреблению водорода. Среди них необходимо выделить проблему стимулирования спроса на внутреннем рынке на топливные элементы с использованием водорода для транспорта.

Электромобилестроение в Казахстане характеризуется достижениями крупнейшего завода «СарыаркаАвтоПром» – лидера машиностроения в республике. Это первое в стране предприятие, которое наладило выпуск автомобилей, в том числе электробусов и электромобилей [38].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен анализ состояния современного уровня развития теории и практики электромобилестроения за рубежом и в России на основе изучения материалов, отраженных в научных публикациях, в интернет-ресурсах и средствах массовой информации.

Рассмотрен круг вопросов, отражающих уровень и основные направления развития электромобилестроения. Представлены основные силовые схемы тяговых систем электромобилей и гибридного транспорта и проведено обоснование их применения в зависимости от технических характеристик транспортных средств и условий эксплуатации.

Отмечены нерешенные на сегодняшний день проблемы, препятствующие интенсификации процессов в сфере производства электромобилей и гибридов для массового использования. Наиболее острыми являются проблемы с накопителями электрической энергии, обусловленные их высокой стоимостью и недостаточной надежностью в эксплуатации, отсутствием развитой инфраструктуры для их зарядки. Эти проблемы взаимосвязаны и не могут решаться в отдельности. При этом следует считать, что гибридные автомобили позволяют преодолеть эти временные проблемы.

Современное электромоторостроение для автомобильного транспорта продолжает оставаться ориентированным на производство традиционных асинхронных и синхронных электродвигателей. Для них сегодня создана развитая силовая электроника, реализующая частотное регулирование АД, устройств и алгоритмов микропроцессорного управления, удовлетворяющие основным требованиям, предъявляемым к тяговому электроприводу.

Перспективные по ряду эксплуатационных показателей нетрадиционные электроприводы, такие как вентильно-индукторный привод (ВИП) и приводы на основе синхронных реактивных машин с независимым возбуждением (СРМНВ), крайне медленно развиваются в направлении их доработки для широкого практического применения. Для них сегодня отсутствуют развитые для практического применения устройства управляющей и силовой электроники.

Концепция развития электротранспорта в России, разработанная в 2020 году на период до 2030 года, предусматривает осуществление резкого скачка в сфере производства электромобилей и создания зарядной инфраструктуры.

В качестве отдельной ветви в сфере электромобилестроения следует рассматривать создание электромобилей с применением топливных элементов в качестве бортовых электрогенерирующих установок с использованием водородосодержащего топлива.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ютт В.Е., Строганов В.И. Электромобили и автомобили с комбинированной установкой. Расчет скоростных характеристик: учеб. пособие. М.: МАДИ, 2016. 108 с.
2. Энергоустановки автомобильного транспорта с тяговым электроприводом: монография / Лежнев Л.Ю., Хрипач Н.А., Шустров Ф.А., Папкин Б.А., Петриченко Д.А., Иванов Д.А., Татарников А.П., Коротков В.С., Неверов В.А. Тамбов: ООО «Консалтинговая компания Юком», 2017. 204 с.
3. Тойлыбаев А.Е., Сейімхан С. Электромобиль – транспорт будущего // *Universum: Технические науки*. 2018. № 5(50). 4 с.
4. Дирекция по экономике отраслей ТЭК: информационная справка // *Электрический и гибридный автотранспорт в мире – Аналитический центр при Правительстве Российской Федерации*, декабрь 2013. 12 с.
5. Конструктивные схемы автомобилей с гибридными силовыми установками: учеб. пособие / Бахмутов С.В., Карунин А.Л., Круташов А.В., Ломакин В.В., Селифонов В.В., Карпухин К.Е., Баулина Е.Е., Урюков Ю.В. М.: МГТУ «МАМИ», 2007. 71 с.
6. Флоренцев С.Н., Изосимов Д.Б. Результаты и планы создания комплектного тягового электрооборудования электромеханических трансмиссий транспортных средств // *Труды VII Международной (XIII Всероссийской) научно-технической конференции по автоматизированному электроприводу*. Иваново: ИГЭУ, 2012. С. 438-445.
7. Состояние и перспективы развития городского гибридного и электрического тягового электропривода в России / А.С. Анучин, Д.И. Алямки, В.Ф. Казаченко, М.М. Ляшкевич // *Труды VIII Международной (XIX Всероссийской) научно-технической конференции по автоматизированному электроприводу*. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2014. С. 24-28.
8. Электромобиль. Состояние и перспективы / А.В. Долголаптев, О.Г. Дашко, Г.Б. Онищенко, Е.А. Смотров // *Труды VII Международной (XIII Всероссийской) научно-технической конференции по автоматизированному электроприводу*. Иваново: ИГЭУ, 2012. С. 431-435.
9. Казаченко В.Ф., Остриров В.Н., Русаков А.М. Перспективные типы тяговых электроприводов // *Труды VII Международной (XIII Всероссийской) научно-технической конференции по автоматизированному электроприводу*. Иваново: ИГЭУ, 2012. С. 16-22.
10. Официальный сайт Auto.ru. URL: <https://www.mag.auto.ru/article/hybrids/> (дата обращения 28.12.2021)

11. Овсянников Е.М., Клюкин П.Н. Стартер-генераторные устройства для двигателей внутреннего сгорания автомобилей // Материалы международной научно-технической конференции ААИ «Автомобиле- и тракторостроение в России: приоритеты развития и подготовка кадров», посвященной 145-летию МГТУ «МАМИ». М.: МГТУ «МАМИ», 2010. С. 135-138.
12. Шумов Ю.Н., Сафонов А.С. Энергосберегающие электрические машины для привода электромобилей и гибридных автомобилей (Обзор зарубежных разработок) // Электричество. 2016. №1. С. 55-65.
13. Ильинский Н.Ф. Вентильно-индукторный электропривод – проблемы и перспективы развития // Доклады научно-практического семинара. М.: Изд-во МЭИ, 2006. С. 4-14.
14. Бычков М.Г. Элементы теории вентильно-индукторного электропривода // Электричество. 1997. №8. С. 35-44.
15. Николаев В.В. Стартер-генератор автономных объектов на основе вентильно-индукторной машины: дис. ... канд. техн. наук 05.09.01 / Николаев В.В. М., 2005.
16. Темиров А.П. Опыт разработки вентильно-индукторных электроприводов ПКП «ИРИС» // Доклады научно-практического семинара. М.: Изд-во МЭИ, 2006. С. 84-101.
17. Козаченко В.Ф., Остриров В.Н., Лашкевич М.М. Электротрансмиссия на базе вентильно-индукторного двигателя с независимым возбуждением // Электротехника. 2014. №2. С. 54-60.
18. Амангалиев Е.З., Тлеугали У.К. Вентильно-индукторный двигатель и его особенности // Архивариус. 2020. № 5(50). С. 28-32.
19. Усынин Ю.С. Системы управления электроприводов: учеб. пособие для вузов. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2004. 328 с.
20. Lipo T. Advanced Motor Technologies: Converter Fed Machines // IEEE Trans. 1997. No. 7. Pp. 204-222.
21. Law J.D., Chertok A., Lipo T.A. Design and Performance of Field Regulated Reluctance Machine // IEEE Trans. on Industry Applications. 1994. No. 5. Pp. 1185-1193.
22. Усынин Ю.С., Григорьев М.А., Виноградов К.М. Электроприводы и генераторы с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения // Электричество. №3. 2007. С. 21-26.
23. New Brushless Synchronous Machine For Vehicle Application / Yu. Usinin, M. Grigorjev, K. Vinogradov, S. Gladyshev // SAE International Word Congress Detroit. Michigan, 2007. doi: 10.4271/2007-01-0785
24. Григорьев М.А. Предельные возможности электроприводов с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения // Вестник ЮУрГУ. Серия: Энергетика. 2009. № 12. С. 51-55.
25. Усынин Ю.С., Виноградов К.М. Генераторная установка с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения // Вестник ЮУрГУ. Серия: Энергетика. 2007. №7. С. 37-39.
26. Григорьев М.А. Вентильный электропривод с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения: монография. Челябинск: Изд. центр ЮУрГУ, 2010. 159 с.
27. Удельные показатели электроприводов с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения в разных схемах включения / Д.А. Сычев, У.В. Белоусов, А.М. Журавлев, А.Е. Бычков // Электротехнические системы и комплексы. 2013. №21. С. 21-27.
28. Тяговый электропривод активного прицепа трубопровода / Ю.С. Усынин, А.Н. Шишков, А.Н. Горожанкин, А.Е. Бычков, Е.В. Белоусов, А.М. Журавлев, Д.А. Сычев // Вестник ЮУрГУ. Серия: Энергетика. 2013. Т.13. №1. С. 137-143.
29. Усынин Ю.С., Григорьев М.А., Шишков А.Н. Моделирование электропривода активного прицепа // Вестник ЮУрГУ. Серия: Энергетика. 2013. Т.13. №2. С. 106-113.
30. Савостеев Н.В., Усынин Ю.С. Перспективы развития стартер-генераторов для промышленных транспортных средств // Вестник ЮУрГУ. Серия: Энергетика. 2020. Т. 20. №4. С. 96-102. doi: 10.14529/power200411
31. Григорьев М.А., Наумович Н.И., Белоусов Е.В. Тяговый электропривод электромобиля // Электротехника. 2015. №12. С. 53-56.
32. Гельман М.В., Дудкин М.М., Преображенский К.А. Преобразовательная техника: учеб. пособие. Челябинск: Изд. центр ЮУрГУ, 2009. 425 с.
33. Строганов В.И., Сидоров К.М. Математическое моделирование основных компонентов силовых установок электромобилей и автомобилей с КЭУ: учеб. пособие. М.: МАДИ, 2015. 100 с.
34. Месяц Г.А., Прохоров М.Д. Водородная энергетика и топливные элементы // Вестник Российской академии наук. 2004. Т. 74. №7. С. 579-597.
35. Сайт Topor. Info – обо всём интересном из мира, науки, технологий и общества. URL: <https://www.topor.info/news/avtomobil-tesla> (дата обращения 28.12.2021)
36. Сайт Kazanfirst.ru: Сетевое издание – Татцентр.ру. URL: https://www.kazanfirst.ru/articles/534913?utm_source=yxnews&utm_medium=desktop (дата обращения 28.12.2021)
37. Сайт журнала Автоброкер Клуб: Официальный сайт журнала. URL: <https://www.journal.ab-club.ru/articles/vse-fakty-o-zetta-pervom-serijnom-elektromobile-iz-rossii/> (дата обращения 28.12.2021)
38. Официальная страница интернет издания tengrnews.kz. URL: <https://www.informburo.kz/special/teper-i-na-elektricheskoy-tyage-kak-v-too-saryarkaavtoprom-proizvodiyat-avtobusy.html>; <https://tengrnews.kz/tag/электромобили/> (дата обращения 28.12.2021)

Поступила в редакцию 08 декабря 2021 г.

INFORMATION IN ENGLISH

ELECTRIC AND HYBRID TRANSPORT. POWER CIRCUITS, EQUIPMENT, PROBLEMS AND DEVELOPMENT PROSPECTS

Erlan Z. Amangaliev

Assistant Professor, Power Supply and Renewable Energy Sources Department, Almaty University of Power Engineering and Telecommunications named after Gumarbek Daukeyev, Almaty, Republic of Kazakhstan, amangaliev_erlan@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2842-2702>

Anvar S. Sarvarov

D.Sc. (Engineering), Professor, Automated Electric Drive and Mechatronics Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, anvar@magtu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0529-4488>

Valery I. Kosmatov

Ph.D. (Engineering), Professor, Automated Electric Drive and Mechatronics Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, <https://orcid.org/0000-0002-1985-3244>

Michael Yu. Petushkov

D.Sc. (Engineering), Associate Professor, Electronics and Microelectronics Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, m.petushkov@magtu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4154-375X>

Evgeniy Ya. Omelchenko

D.Sc. (Engineering), Professor, Automated Electric Drive and Mechatronics Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, <https://orcid.org/0000-0002-0547-485X>

Currently, there is a steady tendency in the global automotive industry to use electric propulsion instead of internal combustion engines (ICE) or in hybrid systems that combine electric and internal combustion engines in various proportions of participation in torque generation. The analysis of power structures applied in the most developed traction systems for electric and hybrid vehicles (electric car, hybrids with serial, parallel and series-parallel power plants) has been performed. The paper assesses the considered system operational capabilities depending on the electrification degree of hybrid vehicles and their impact on the environment. A wide range of publications in the field of starter generators development and traction electric motors for hybrid cars, from micro-hybrids to full hybrids, as well as electric cars themselves, are considered. It follows from them that asynchronous motors with short-circuit rotor and synchronous machines with electromagnetic excitation traditionally prevail in developments brought to practical application. Permanent magnet valve machine, contactless machine, permanent magnet synchronous machine, self-excitation valve inductor machine and independent excitation synchronous reactor machine are considered to be the most promising. As the main modules of the power automobile electronics are considered in electric cars only SVI, in hybrid ones - the CVR-SVI system, made by a three-phase bridge circuit. The main characteristics of traditional lead-acid batteries and modern lithium-ion batteries, which are considered the most promising, are compared. It is noted that limited lithium reserves require the search for new directions in the sphere of effective energy accumulators development. Possibility and problems of using capacitive energy storage devices, including supercapacitors, as the most perspective energy storage devices are considered. It is also noted the expediency of further development of the application concept for on-board electric generating fuel cells using hydrogen-containing fuel in electric cars. To assess the situation in Russia, indicators describing the scale of the tasks for electric transport development in the country for the period of 2020-2031 are given. They are given in the Economic Development Ministry documents of the Russian Federation and are reflected in this article. In general, it is reasonable to link the concept of electric vehicle development today with hydrogen technologies.

Keywords: environmental friendliness, power circuits, automotive electric, hybrid vehicles, electric drive, internal combustion engine, electric motors, generators, power electronics, inverters, rectifiers, energy storage, batteries, capacitors, fuel cells, development concept.

REFERENCES

1. Yutt V.E., Stroganov V.I. *Elektromobili i avtomobili s kombinirovannoy ustanovkoy. Raschet skorostnykh kharakteristik: ucheb. posobie* [Electric cars and cars with combined unit. Calculation of Speed Characteristics: Tutorial]. Moscow, MADI Publ., 2016. 108 p. (In Russian)
2. Lezhnev L.Y., Hripach N.A., Shustrov F.A., Papkin B.A., Petrichenko D.A., Ivanov D.A., Tatamikov A.P., Korotkov V.S., Neverov V.A. *Energoustanovki avtomobilnogo transporta s tyagovym elektropriivodom* [Power plants of automobile transport with a traction electric drive]. Tambov, LLC "Consulting company Yukom" Publ., 2017. 204 p. (In Russian)
3. Toilibaev A.E., Seyimkhan S. Electric vehicle - transport of the future. *Universum: Tekhnicheskie nauki*. [Universum. Technical Science], 2018, no. 5(50), 4 p. URL: <http://7universum.com/ru/tech/archive/item/5902> (In Russian)
4. Directorate for Economics of Fuel and Energy Industries: Fact Sheet. *Elektricheskiy i gibridnyi avtotransport v mire – Analiticheskiy tsentr pri pravitelstve Rossiyskoy Federatsii* [Electric and Hybrid Vehicles in the World - Analytical Center under the Government of the Russian Federation], December 2013. 12 p. (In Russian)
5. Bakhmutov S.V., Karunin A.L., Krutashov A.V., Lomakin V.V., Selifonov V.V., Karpukhin K.E., Baulina E.E., Uryukov Yu.V. *Konstruktivnye skhemy avtomobiley s gibridnymi silovymi ustanovkami: Uchebnoe posobie* [Design schemes of the vehicles with the hybrid power plants: tutorial]. Moscow, Moscow State Technical University "MAMI" Publ., 2007. 71 p. (In Russian)
6. Florentsev S.N., Izosimov D.B. Results and plans for the creation of a complete traction electric equipment of electromechanical transmissions of vehicles. *Trudy VII Mezhdunarodnoy (XIII Vserossiyskoy) nauchno-tekhnicheskoy konferentsii po avtomatizirovannomu elektropriivodu* [Proceedings of the VII International (XIII All-Russian) Scientific and Technical Conference on Automated Electric Drives]. Ivanovo, Ivanovo State Power University named after V.I. Lenin, 2012, pp. 438-445. (In Russian)
7. Anuchin A.S., Aliamkin D.I., Kazachenko V.F., Lyashkevich M.M. State and development prospects of urban hybrid and electric traction electric drive in Russia. *Trudy VIII Mezhdunarodnoy (XIX Vserossiyskoy) nauchno-tekhnicheskoy konferentsii po avtomatizirovannomu elektropriivodu* [Proceedings of VIII International (XIX All-Russian) Scientific and Technical Conference on Automated Electric Drive]. Saransk: Mordov. Univ. Publisher, 2014, pp. 24-28. (In Russian)
8. Dolgolaptev A.V., Dashko O.G., Onishchenko G.B., Smotrov E.A. Electric Vehicle. Status and Prospects. *Trudy VII Mezhdunarodnoy (XIII Vserossiyskoy) nauchno-tekhnicheskoy konferentsii po avtomatizirovannomu elektropriivodu* [Proceedings of the VII International (XIII All-Russian) Scientific and Technical Conference on Computer-Aided Electric Drives]. Ivanovo, Ivanovo State Power University named after V.I. Lenin, 2012, pp. 431-435. (In Russian)
9. Kazachenko V. F., Ostrirrov V. N., Rusakov A. M. Perspective types of traction electric drives. *Trudy VII Mezhdunarodnoy (XIII Vserossiyskoy) nauchno-tekhnicheskoy konferentsii po avtomatizirovannomu elektropriivodu* [Proceedings of the VII International (XIII All-Russian) Scientific and Technical Conference on Computer-Aided Electric Drives]. Ivanovo, Ivanovo State Power University named after Lenin, 2012, pp. 16-22. (In Russian)
10. Auto.ru. Available at: magazine:mag.auto.ru/article/hybrids/ (accessed 28 December 2021) (In Russian)

11. Ovsyannikov E.M., Klukin P.N. Starter-generator devices for internal combustion engines in cars. *Materialy mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii AAI «Avtomobile – i traktorostroenie v Rissii: priopitety razvitiya i podgotovka kadrov», posvyascshennoy 145 –letiyu MGTU «MAMI»* [Proceedings of the International Scientific and Technical Conference AAI "Automotive and Tractor Construction in Russia: Development Priorities and Staff Training" dedicated to the 145th anniversary of the Moscow State Technical University "MAMI"]. Moscow, MSTU "MAMI" Publ., 2010, pp. 135-138. (In Russian)
12. Shumov Yu.N., Safonov A.S. Energy-saving electric machines for electric and hybrid cars drive (Review of foreign developments). *Elektrichestvo* [Electricity], 2016, no. 1, pp. 55-65. (In Russian)
13. Ilyinskii N.F. Valve-inductor electric drive - problems and prospects for development. *Doklady nauchno-prakticheskogo seminar* [Reports of a scientific-practical seminar]. Moscow, MPEI Publishing House, 2006, pp. 4-14. (In Russian)
14. Bychkov M.G. Elements of the theory of a valve-inductor electric drive. *Elektrichestvo* [Electricity], 1997, no. 8, pp. 35-44. (In Russian)
15. Nikolaev V.V. *Starter-generator avtonomnykh obyekтов na osnove ventilno-induktornoy mashiny*. Kand.Diss. [Starter-generator of the autonomous objects on the basis of the valve-inductor machine. Ph.D.Diss.]. Moscow, 2005. 145 p.
16. Temirev A.P. Development of the valve-inductor electric drives by PKP "IRIS". *Doklady nauchno-prakticheskogo seminar* [Reports of scientific-practical seminar]. MPEI Publishing House, 2006, pp. 84 -101. (In Russian)
17. Kozachenko V.F., Ostrirov V.N., Lashkevich M.M. Electric Power Transmission on the Basis of Valve Inductor Motor with Independent Excitation. *Electrotehnika* [Electrical Engineering], 2014, no.2, pp. 54-60. (In Russian)
18. Amangaliev E.Z., Tleugali U.K. Valve-inductor motor and its features. *Arkhivarius* [Registrar], 2020, no. 5(50), pp. 28-32. (In Russian)
19. Usynin Yu.S. *Sistemy upravleniya elektropriwodov* [Control systems for the electric drives]. Chelyabinsk, Publishing house of SUSU, 2004. 328 p. (In Russian)
20. Lipo T. Advanced Motor Tecnologics: Converter Fed Machines. *IEEE Trans*, 1997, no. 7, pp. 204-222.
21. Law J.D., Chertok A., Lipo T.A. Design and Performance of Field Regulated Reluc-tance Machine. *IEEE Trans. on Industry Applications*, 1994, no. 5, pp. 1185-1193.
22. Usynin Yu.S., Grigoriev M.A., Vinogradov K.M. Electric drives and generators with synchronous reactive machine of independent excitation. *Elektrichestvo* [Electricity], 2007, no. 3, pp. 21-26. (In Russian)
23. Usinin Yu., Grigorjev M., Vinogradov K., Gladyshev S. New Brushless Synchronous Machine For Vehicle Application / (The University of Michigan-Dearborn). *SAE International 2007 Word Congress Detroit, Michigan*, 2007. doi: 10.4271/2007-01-0785
24. Grigoriev M.A. Limiting possibilities of the electric drives with the synchronous reactive machine of independent excitation. *Vestnik YuUrGU. Seriya: Energetika* [Bulletin of SUSU. Series "Power Engineering"], 2009, no. 12, pp. 51-55. (In Russian)
25. Usynin Yu.S., Vinogradov K.M. Generating installation with a synchronous independent excitation reluctance machine. *Vestnik YuUrGU. Seriya: Energetika* [Bulletin of SUSU. Series "Power Engineering"], 2007, no. 7, pp. 37-39. (In Russian)
26. Grigoriev M.A. *Ventilnyi elektropriwod s sinkhronnoy reaktivnoy mashinoy nezavisimogo vozbuzhdeniya* [Valve electric drive with synchronous reactive machine of independent excitation]. Chelyabinsk, Publishing Center of SUSU, 2010. 159 c. (In Russian)
27. Sychev D.A., Belousov U.V., Zhuravlev A.M., Bychkov A.E. Specific indices of electric drives with the synchronous reactive machine of independent excitation in various schemes of switching. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical systems and complexes], 2013, no. 21, pp. 21-27. (In Russian)
28. Usynin Yu.S., Shishkov A.N., Gorozhankin A.N., Bychkov A.E., Belousov E.V., Zhuravlev A.M., Sychev D.A. Traction electric drive of an active pipe truck trailer. *Vestnik YuUrGU. Seriya: Energetika* [Bulletin of SUSU. Series: Power Engineering], 2013, vol. 13, no. 1, pp. 137-143. (In Russian)
29. Usynin Y.S., Grigoriev M.A., Shishkov A.N. Simulation of active trailer electric drive. *Vestnik YuUrGU. Seriya: Energetika* [Bulletin of SUSU. Series: Power Engineering], 2013, vol. 13, no. 2, pp. 106-113. (In Russian)
30. Savosteenko N.V., Usynin S.I. Prospects for the development of starter generators for industrial vehicles. *Vestnik YuUrGU. Seriya: Energetika* [Bulletin of SUSU. Series: Power Engineering], 2020, vol. 20, no. 4, pp. 96-102. doi: 10.14529/power200411 (In Russian)
31. Grigoriev M.A., Naumovich N.I., Belousov E.V. Traction electric drive of electric vehicle. *Electrotehnika* [Electrical Engineering], 2015, no. 12, pp. 53-56. (In Russian)
32. Gelman M.V., Dudkin M.M., Preobrazhenskiy K.A. *Preobrazovatel'naya tekhnika* [Converting technique]. Chelyabinsk, Publishing Center of SUSU, 2009. 425 p. (In Russian)
33. Stroganov V.I., Sidorov K.M. *Matematicheskoe modelirovanie osnovnykh komponentov silovykh ustanovok elektromobiley i abtomobiley s KEU* [Mathematical Modeling of the Main Components of Power Units of Electric Vehicles and Cars with CEU]. Moscow, MADI Publ., 2015. 100 p. (In Russian)
34. Mesyats G.A., Prokhorov M.D. Hydrogen Energy and Fuel Cells. *Vestnik Rossiyskoi akademii nauk* [Bulletin of the Russian Academy of Sciences], 2004, vol. 74, no. 7, pp. 579-597. (In Russian)
35. Topor. Info - Site about everything interesting from the world, science, technology and society. Available at: <https://topor.info/news/avtomobill-tesla>; <https://topor.info/news/proekty-elona-maska>. (accessed 28 December 2021)
36. Kazanfirst.ru: Network edition - Tattser.ru. Available at: https://kazanfirst.ru/articles/534913?utm_source=yxnews&utm_medium=desktop. (accessed 28 December 2021)
37. Autobroker Club magazine: official website of the magazine. Available at: <https://journal.ab-club.ru/articles/vse-fakty-o-zetta-pervom-serijnom-elektromobile-iz-rossii/>. (accessed 28 December 2021)
38. Main news of Kazakhstan: Official page of the Internet edition tengrinews.kz. Available at: <https://informburo.kz/special/teperi-na-elektricheskoy-tyage-kak-v-too-saryarkaavtoprom-proizvodyat-avtobusy.html>; <https://tengrinews.kz/tag/electric-cars/> (accessed 28 December 2021)

Электромобильный и гибридный транспорт: силовые схемы, оборудование, проблемы и перспективы развития / Е.З. Амангалиев, А.С. Сарваров, В.И. Косматов, М.Ю. Петушков, Е.Я. Омельченко // *Электротехнические системы и комплексы*. 2022. № 1(54). С. 19-28. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-1\(54\)-19-28](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-1(54)-19-28)

Amangaliev E.Z., Sarvarov A.S., Kosmatov V.I., Petushkov M.Yu., Omelchenko E.Ya. Electric and Hybrid Transport. Power Circuits, Equipment, Problems and Development Prospects. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2022, no. 1(54), pp. 19-28. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-1\(54\)-19-28](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-1(54)-19-28)

Шохин В.В., Храмшин В.Р., Корнилов Г.П., Пермякова О.В.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ВЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ АСИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ С ПРЕОБРАЗОВАНИЕМ КООРДИНАТ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

В работе ставится задача создать модель структурной схемы системы векторного управления асинхронным двигателем с частотным регулированием скорости, в которой осуществляется преобразование координат. Используется виртуальная модель асинхронного двигателя из библиотеки Simulink Matlab. Питание двигателя осуществляется от преобразователя частоты со звеном постоянного тока с широтно-импульсной модуляцией. Система регулирования скорости построена с использованием принципов подчиненного регулирования координат электропривода. Для анализа работы электроприводов с векторным управлением принят метод структурного моделирования. Преимущество представленной модели заключается в использовании виртуальных моделей асинхронных двигателей из библиотеки Simulink. Это существенно упрощает процесс моделирования и представляет большие возможности для исследователей. В этом случае при исследовании электроприводов необходимо только задать основные параметры исследуемого двигателя. Имеется возможность учесть кривую намагничивания электротехнической стали. Для измерения переменных двигателя предусмотрен специальный блок, в котором может быть выведено большое количество переменных состояния электрической машины. Рассмотрение двигателя по такой модели приводит к структурной схеме двигателя без упрощений, которые часто вводятся при компенсации перекрестных связей по каналам регулирования потокосцепления и момента. Созданы блоки, в которых осуществляется преобразование трехфазной системы токов статора в двухфазную систему в неподвижной системе координат. Затем эта двухфазная система преобразуется в двухфазную систему координат, вращающуюся со скоростью поля статора с ориентацией вещественной оси по вектору потокосцепления ротора. Выходные координаты этого блока используются в качестве сигналов обратной связи по составляющим тока статора, пропорциональным потокосцеплению и электромагнитному моменту двигателя. Создается система подчиненного регулирования координат электропривода для регулирования скорости. Выходом этой системы регулирования являются сигналы задания напряжения, представленные в двухфазной системе координат, вращающейся со скоростью поля двигателя. Эти сигналы преобразуются в двухфазную неподвижную систему координат, а затем в трехфазную систему задающих сигналов для преобразователя частоты. Представленная структура модели электропривода переменного тока дает значительные возможности исследователям при анализе работы электроприводов переменного тока.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, векторное управление, преобразователь частоты, неподвижная и вращающаяся системы координат, структурное моделирование, подчиненное регулирование координат, широтно-импульсная модуляция.

ВВЕДЕНИЕ

Системы векторного управления асинхронными двигателями с короткозамкнутым ротором широко применяются в современных электроприводах переменного тока с частотным регулированием скорости двигателей [1-9]. В таких системах описание асинхронного двигателя проводится в различных системах координат, при этом распространено использование неподвижной системы координат, связанной со статором двигателя, и системы, вращающейся со скоростью поля статора. Вводится понятие обобщенных векторов токов, напряжений, потокосцеплений. Преимущественно применяют системы, в которых вещественная ось вращающейся системы координат направлена по вектору потокосцепления ротора. При построении систем регулирования необходимы вычислительные блоки с целью проведения преобразований переменных двигателя в различные системы координат. Регулирование скорости осуществляется с использованием принципов подчиненного регулирования координат электропривода. Питание двигателей осуществляется от преобразователей частоты со звеном постоянного тока с широтно-импульсной модуляцией.

При анализе систем векторного управления используют допущение, заключающееся в том, что считают скомпенсированными перекрестные связи между двумя каналами структурной схемы двигателя – каналом

составляющей тока статора, пропорциональной моменту двигателя, и каналом составляющей тока статора, пропорциональной потокосцеплению двигателя. Такое представление структурной схемы существенно упрощает расчет регуляторов и создание моделей систем векторного управления. Фактически структура получается такой же, как и в электроприводах постоянного тока. Но такие структуры не позволяют анализировать переменные двигателя (фазные токи, напряжения), являющиеся системами трехфазного переменного тока. В этом случае преобразователь частоты представляется аperiodическим звеном, а трехфазная система переменного тока из рассмотрения фактически исключается.

В работе ставится задача создать модель структурной схемы системы векторного управления, в которой используется виртуальная модель асинхронного двигателя из библиотеки Simulink, которая подключается к модели преобразователя частоты со звеном постоянного тока с инвертором напряжения с широтно-импульсной модуляцией. Созданы блоки, в которых осуществляется преобразование трехфазной системы токов статора в двухфазную систему в неподвижной системе координат. Затем эта двухфазная система преобразуется в двухфазную систему координат, вращающуюся со скоростью поля статора с ориентацией вещественной оси по вектору потокосцепления ротора. Выходные координаты этого блока используются в качестве сигналов обратной связи по составляющим тока статора, пропорциональным потокосцеплению и электромагнитному моменту двигателя.

Преимущество представленной модели заключается в использовании виртуальных моделей асинхронных двигателей из библиотеки Simulink. Это существенно упрощает процесс моделирования и представляет большие возможности для исследователей. В этом случае при исследовании электроприводов необходимо только задать основные параметры исследуемого двигателя. Имеется возможность учесть кривую намагничивания электротехнической стали. Для измерения переменных двигателя предусмотрен специальный блок, в котором может быть выведено большое количество переменных состояния электрической машины. Рассмотрение двигателя по такой модели приводит к структурной схеме двигателя без упрощений, которые часто вводятся при компенсации перекрестных связей по каналам регулирования потокосцепления и момента.

Создается система подчиненного регулирования координат электропривода для регулирования скорости [1]. Выходом этой системы регулирования являются сигналы задания напряжения, представленные в двухфазной системе координат, вращающейся со скоростью поля двигателя. Эти сигналы надо преобразовать в двухфазную неподвижную систему координат, а затем в трехфазную систему задающих сигналов для преобразователя частоты.

Такая структура модели электропривода переменного тока в максимальной степени приближается к реальной структуре системы векторного управления при частотном регулировании скорости асинхронного двигателя.

МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ ВЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ

В настоящее время для исследования сложных электромеханических систем широко используется метод структурного моделирования [10-19]. Исследование работы системы частотного регулирования ско-

рости электропривода переменного тока проводилось путем моделирования в программной среде Matlab с приложением Simulink [10-13].

Функциональная схема силовой части модели приведена на **рис. 1**. В модели использовано представление асинхронного двигателя из библиотеки Simulink (рассмотрен двигатель с параметрами: мощность 5,5 кВт, напряжение 380 В, номинальная частота 50 Гц, номинальная скорость вращения 1460 об/мин, сопротивление и индуктивность статорной цепи – 0,6419 Ом, 0,00475 Гн, сопротивление и индуктивность роторной цепи – 0,6059 Ом, 0,0076 Гн, индуктивность цепи намагничивания 0,173 Гн, момент инерции 0,017 кг·м²). Создана модель силовой схемы преобразователя частоты со звеном постоянного тока с широтно-импульсной модуляцией. Выпрямитель представляет собой трехфазную схему выпрямления. Автономный инвертор напряжения собран на элементах IGBT. Система управления инвертором формирует импульсы управления с изменяющейся скважностью в соответствии с примененной системой широтно-импульсной модуляции.

Блоки преобразования координат построены в соответствии с известными математическими зависимостями [1], представленными ниже.

При составлении уравнений системы координат обозначены следующим образом:

x - y – неподвижная прямоугольная система координат, жестко связанная с трехфазной статорной обмоткой, ее вещественная ось направлена по оси обмотки фазы А статора. Переменные в этой системе координат имеют индексы x , y ;

α - β – система координат, вращающаяся с угловой скоростью, равной угловой частоте напряжения питания двигателя. Переменные в этой системе координат имеют индексы α , β .

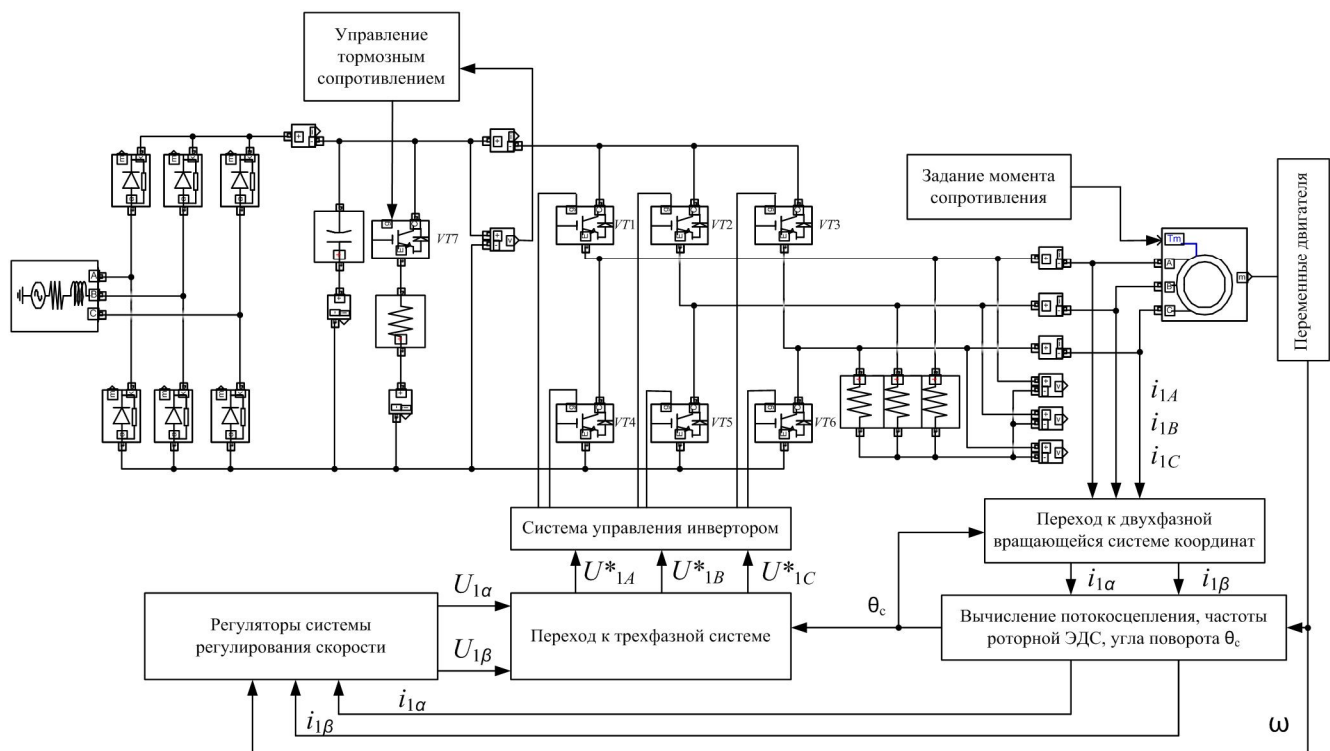


Рис. 1. Функциональная схема модели автоматизированного электропривода с векторным управлением

Мгновенное значение угла поворота этой системы относительно неподвижной системы координат обозначается углом θ_c .

Знак «^» над обозначением переменной говорит о том, что это расчетное значение переменной.

Переход от трехфазной системы токов i_{1A} , i_{1B} , i_{1C} к двухфазной i_{1x} , i_{1y} в неподвижной системе координат выполняется по формулам:

$$i_{1x}=i_{1A}, \quad i_{1y}=\frac{1}{\sqrt{3}}(i_{1B}-i_{1C}).$$

Для преобразования двухфазной системы токов в неподвижной системе координат в двухфазную вращающуюся используются выражения:

$$i_{1\alpha}=i_{1x}\cos\theta_c+i_{1y}\sin\theta_c;$$

$$i_{1\beta}=-i_{1x}\sin\theta_c+i_{1y}\cos\theta_c.$$

Регуляторы системы рассчитаны с учетом теории систем подчиненного регулирования координат [1]. Передаточные функции регуляторов представлены в [3].

Регуляторы тока определяются в соответствии с выражением

$$W_{\text{рт}}(p)=\frac{(\sigma T_1 p+1)R_1}{2T_{\mu 1}k_{\text{п}}k_{\text{дт}}p};$$

$$\sigma=1-\frac{L_m^2}{(L_1 L_2)},$$

где T_1 – электромагнитная постоянная времени статорной обмотки; R_1 – активное сопротивление статорной обмотки; $T_{\mu 1}$ – минимальная некомпенсируемая постоянная времени в контуре тока; $k_{\text{п}}$ – коэффициент передачи преобразователя частоты по напряжению; $k_{\text{дт}}$ – коэффициент датчика тока; L_m – индуктивность контура намагничивания; L_1 – индуктивность обмотки статора; L_2 – индуктивность обмотки ротора.

Регулятор скорости при настройке по модульному оптимуму должен быть пропорциональным

$$W_{\text{рс}}(p)=k_{\text{рс}}=\frac{k_{\text{дт}}J}{4T_{\mu 1}k_{\text{дс}}3p_{\text{п}}k_2\psi_2};$$

$$k_2=\frac{L_m}{L_2},$$

где $k_{\text{рс}}$ – коэффициент регулятора скорости; $k_{\text{дс}}$ – коэффициент датчика скорости; ψ_2 – величина потокосцепления ротора.

Если применить настройку по симметричному оптимуму, то регулятор скорости будет иметь пропорционально-интегральную передаточную функцию

$$W_{\text{рс}}(p)=k_{\text{рс}}\frac{8T_{\mu 1}+1}{8T_{\mu 1}}.$$

Передаточная функция регулятора потокосцепления рассчитывается по формуле

$$W_{\text{рп}}(p)=\frac{k_{\text{дт}}(T_2 p+1)}{4T_{\mu 1}p k_{\text{дп}}L_m},$$

где $k_{\text{дп}}$ – коэффициент цепи обратной связи по потокосцеплению.

Для формирования трехфазной системы задающих напряжений в неподвижной системе координат на входе преобразователя частоты из двухфазной системы напряжений во вращающейся системе координат на выходе регуляторов системы регулирования скорости приняты соотношения [1]:

$$U_{1x}^*=U_{1\alpha}^*\cos\theta_c-U_{1\beta}^*\sin\theta_c;$$

$$U_{1y}^*=U_{1\alpha}^*\sin\theta_c+U_{1\beta}^*\cos\theta_c;$$

$$U_{1A}^*=U_{1x}^*; \quad U_{1i}^*=-\frac{1}{2}(U_{1x}^*-\sqrt{3}U_{1y}^*);$$

$$U_{1C}^*=-\frac{1}{2}(U_{1x}^*+\sqrt{3}U_{1y}^*).$$

Значения потокосцепления ротора и частота роторной ЭДС определяются по выражениям [3]:

$$\hat{\Psi}_2=\frac{L_m}{(T_2 p+1)}i_{1\alpha};$$

$$\hat{\omega}_p=\frac{k_2 R_2 i_{1\beta}}{\hat{\Psi}_2}=\frac{L_m i_{1\beta}}{T_2 \hat{\Psi}_2};$$

$$T_2=\frac{L_2}{R_2};$$

$$k_2=\frac{L_m}{L_2};$$

$$\hat{\omega}_{0\text{эл}}=\omega p_{\text{п}}+\hat{\omega}_p.$$

В модели рассчитывается текущее значение угла поворота θ_c путем интегрирования частоты вращения $\hat{\omega}_{0\text{эл}}$ и значение электромагнитного момента двигателя \hat{M}_d :

$$\hat{M}_d=3p_{\text{п}}k_2\hat{\Psi}_2i_{1\beta}.$$

В модели создан блок для моделирования активной и реактивной нагрузки для двигателя. В этом блоке реактивный момент сопротивления формируется в зависимости от наличия скорости двигателя и направления вращения.

Для создания тормозных режимов двигателя в силовой схеме предусмотрен тормозной блок, включающий IGBT-ключ и резистор. Управление ключом осуществляется в зависимости от напряжения в звене постоянного тока преобразователя. Включение ключа производится при напряжении в звене постоянного тока 788 В, отключение – при 780 В.

Для контроля напряжения на конденсаторе в силовой схеме и его тока заряда, тока инвертора и тока через тормозной резистор, а также тока выпрямителя использованы датчики, сигналы которых осциллографируются. В силовой схеме установлены также датчики токов и напряжений в трехфазной системе выходных токов инвертора. Задание скорости подается в систему регулирования, при разгоне и торможении используется линейное изменение сигнала задания. Установлен блок задания статической нагрузки. Скорость двигателя, электромагнитный момент контролируются по выходным данным модели двигателя.

Функциональная схема полной модели векторного управления при частотном регулировании скорости асинхронного двигателя с ориентацией вращающейся системы координат по вектору потокоцепления ротора с блоками преобразования координат представлена на **рис. 1**.

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА В РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ

Первоначально для определения исходных динамических характеристик электропривода проводилось исследование работы электродвигателя при его прямом подключении к идеальному источнику питания с полным напряжением и частотой 50 Гц. Осциллограммы переходных процессов приведены на **рис. 2, а**, где показана также динамическая механическая характеристика двигателя, полученная в процессе разгона (**рис. 2, б**). Для рассматриваемого электродвигателя характер переходных процессов существенно колебательный, так как двигатель представляет собой колебательное звено с нелинейными свойствами.

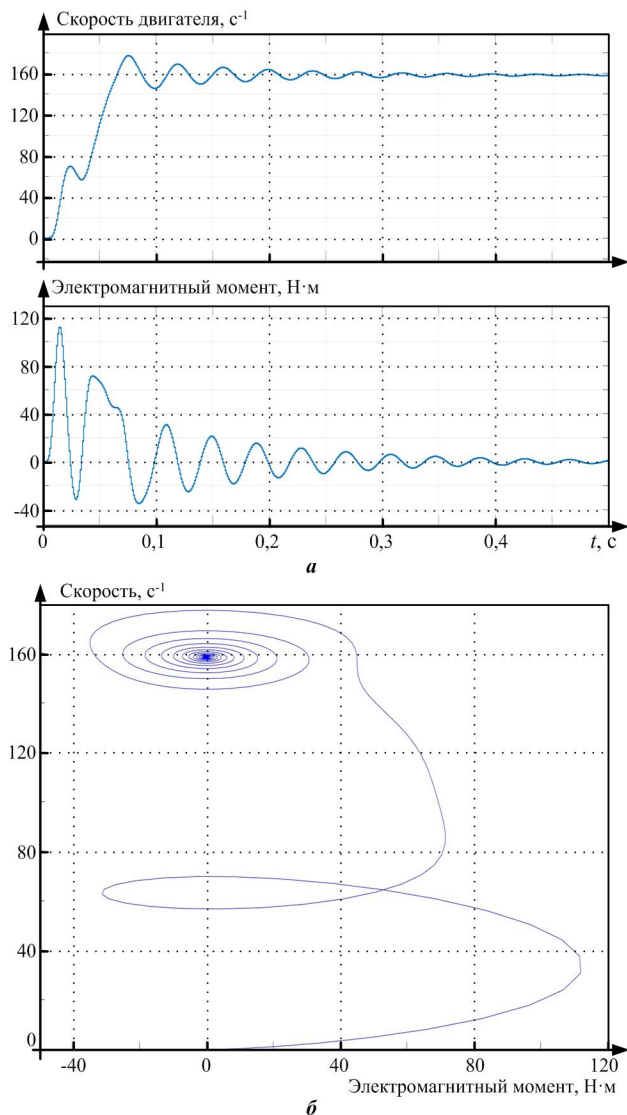


Рис. 2. Переходные процессы при прямом включении двигателя на сеть (**а**) и динамическая механическая характеристика двигателя (**б**)

Исследовался автоматизированный электропривод с векторным управлением с системой подчиненного регулирования координат. Включение привода производится в следующей последовательности. В начале расчета подается сигнал задания потокоцепления с увеличением до заданного значения в течение 0,025 с. Затем в момент времени 0,1 с начинает линейно увеличиваться напряжение задания скорости. Такой порядок необходим для предварительного задания потокоцепления двигателя. В период времени с 0,25 до 0,3 с действует активный момент сопротивления. При наличии скорости действует реактивный момент сопротивления.

При проведении исследований на модели цепи обратной связи по переменным электропривода представлялись с единичным коэффициентом передачи. Поскольку в соответствии с теорией систем подчиненного регулирования значения этих коэффициентов входят в передаточные функции регуляторов с целью приведения передаточных функций замкнутых контуров к нормированным передаточным функциям, при таком допущении упрощается расчет системы, и это не влияет на качество динамических и статических характеристик. После расчета элементов модели проводилась установка расчетных параметров. В связи с тем, что при расчете регуляторов структура объекта представляется упрощенно с определенной степенью допущений, проводилась дополнительная подстройка системы регулирования с целью получения заданных динамических и статических свойств.

На **рис. 3** представлена осциллограмма работы электропривода при разгоне двигателя, набросе и сбросе нагрузки, торможении и реверсе двигателя, торможении до полной остановки. В расчете учитывается действие и активного, и реактивного момента сопротивления (момента трения). Значения моментов задаются на уровне: активный – 20 Н·м в период с 0,3 до 0,5 с, реактивный – 10 Н·м на всем периоде изменения скорости двигателя, при этом изменение направления момента происходит при изменении направления скорости.

Характер переходных процессов вполне удовлетворительный. Статическая просадка скорости двигателя при действии активного момента отсутствует, так как применен пропорционально-интегральный регулятор скорости. При реверсе двигателя происходит изменение чередования фазных напряжений.

На **рис. 4, а** показаны изменения скорости двигателя, напряжения на конденсаторе в звене постоянного тока, тока через тормозной резистор. Подключение тормозного резистора происходит периодически в зависимости от величины напряжения на конденсаторе. Это обеспечивает торможение двигателя с рассеиванием энергии торможения в виде тепла тормозного резистора и ограничение напряжения в звене постоянного тока на заданном уровне.

Формирование напряжений управления на выходе системы регулирования скорости (на входе преобразователя частоты) показано на осциллограмме **рис. 4, б**. Данная система трехфазных управляющих напряжений сравнивается с пилообразным напряжением системы широтно-импульсной модуляции, тем самым обеспечивается регулирование выходного напряжения преобразователя частоты.

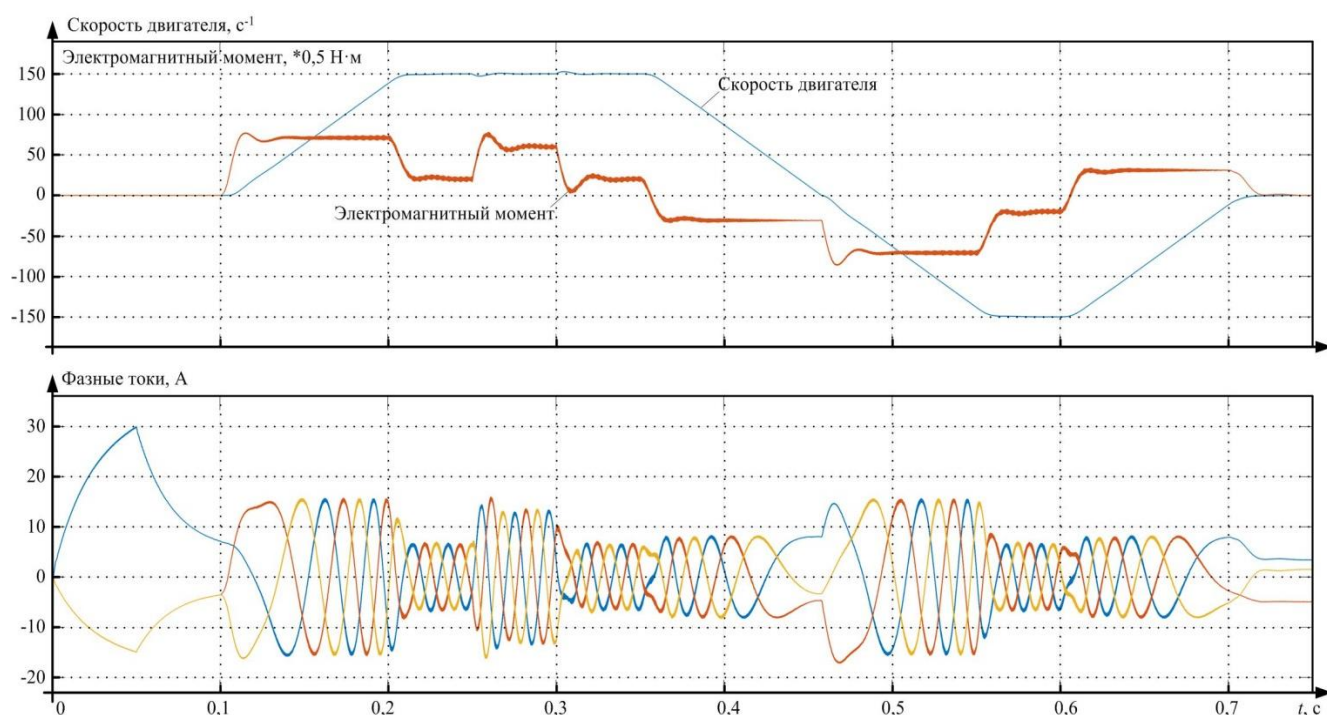


Рис. 3. Осциллограммы работы электропривода (скорость двигателя, электромагнитный момент, фазные токи)

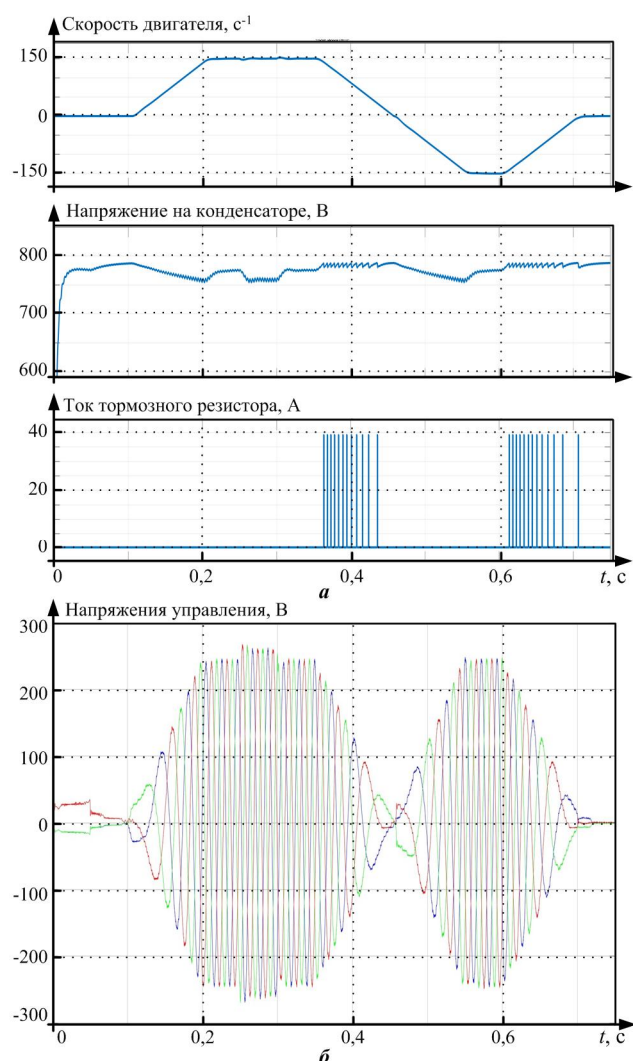


Рис. 4. Осциллограммы скорости, напряжения на конденсаторе в звене постоянного тока и тока тормозного резистора (а) и напряжений управления на входе преобразователя частоты (б)

На рис. 5, а показаны осциллограммы фазных напряжений на двигателе при разгоне двигателя до номинальной скорости. Работу широтно-импульсной модуляции при регулировании фазных напряжений иллюстрирует осциллограмма на рис. 5, б.

На рис. 6 показаны осциллограммы токов в силовой схеме преобразователя частоты, напряжение на конденсаторе силовой схемы и составляющие тока статора по осям α и β и угол θ .

При работе двигателя напряжение на конденсаторе изменяется в пределах от 754 до 788 В. Росту напряжения при торможении двигателя препятствует периодическое подключение тормозного резистора. Ток выпрямителя имеет только одно направление. За счет этого тока в конечном итоге создается электромагнитный момент двигателя, а также происходит подзарядка конденсатора. Ток инвертора изменяет свое направление в зависимости от режима работы двигателя. Ток через конденсатор также меняет направление при его заряде и разряде.

Составляющая тока статора по оси α пропорциональна потокоцеплению двигателя и при его работе практически не меняется (за исключением значительного изменения только при включении модели в работу, когда устанавливается первоначальное потокоцепление перед разгоном двигателя). Составляющая тока по оси β пропорциональна электромагнитному моменту двигателя и форма этого тока повторяет форму кривой электромагнитного момента. Указанные составляющие тока статора используются в качестве сигналов обратной связи в системе регулирования скорости. На рис. 6, б показано изменение расчетного значения угла θ , используемого в уравнениях преобразования координат.

Осциллограмма на **рис. 7** иллюстрирует изменения составляющих тока статора в неподвижной системе координат. Эти составляющие представляют собой периодически изменяющиеся переменные величины во времени в отличие от составляющих тока статора во вращающейся системе координат (**рис. 6, б**), которые могут быть представлены в виде постоянных по характеру токов.

Таким образом, доказана работоспособность модели, ее широкие возможности при исследованиях электропривода переменного тока при частотном регулировании скорости в различных режимах. Показано, что использование системы векторного управления для принятого асинхронного двигателя с существенно нелинейными свойствами, который представляет собой колебательное звено, позволяет получить электропривод с хорошими статическими и динамическими характеристиками.

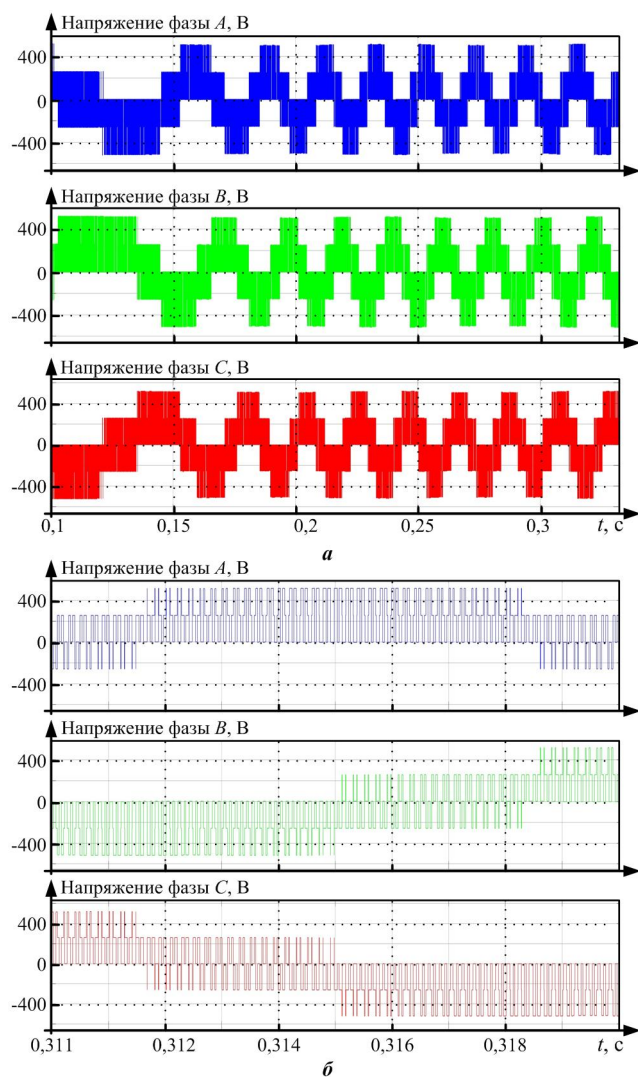


Рис. 5. Осциллограммы фазных напряжений при разгоне двигателя (*а*) и фазные напряжения при работе широтно-импульсной модуляции (*б*)

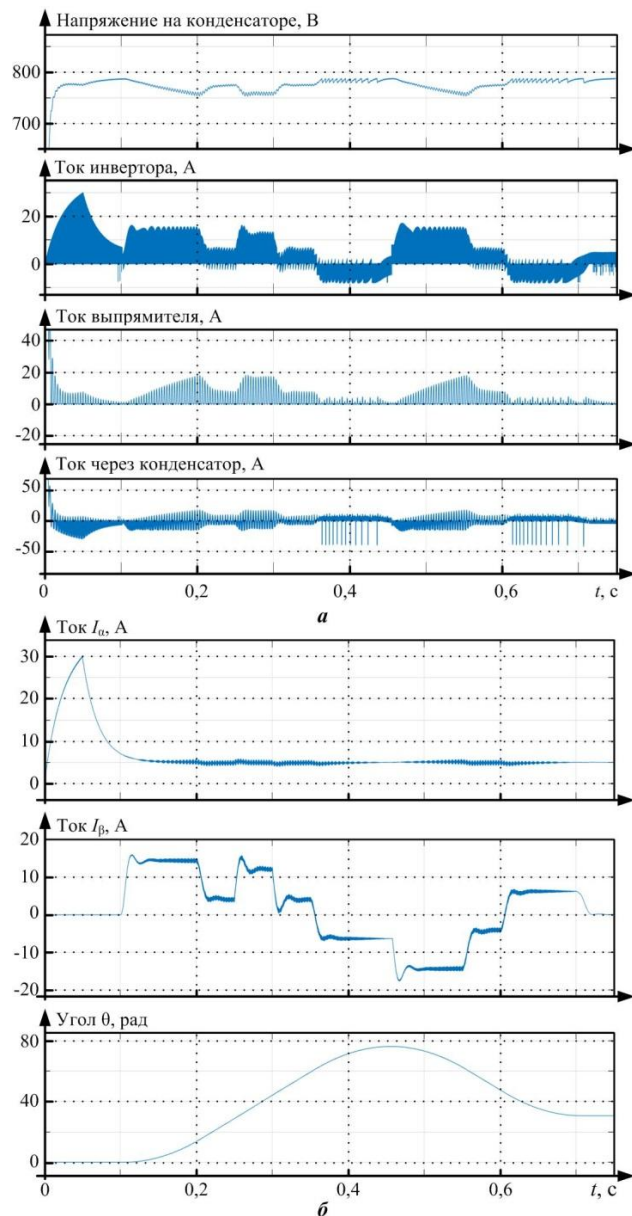


Рис. 6. Осциллограммы токов, напряжения на конденсаторе силовой схемы (*а*) и составляющие тока статора по осям α и β и угол θ (*б*)

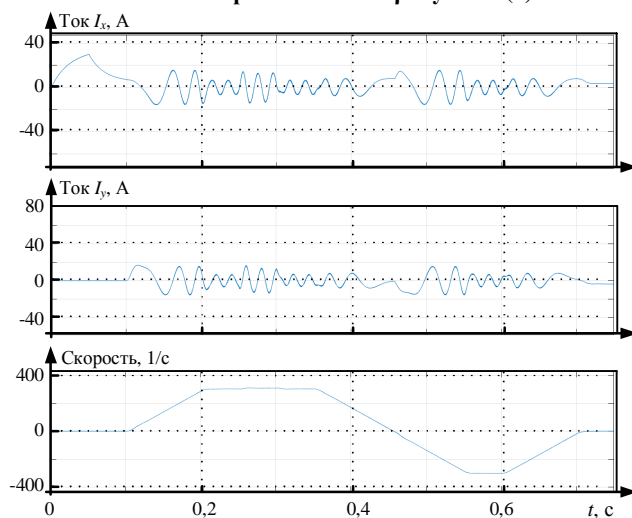


Рис. 7. Изменения составляющих тока статора в неподвижной системе координат при изменении скорости двигателя

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана модель автоматизированного электропривода переменного тока с частотным регулированием скорости с векторным управлением с ориентацией вращающейся системы координат по вектору потока сцепления ротора с широтно-импульсной модуляцией.

2. Структура разработанной модели в максимальной степени приближена к структуре реального электропривода переменного тока с векторным регулированием скорости, так как используется виртуальная модель асинхронного двигателя из библиотеки Simulink, и при описании двигателя учитываются взаимосвязи по различным каналам регулирования без известных допущений, которые часто вводятся при компенсации перекрестных связей. Кроме того, в модели возможен учет кривой намагничивания двигателя, имеется возможность наблюдать большое количество переменных состояния двигателя.

3. Модель позволяет анализировать изменение переменных электропривода с векторным управлением с учетом системы трехфазных токов и напряжений, питающих двигатель, и осуществляет преобразование прямоугольных систем координат, в которых рассматриваются переменные двигателя.

4. Модель может быть использована для анализа режимов работы отдельных элементов электропривода в тормозных режимах с учетом тормозного резистора и заданных пределов изменения напряжения в звене постоянного тока.

5. Модель позволяет анализировать работу электропривода с учетом влияния параметров широтно-импульсной модуляции в инверторе напряжения.

6. Полученная модель может быть использована для анализа работы электропривода переменного тока при различных настройках регуляторов системы регулирования скорости.

7. Разработанная модель может быть использована в учебном процессе для иллюстрации и изучения процессов в электроприводе переменного тока в различных режимах его работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анучин А.С. Системы управления электроприводов. М.: Издательский дом МЭИ, 2015. 373 с.
2. Виноградов А.Б. Векторное управление электроприводами переменного тока. Иваново: ИГЭУ, 2008. 298 с.
3. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. М.: Издательский центр «Академия», 2007. 272 с.
4. Усольцев А.А. Частотное управление асинхронными двигателями: учебное пособие. СПб.: СПбГУ-ИТМО, 2006. 94 с.
5. Терехов В.М., Осипов О.И. Системы управления электроприводов. М.: Издательский центр «Академия», 2006. 304 с.

6. Мещеряков В.Н., Воеков В.Н. Векторная система управления вентильным электроприводом на базе автономного инвертора напряжения с релейным регулированием входного тока инвертора и фазных токов статора // Вестник ЮУрГУ. Серия: Энергетика. 2017. Т. 17. № 2. С. 48-57.
7. Электрооборудование современных цехов ОАО «ММК» / Е.Я. Омельченко, А.Н. Козин, В.Н. Маколов, П.А. Бовшик, С.Н. Попов // Электротехнические системы и комплексы. 2014. №1(22). С. 43-46.
8. Головин В.В., Косенков А.В., Разворотнев В.П. Опыт внедрения современных электроприводов в ОАО «ММК» // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2010. №3-2. С. 149-156.
9. Bose B.K. Modern Power Electronics and AC Drives. NJ: Prentice Hall, 2002. 738 p.
10. Шрейнер Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты. Екатеринбург: УРО РАН, 2000. 654 с.
11. Терехин В.Б., Деметьев Ю.Н. Компьютерное моделирование систем электропривода постоянного и переменного тока в Simulink. М.: Издательство Юрайт, 2019. 306 с.
12. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, Sim Power System и Simulink. М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. 288 с.
13. Герман-Галкин С.Г. MATLAB&SIMULINK. Проектирование мехатронных систем на ПК. СПб.: Издательство «Корона. Век», 2014. 368 с.
14. Шохин В.В., Пермякова О.В., Короткова Е.В. Моделирование взаимосвязанного частотно-регулируемого электропривода прокатного стана // Электротехнические системы и комплексы: междунар. сб. науч. трудов. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2013. Вып. 21. С. 70-75.
15. Шохин В.В., Храмшин В.Р., Новецки Р.Ю. Исследование на математической модели электроприводов черновых клетей сортового стана 450 СПЦ ОАО «ММК» // Вестник ЮУрГУ. Серия: Энергетика. 2017. Т. 17. № 2. С. 58-66.
16. Shokhin V.V., Permyakova O.V. The study of continuous rolling mill inter-stand tension inferential control systems // Procedia Engineering. 2015. Vol. 129. Pp. 231-238. doi: 10.1016/j.proeng.2015.12.038
17. Improvement of electric and mechanical system for automated strip tension control at continuous wide-strip hot-rolling mill / V.R. Khrumshin, A.A. Radionov, G.P. Kornilov, K.E. Odintsov // Procedia Engineering. 2016. Vol. 150. Pp. 11-17. doi: 10.1016/j.proeng.2016.07.208
18. Khrumshin V.R. Ways to compensate for static deviations in speed in electric drives of broad-strip hot rolling-mill stands // Russian Electrical Engineering. 2013. Vol. 84. No. 4. Pp. 221-227. doi: 10.3103/S1068371213040032
19. Algorithms of a digital automatic system for tension and loop control in a widestrip hot-rolling mill / P.V. Shilyaev, I.Yu. Andryushin, V.V. Golovin, A.A. Radionov, A.S. Karandaev, V.R. Khrumshin // Russian Electrical Engineering. 2013. Vol. 84. No. 10. Pp. 533-541. doi: 10.3103/S106837121310009X

Поступила в редакцию 28 декабря 2021 г.

INFORMATION IN ENGLISH

SIMULATION OF THE ASYNCHRONOUS MOTOR VECTOR CONTROL SYSTEM WITH AN ELECTRIC COORDINATE CONVERSION

Valery V. Shokhin

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Department of Automated Electric Drive and Mechatronics, Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, valeri4549@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8804-2253>

Vadim R. Khrumshin

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

Gennady P. Kornilov

D.Sc. (Engineering), Professor, Head of the Department, Department of Industrial Power Supply, Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, korn_mgn@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2451-3850>

Olga V. Permyakova

Senior Lecturer, Department of Computer Science and Information Safety Engineering, Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, mrs.permyakova.olga@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-4949-0744>

The paper is concerned with the structural scheme model of the asynchronous motor vector control system with frequency control of the speed in which the coordinate conversion is carried out. A virtual model of an asynchronous motor from the Simulink Matlab library is used. The engine power is carried out from the frequency converter with a DC link with a pulse modulation. The speed control system is constructed using the principles of subordinate control of the electric drive coordinates. To analyze the operation of electric drives with vector control, a structural modeling method is adopted. The advantage of the presented model is making use of virtual models of asynchronous motors from the Simulink library. This significantly simplifies the modeling process and presents great opportunities for researchers. In this case, during the study of electric drives, it is only necessary to specify the main parameters of the motor under study. It is possible to take into account the magnetization curve of electrical steel. To measure the motor variables, a special unit is provided in which a large number of electrical machine variables can be displayed. The consideration of the motor along such a model leads to a structural diagram of the motor without simplifications, which are often entered when compensating cross-links through the channels of flow control channels and the moment. Blocks are created in which the three-phase stator current system is transformed into a two-phase system in a fixed coordinate system. This two-phase system is then converted into a two-phase coordinate system rotating with the speed of the stator field with the orientation of the real axis according to the rotor stream vector. The output coordinates of this block are used as feedback signals on the constituent stator current, proportional to the stream and the electromagnetic torque of the engine. A system of subordinate control of the coordinates of the electric drive coordinate for speed control is created. The output of this regulatory system is the voltage reference signals presented in a two-phase coordinate system rotating with the speed of the engine field. These signals are converted to a two-phase immobile coordinate system, and then into a three-phase system of the specifying signals for the frequency converter. The presented structure of the AC electric drive model gives significant opportunities to researchers when analyzing the operation of alternating current.

Keywords: Asynchronous motor, vector control, frequency converter, fixed and rotating coordinate system, structural modeling, subordinate coordinate control, latitudinal and pulse modulation.

REFERENCES

1. Anuchin A.S. *Sistemy upravleniya electropriwodov* [Electric drive control systems]. Moscow, Publishing house of MPEI, 2015. 373 p. (In Russian)
2. Vinogradov A.B. *Vektornoe upravlenie electroprivodami peremennogo toka* [Vector control of AC drives]. Ivanovo, IGEU Publ., 2008. 298 p. (In Russian)
3. Sokolovskiy G.G. *Elektroprirody peremennogo toka s chastotnym regulirovaniem* [Frequency-controlled AC electric drives]. Moscow, Publishing center «Academy», 2007. 272 p. (In Russian)
4. Usoltsev A.A. *Chastotnoe upravlenie asinkhronnymi dvigatelyami* [Frequency control of asynchronous motors]. Saint Petersburg, St. Petersburg SU-ITMO Publ., 2006. 94 p. (In Russian)
5. Terekhov V.M., Osipov O.I. *Sistemy upravleniya electropriwodov* [Electric drive control systems]. Moscow, Publishing center «Academy», 2006. 304 p. (In Russian)
6. Meshcheryakov V.N., Voikov V.N. Vector control system of valve electric drive based on autonomous voltage inverter with relay control of the inverter input current and stator phase current. *Vestnik YuUrGU. Seria: Energetika* [Bulletin of SUSU. Series: Power engineering], 2017, vol. 17, no. 2, pp. 48-57. (In Russian)
7. Omelchenko E.Ya., Kozin A.N., Makolov V.N., Bovshik P.A., Popov S.N. Electrical equipment of modern shops at OJSC «MMK». *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2014, no. 1(22), pp. 43-46. (In Russian)
8. Golovin V.V., Kosenkov A.V., Razvorotnev V.P. Implementation of modern electric drives at OJSC «MMK». *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki* [Bulletin of Tula State University. Technical sciences], 2010, iss. 3, vol. 2, pp. 149-156. (In Russian)
9. Bose B.K. *Modern Power Electronics and AC Drives*. NJ: Prentice Hall, 2002. 738 p.
10. Shraimer R.T. *Matematicheskoe modelirovanie electropriwodov peremennogo toka s poluprovodnikovymi preobrazovatelyami chastoty* [Mathematical simulation of AC electric drives with semiconductor frequency converters]. Yekaterinburg, URO RAN Publ., 2000. 654 p. (In Russian)
11. Terekhin V.B., Dementyev Yu.N. *Kompyuternoe modelirovanie sistem elektropriroda postoyannogo i peremennogo toka v Simulink* [Computer simulation of DC and AC drive systems in Simulink]. Moscow, Publishing house Yright, 2019. 306 p. (In Russian)
12. Chernykh I.V. *Modelirovanie elektrotekhnicheskikh ustroystv v MATLAB, Sim Power System i Simulink* [Simulation of electrical devices in MATLAB, Sim Power System and Simulink]. Moscow, DMK Press Publ., St. Petersburg, Piter Publ., 2008. 288 p. (In Russian)
13. German-Galkin S.G. *MATLAB&SIMULINK. Proektirovanie mekhatronnykh system na PK* [MATLAB&SIMULINK. Mechatronics system development on PC]. St. Petersburg, Publishing house «Crown. Century», 2014. 368 p. (In Russian)
14. Shokhin V.V., Permyakova O.V., Korotkova E.V. Simulation of interrelated frequency controlled electric drive of a rolling mill. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical systems and complexes]. Magnitogorsk, Publishing center of Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2013, iss. 21, pp. 70-75. (In Russian)

15. Shokhin V.V., Khamshin V.R., Novetski R.Yu. Application of mathematical model to investigate roughing stand electric drives of 450 section mill at steel-making shop of OJSC MMK. *Vestnik YuUrGU. Seria: Energetika* [Bulletin of SUSU. Series: Power engineering], 2017, vol. 17, no. 2, pp. 58-66. (In Russian)
16. Shokhin V.V., Permyakova O.V. The study of continuous rolling mill inter-stand tension inferential control systems. *Procedia Engineering*, 2015, vol. 129, pp. 231-238. doi: 10.1016/j.proeng.2015.12.038.
17. Khamshin V.R., Radionov A.A., Kornilov G.P., Odintsov K.E. Improvement of electric and mechanical system for automated strip tension control at continuous wide-strip hot-rolling mill. *Procedia Engineering*, 2016, vol. 150, pp. 11-17. doi: 10.1016/j.proeng.2016.07.208
18. Khamshin V.R. Ways to compensate for static deviations in speed in electric drives of broad-strip hot rolling-mill stands. *Russian Electrical Engineering*, 2013, vol. 84, no. 4, pp. 221-227. doi: 10.3103/S1068371213040032.
19. Shilyaev P.V., Andryushin I.Yu., Golovin V.V., Radionov A.A., Karandaev A.S., Khamshin V.R. Algorithms of a digital automatic system for tension and loop control in a widestrip hot-rolling mill. *Russian Electrical Engineering*, 2013, vol. 84, no. 10, pp. 533-541. doi: 10.3103/S106837121310009X

Моделирование системы векторного управления асинхронным двигателем с преобразованием координат электропривода / В.В. Шохин, В.Р. Храмшин, Г.П. Корнилов, О.В. Пермякова // *Электротехнические системы и комплексы*. 2022. № 1(54). С. 29-37. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-1\(54\)-29-37](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-1(54)-29-37)

Shokhin V.V., Khamshin V.R., Kornilov G.P., Permyakova O.V. Simulation of the Asynchronous Motor Vector Control System with an Electric Coordinate Conversion. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2022, no. 1(54), pp. 29-37. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-1\(54\)-29-37](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-1(54)-29-37)

¹ Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург

² Новосибирский государственный технический университет

³ Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими, г. Душанбе, Республика Таджикистан

АДАПТИВНЫЕ АНСАМБЛЕВЫЕ МОДЕЛИ ДЛЯ СРЕДНЕСРОЧНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВЫРАБОТКИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЯМИ В ИЗОЛИРОВАННЫХ ЭНЕРГОСИСТЕМАХ С УЧЁТОМ ИЗМЕНЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ

В статье выполнен анализ взаимосвязи между выработкой электроэнергии на гидроэлектростанциях (ГЭС) и изменениями температуры для среднесрочного прогнозирования в изолированной энергосистеме Горно-Бадахшанской автономной области (ГБАО) Республики Таджикистан. Повышение точности прогнозирования позволит решить проблему контроля расхода воды, а также оптимизировать выработку электроэнергии на ГЭС с обеспечением надёжного функционирования энергосистемы. Решение подобных задач связано с рядом проблем, таких как отсутствие достаточного объема данных, неопределенность выработки электроэнергии, отсутствие регулярности работы одной станции и недостаточная точность используемых на ГЭС моделей прогнозирования. При среднесрочном прогнозировании выработки электроэнергии на ГЭС следует учитывать сезонность изменений стока и притока воды, особенно в энергосистемах с высокой долей возобновляемых источников энергии, где изменение температуры напрямую влияет на запасы и возможность регулирования. В работе рассматривается проблема построения модели среднесрочного прогнозирования выработки электроэнергии на ГЭС с учетом изменений температуры в изолированных энергосистемах. В качестве метода среднесрочного прогнозирования выработки электроэнергии был выбран подход машинного обучения, который характеризуется высокой степенью адаптации к изменениям условий работы. Проведено сравнительное исследование таких моделей, как линейная/полиномиальная регрессия с регуляризацией Тихонова, алгоритм k-ближайших соседей, адаптивный бустинг деревьев решений, адаптивный бустинг линейных моделей, случайный лес, экстремальный градиентный бустинг, многослойный перцептрон. В результате выполнения компьютерного моделирования обоснована целесообразность применения модели на базе адаптивного бустинга с линейной регрессией (ABLR).

Ключевые слова: ансамблевые модели, среднесрочное прогнозирование, гидроэлектростанция, выработка электроэнергии, изолированная энергосистема, температура.

ВВЕДЕНИЕ

Гидроэнергетика на сегодняшний день остается наиболее важной из возобновляемых источников энергии для производства электроэнергии во всем мире, обеспечивая 19% электроэнергии планеты [1, 2]. Малая гидроэлектростанция (МГЭС) в большинстве случаев является «речной», без плотины или водохранилища и является одной из наиболее экономически эффективных и экологически безопасных энергетических технологий, которые следует рассматривать для электроснабжения сельских районов в менее экономически развитых странах [3-6].

Точное и надежное прогнозирование выработки электроэнергии ГЭС имеет важное значение для управления и планирования гидрогенерации. Ввиду бурного развития распределенной генерации возникает нехватка исторических данных о производстве электроэнергии, что затрудняет разработку прогнозных моделей. Задача прогнозирования выработки электроэнергии на ГЭС считается одной из самых сложных задач в области интеллектуального анализа данных, требующей комплексного анализа больших объемов данных с учетом влияния на электропотребление множества взаимосвязей и динамических процессов.

Среднесрочное прогнозирование выработки электроэнергии для каждого вида возобновляемых источников

является ключевым вопросом для энергосистемы, поскольку такое прогнозирование является базовым инструментом для обеспечения надежного электроснабжения, планирования резерва мощности, организации обслуживания и ремонта и ведения режима. Для собственников возобновляемых источников среднесрочное прогнозирование имеет решающее значение для определения модели поведения на рынке электроэнергии, планирования задач по техническому обслуживанию и формирования плановых показателей с горизонтом в одну неделю.

Большинство опубликованных работ, направленных на разработку моделей среднесрочного прогнозирования и связанных с вопросами гидроэнергетики, ориентировано на управление водными ресурсами на базе прогнозных данных только о притоке в водохранилища [7, 8] или с учетом информации о стоке и притоке [9-11]. Ряд исследований направлен на оценку мощности и планирования выработки для мини-ГЭС [12], малых ГЭС [13], а также крупных ГЭС [14]. Применяемые модели среднесрочного (на неделю вперед) прогнозирования выработки электроэнергии не учитывают климатических изменений. Для среднесрочного прогнозирования может быть применено множество различных методов, от простейших регрессионных моделей до глубоких рекуррентных нейронных сетей. При этом кроме выбора модели необходимо выполнять анализ исходных и предобработку данных, а также отбор признаков.

В данной работе рассмотрен подход по использованию компактных моделей на базе машинного обучения

для среднесрочного прогнозирования выработки электроэнергии гидроэлектростанциями с учётом изменений температуры, отличием которого является полная автономность и автоматизация обучения и исключение риска переобучения. Настройка гиперпараметров модели может быть выполнена автоматизировано с применением случайного поиска или поиска по сетке.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Исследуемым объектом является изолированная энергосистема Горно-Бадахшанской автономной области – региона Республики Таджикистан. Изолированной энергосистемой ГБАО управляет компания Ramig Energy, на балансе которой находится 11 ГЭС общей мощностью 43,5 МВт. На сегодняшний день изолированная энергосистема ГБАО испытывает серьезные трудности, связанные с устойчивым дефицитом электроэнергии в зимний период с ноября по март. Основными причинами дефицита электроэнергии в изолированной энергосистеме ГБАО являются следующие [15-17]:

- изолированная работа энергосистемы;
- ограниченность стока воды в реках в зимнем (меженном) периоде;
- отсутствие сезонных накопителей энергии (водохранилищ);
- рост потребления электрической энергии населением в зимнем отопительном периоде.

Задача прогнозирования в данной работе сформулирована следующим образом. Построение модели, выполняющей преобразование входных данных (признаков) X в прогноз вырабатываемой за сутки электроэнергии мощностей генерации на неделю (7 дней) вперед E^* :

$$E^* = f(X). \quad (1)$$

Показателем точности прогноза в данной работе выбран средний модуль процента ошибки (MAPE):

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{E_i^* - E_i}{E_i} \right|, \quad (2)$$

где n – число дней в выборке; E_i^* – прогнозное значение генерируемой электроэнергии в i -е сутки; E_i – истинное значение в i -е сутки.

Используемый набор данных содержит суточные значения вырабатываемой электроэнергии (изолированная энергосистема ГБАО) с ноября по март включительно за 5 лет (2015–2019) и среднесуточные температуры, данные за 765 суток. Для обработки данных номера месяцев были преобразованы следующим образом: ноябрь – 1, декабрь – 2, март – 5. Отсчет лет начинается с 2015 года, так что номера годов преобразованы к диапазону 1–5. На рис. 1 приведены графики за один и тот же месяц (январь).

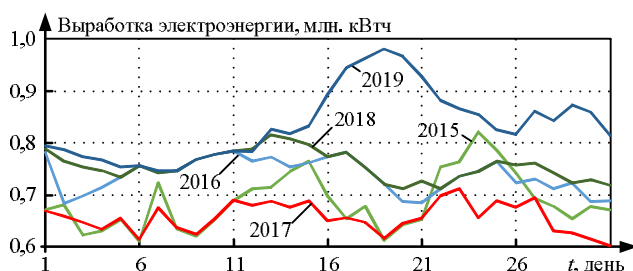


Рис. 1. Фрагмент выборки данных (январь 2015–2019 годов)

Перед построением модели прогнозирования необходимо провести оценку и отбор наиболее значимых признаков, что может существенно повлиять на процесс обучения моделей на базе машинного обучения [18]. Помимо календарных данных (год, месяц и число месяца), для прогноза необходимо использовать ретроспективные данные генерации. Также в работе проверяется гипотеза о влиянии среднесуточной температуры на точность прогноза.

На рис. 2 показана матрица, состоящая из коэффициентов корреляции Пирсона, для факторов, которые могут быть использованы при прогнозировании. Кроме них, используются ретроспективные данные выработки электроэнергии в предыдущие дни. Видно, что из метеорологических факторов существенное влияние оказывает среднесуточная температура (коэффициент 0,357), кроме того, явно наблюдается изменение год от года (коэффициент 0,38).

Сформированная структура выборки данных для построения регрессионных моделей показана в табл. 1, где m – длина используемого временного ряда ретроспективных значений. Если используется неделя, то $m = 7$, две недели – 14 и т.д. Например, если $m = 7$ и дается прогноз на 26 января, то для формирования прогноза будут использованы ретроспективные данные с 19 (E_{i-7} , $26 - 7 = 19$) по 13 (E_{i-13} , $26 - [7 + m - 1] = 13$) января включительно.

Число записей в выборке зависит от m , так как для первых $m + 7$ дней начального месяца (января) нет нужного количества ретроспективных данных. Выборка делится на обучающую-валидационную и тестовую в пропорции 4 к 1 (в данном случае в тестовую выборку попадает последний год всей выборки). Нужно отметить, что выборка не перемешивалась, так что тестирование было проведено в условиях, соответствующих реальным, когда модель обучается на ретроспективных данных, а затем используется в будущем на новых данных.

В табл. 2 приведены размеры выборок при разных значениях m .

	день	месяц	год	температура	влажность	скорость ветра	выработка
день	1,00	0,0	0,01	0,03	0,05	0,00	0,00
месяц	0,01	1,00	0,00	0,43	0,48	0,09	-0,18
год	0,00	0,00	1,00	-0,10	0,10	-0,26	0,38
температура	0,03	0,43	-0,10	1,00	-0,32	0,27	0,36
влажность	0,05	-0,48	0,10	-0,32	1,00	-0,20	0,00
скорость ветра	0,00	0,09	-0,26	0,27	-0,20	1,00	0,04
выработка	0,00	-0,18	0,38	0,36	0,00	0,04	1,00

Рис. 2. Матрица коэффициентов корреляции

Таблица 1
Структура выборки для применения машинного обучения и пример заполнения

День	Месяц	Год	Темп-ра, С°	E_{i-7} , млн кВтч	...	$E_{i-(m+7-1)}$, млн кВтч	E_i , млн кВтч (прогнозируемое значение)
26	3	2	-3,2	0,687	...	0,782	0,724

Таблица 2
Размеры выборок при разных интервалах используемых ретроспективных данных

m	Число столбцов	Число строк в обучающей выборке	Число строк в валидационной выборке	Число строк в тестовой выборке
7	11	576	110	137
14	18	547	104	130
21	25	518	98	123

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ МОДЕЛИ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Модели, подбираемые гиперпараметры и диапазоны их значений приведены в **табл. 3**.

В **табл. 3** использованы следующие обозначения:

- LR – линейная / полиномиальная регрессия с регуляризацией Тихонова;
- kNN – k-ближайших соседей;
- ABDT – адаптивный бустинг деревьев решений;
- ABLR – адаптивный бустинг линейных моделей;
- RF – случайный лес;
- XGB – экстремальный градиентный бустинг;
- MLP – многослойный перцептрон.

Таблица 3
Результаты подбора гиперпараметров примененных моделей машинного обучения

Модель	Гипер-параметр	Минимальное значение	Максимальное значение	Шаг	Подобранное значение
LR	Степень полинома	1	3	1	1
kNN	Число ближайших соседей k	2	8	1	2
ABDT	Число базовых моделей	10	50	1	14
	Глубина деревьев	2	6	1	3
	Минимальное число точек данных для ветвления	2	8	1	3
ABLR	Число базовых моделей	2	10	1	2
RF	Число базовых моделей	10	50	1	37
	Глубина деревьев	2	10	1	5
	Минимальное число точек данных для ветвления	2	8	1	2
XGB	Число базовых моделей	10	50	1	29
	Глубина деревьев	2	10	1	4
	Скорость обучения	0,01	0,5	0,05	0,3
MLP	Число нейронов первого скрытого слоя	10	200	10	90
	Число нейронов второго скрытого слоя	10	100	10	80

Для настройки гиперпараметров модели был применен случайный поиск (Random Search). Подбор гиперпараметров выполнялся при m , равном 14. Программные реализации моделей, кроме XGBoost [19], взяты из открытой библиотеки Scikit-Learn [20]. Для не приведенных в **табл. 3** гиперпараметров использованы значения по умолчанию из указанных источников.

Для всех моделей был проведен анализ влияния длины используемого временного ряда предыдущих значений генерации и влияние температуры на точность прогнозов.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты моделей при различных вариантах используемых входных признаков на тестовой выборке приведены в **табл. 4** и на **рис. 3**.

Из полученных результатов можно сделать следующие заключения:

1. Ансамбли деревьев решений, то есть модели с дискретным (кусочно-постоянным) выходом, уступают моделям с непрерывным выходом на 2-5 процентных пункта.

2. Для моделей с использованием линейной регрессии (LR и ABLR) увеличение интервала используемых ретроспективных данных несколько снижает ошибку, можно предположить, что за счет более точного определения тренда.

3. Наилучшая точность получена при использовании адаптивного бустинга с линейной регрессией в качестве базовой модели, что совпадает с результатами, полученными ранее для прогнозирования электропотребления данной системы [17].

4. Существенное снижение точности моделей при использовании метеорологических данных является несколько неожиданным результатом, который требует дополнительного анализа. Вероятно, изменение климата год от года приводит к изменению зависимостей между генерацией и температурой, так что модель, обученная на данных первых четырех лет, находит зависимости между температурой и генерацией, которые на следующий год оказываются измененными.

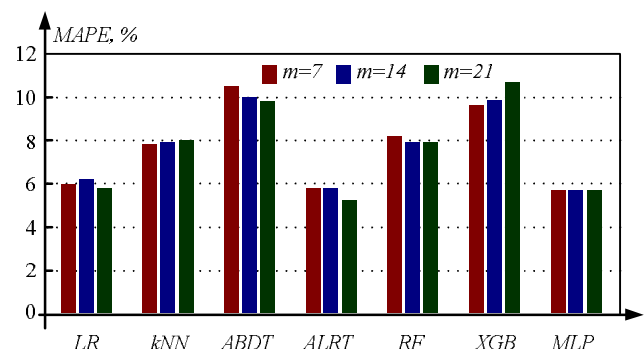


Рис. 3. Сравнение результатов моделей

Таблица 4
Сравнение результатов моделей

Модель	Без использования температуры			С использованием температуры		
m	7	14	21	7	14	21
LR	5,99	6,20	5,76	6,53	7,15	7,19
kNN	7,83	7,90	7,99	13,41	14,12	13,35
ABDT	10,52	10,00	9,80	10,78	10,35	10,01
ABLR	5,82	5,78	5,23	6,25	7,30	6,98
RF	8,21	7,87	7,93	8,29	8,13	7,72
XGB	9,61	9,83	10,71	10,84	11,80	12,76
MLP	5,70	5,71	5,70	8,69	9,86	10,12

Это подтверждается визуализацией, показанной на рис. 4-6. Их анализ показывает, что зависимости генерации от температуры существенно отличаются из года в год. Даже коэффициенты корреляции существенно отличаются, в 2015 году коэффициент корреляции Пирсона между генерацией и температурой составлял 0,38, в 2019 году – 0,77, то есть в 2019 году температура оказывала существенно большее влияние на генерацию. Поэтому при обучении модели на ретроспективных данных она выделяет определенные зависимости, которые затем перестают работать из-за указанных выше причин.

Кроме того, из правой части рис. 6, б видно, что 2019 год, который попал в тестовую выборку, в принципе характеризуется большим значением генерации, чем предыдущие 4 года, особенно при температурах выше 0°C.

Сопоставление прогноза, полученного наилучшей для задачи моделью (Адаптивный бустинг линейных регрессий с регуляризацией Тихонова), показано на рис. 7. Средняя ошибка на тестовой выборке составила 5,23% или 44 МВт·ч при средней суточной генерации 718 МВт·ч.

Регуляризация Тихонова (L2-регуляризация) может быть записана следующим образом:

$$w^* = \arg \min_w \left(\sum_{i=1}^n (y_i - (wX_i - b))^2 + \lambda \|w\|_2^2 \right). \quad (3)$$

В выражении (3) w , b – коэффициенты регрессии, $\|w\|_2^2$ – квадрат Евклидова расстояния или сумма квадратов всех элементов вектора w .

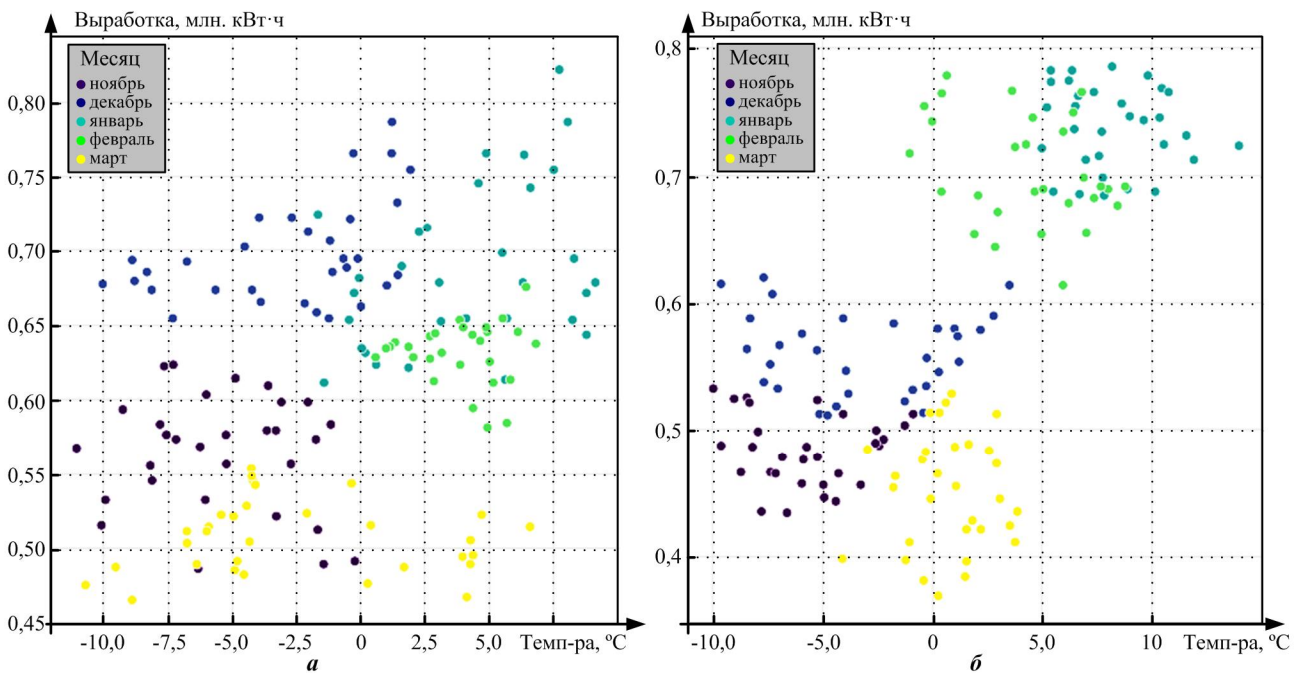


Рис. 4. Распределение дней по генерации и температуре: а – 2015 год, б – 2016 год

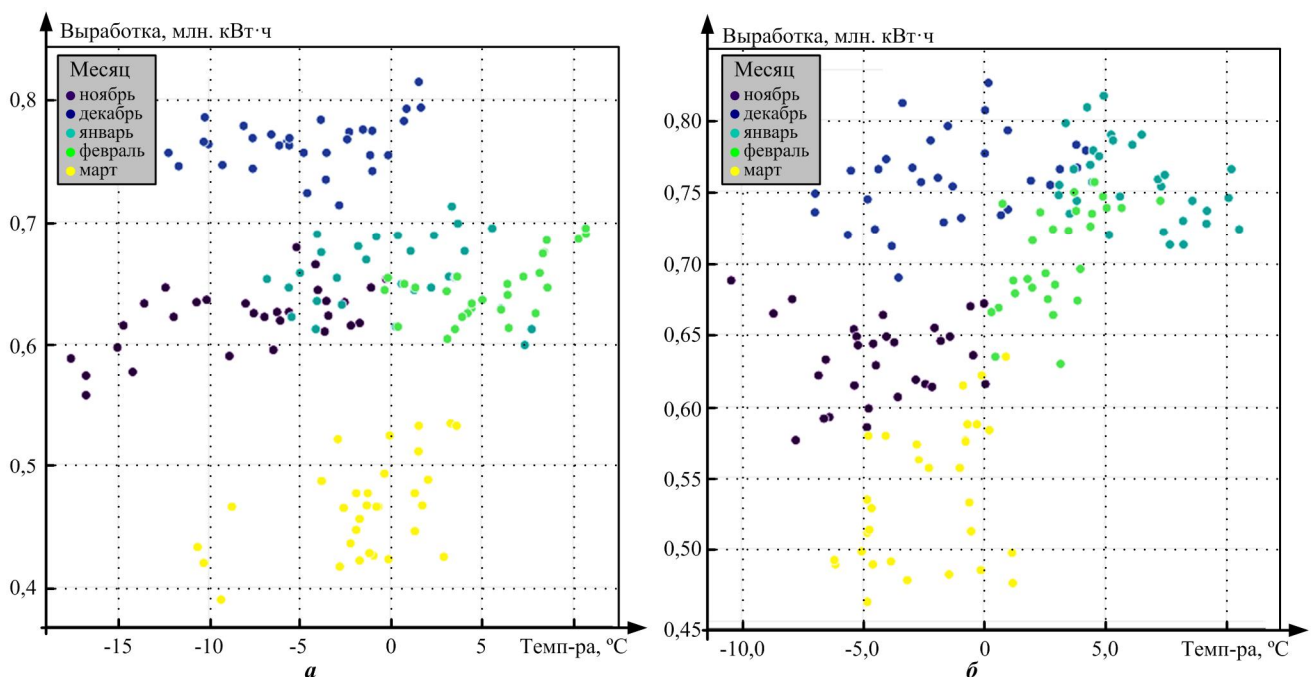


Рис. 5. Распределение дней по генерации и температуре: а – 2017 год, б – 2018 год

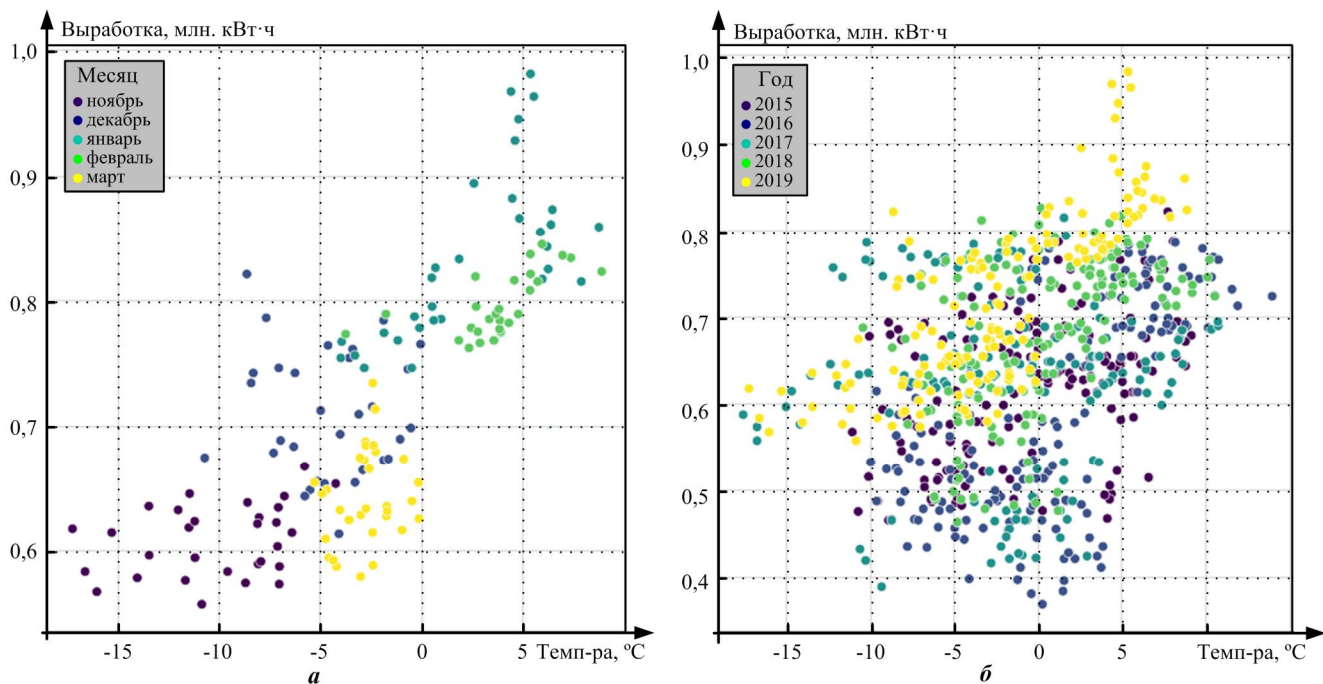


Рис. 6. Распределение дней по генерации и температуре: а – 2019 год, б – 2015-2019 годы

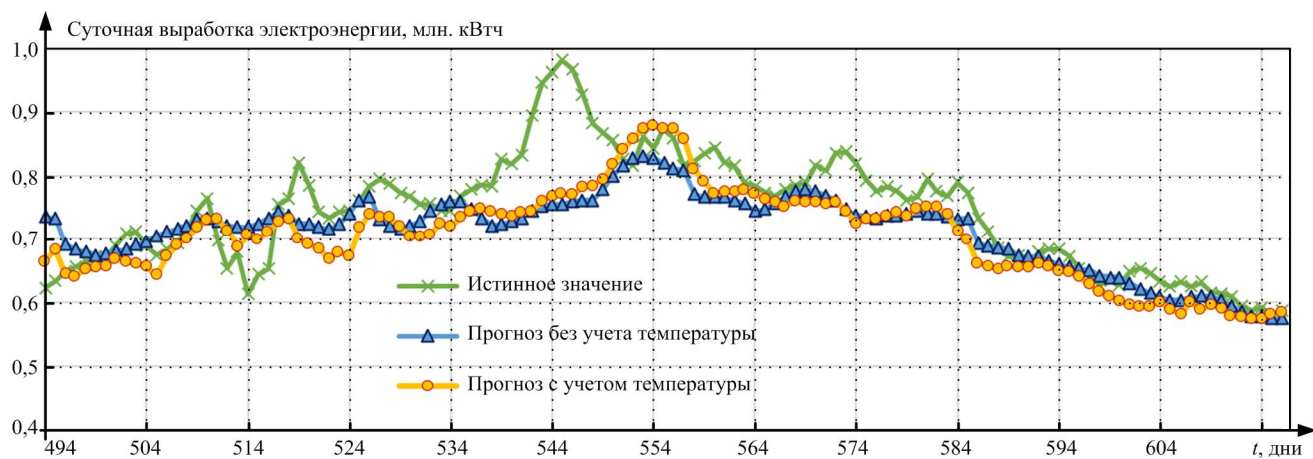


Рис. 7. Сопоставление прогнозов и истинных значений мощности, 2019 год (тестовая часть выборки)

Поскольку модель адаптивного бустинга представляет собой линейную взвешенную сумму базовых моделей, то итоговая ансамблевая модель, объединяющая 4 линейные регрессии, может быть после завершения обучения свернута с линейную форму:

$$Y^* = f(X) = AX + b;$$

$$y_i^* = f(x_i) = a_1 year_i + a_2 month_i + a_3 day_i + a_4 E_{7,i} + a_5 E_{8,i} + \dots a_{25} E_{28,i} + b.$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе основное внимание уделяется разработке модели среднесрочного прогнозирования выработки электроэнергии гидроэлектростанции на неделю вперед в изолированных энергосистемах с высокой долей ГЭС. Выполнен анализ семи различных моделей машинного обучения для прогнозирования выработки гидроэлектростанций на основе ретроспективных данных о генерации и метеорологических параметров. Наилучший результат был получен при ис-

пользовании адаптивного бустинга с линейной регрессией в качестве базовой модели.

Полученные результаты с высокой степенью достоверности позволяют сделать вывод, что ансамблевые методы машинного обучения являются приемлемым решением для среднесрочного прогнозирования выработки электроэнергии гидроэлектростанциями в условиях изменения температуры. Предлагаемый метод прогнозирования позволяет точно определить перспективные запасы электроэнергии и открывает возможность оптимизации выработки с учетом изменения климата.

Результаты, полученные в ходе этого исследования, могут использоваться для повышения качества прогнозирования выработки электроэнергии изолированной системой ГБАО при принятии обоснованных решений относительно структуры выработки электроэнергии в регионе. Кроме того, предложенные методы могут быть рекомендованы для других электроснабжающих компаний, управляющих изолированными энергосистемами.

Направлением дальнейшей работы является создание адаптивной модели с возможностью периодического дообучения с появлением новых данных и замещением устаревшей части обучающей выборки. В этом случае модель будет постоянно и регулярно приспосабливаться к изменению условий работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sachdev H.S., Akella A.K., Kumar N. Analysis and evaluation of small hydropower plants: A bibliographical survey // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015. Vol. 51. Pp. 1013-1022. doi: 10.1016/j.rser.2015.06.065
2. A Comprehensive Study on the Recent Progress and Trends in Development of Small Hydropower Projects / T.S. Kishore, E.R. Patro, V.S. Harish, A.T. Haghighi // *Energies*. 2021. Vol. 14 (10). 2882. doi: 10.3390/en14102882
3. Algorithm for calculation and selection of micro hydropower plant taking into account hydrological parameters of small watercourses mountain rivers of Central Asia / M.S. Asanov, M.Kh. Safaraliev, T.Zh. Zhabudaev, S.M. Asanova, S.E. Kokin, S.A. Dmitriev, A.J. Obozova, A.H. Ghulomzoda // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2021. Vol. 46. No. 75. Pp. 37109-37119. doi: 10.1016/j.ijhydene.2021.08.160
4. Bayazit Y., Bakış R., Koç C. A study on transformation of multi-purpose dams into pumped storage hydroelectric power plants by using GIS model // *International Journal of Green Energy*. 2020. Iss. 3. Pp. 1-11. doi: 10.1080/15435075.2020.1865362
5. Recloser-Based Decentralized Control of the Grid with Distributed Generation in the Lahsh District of the Rasht Grid in Tajikistan, Central Asia / A. Ghulomzoda, A. Gulakhmadov, A. Fishov, M. Safaraliev, X. Chen, K. Rasulzoda, K. Gulyamov, J. Ahyoev // *Energies*. 2020. Vol. 13. No. 14. 3673. doi: 10.3390/en13143673
6. Mayeda A.M., Boyd A.D. Factors influencing public perceptions of hydropower projects: A systematic literature review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2020. Vol. 121. 109713. doi: 10.1016/j.rser.2020.109713
7. Baipenzhu Reservoir Inflow Flood Forecasting Based on a Distributed Hydrological Model / X. Shichao, Ch. Yangbo, X. Lixue, L. Chuan // *Water*. 2021. Vol. 13(3). 272. doi: 10.3390/w13030272
8. Banihabib M.E., Bandari R., Valipour M. Improving Daily Peak Flow Forecasts Using Hybrid Fourier-Series Autoregressive Integrated Moving Average and Recurrent Artificial Neural Network Models // *AI*. 2020. Vol. 1 (2). Pp. 263-275. doi: 10.3390/ai1020017
9. Albo-Salih H., Mays L. Testing of an Optimization-Simulation Model for Real-Time Flood Operation of River-Reservoir Systems // *Water*. 2021. Vol. 13. 1207. doi: 10.3390/w13091207
10. Priyanka S., Machiwal D. Streamflow forecasting: overview of advances in data-driven techniques // *Advances in Streamflow Forecasting*. 2021. No. 1. Pp. 1-50. doi: 10.1016/B978-0-12-820673-7.00013-5
11. Oluwaseun O., Stretch D. Neural network modeling of hydrological systems: A review of implementation techniques // *Natural Resource Modeling*. 2019. Vol. 32 (1). 12189. doi: 10.1111/nrm.12189
12. Capacity estimation of a minihydro plant based on time series forecasting / R. Peña, A. Medina, O. Anaya-Lara, J.R. McDonald // *Renewable Energy*. 2009. Vol. 34(5). Pp. 1204-1209. doi: 10.1016/j.renene.2008.10.011
13. Applying a Correlation Analysis Method to Long-Term Forecasting of Power Production at Small Hydropower Plants / G. Li, C.-X. Liu, S.-L. Liao, C.-T. Cheng // *Water*. 2015. Vol. 7 (9). Pp. 4806-4820. doi: 10.3390/w7094806
14. Future hydropower generation prediction of large-scale reservoirs in the upper Yangtze River basin under climate change / Z. Wenjie, G. Jing, Ch. Lu, Zh. Jianzhong, Zh. Junhong, W. Dangwei // *Journal of Hydrology*. 2020. Vol. 588. 125013. doi: 10.1016/j.jhydrol.2020.125013
15. Гуломзода А. Х., Сафаралиев М. Х., Люханов Е. А. Модифицированный способ синхронизации microgrid с внешней изолированной энергосистемой // *Электротехнические системы и комплексы*. 2021. № 3. С. 72-80. doi: 10.18503/2311-8318-2021-3(52)-72-80
16. Алгоритм выбора компенсирующих устройств на основе нечеткой логики / А.К. Киргизов, Ш.М. Султонов, С.Е. Кокин, М.Х. Сафаралиев // *Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования*. 2018. №4(44). С. 10-13.
17. Разработка моделей среднесрочного прогнозирования электропотребления в изолированно работающих энергосистемах на основе ансамблевых методов машинного обучения / С.М. Асанова, Дж.С. Ахеев, С.А. Дмитриев, П.В. Матренин, М.Х. Сафаралиев // *Известия НТЦ Единой энергетической системы*. 2021. № 1(84). С. 32-39.
18. Антоенков Д.В., Матренин П.В. Исследование ансамблевых и нейросетевых методов машинного обучения в задаче краткосрочного прогнозирования электропотребления горных предприятий // *Электротехнические системы и комплексы*. 2021. № 3(52). С. 57-65. doi: 10.18503/2311-8318-2021-3(52)-57-65
19. Chen T., Guestrin C. XGBoost: A Scalable Tree Boosting System // *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*. 2016. 785-794. doi: 10.1145/2939672.2939785
20. Официальный сайт Scikit-Learn. Machine learning in Python. URL: <https://scikit-learn.org> (дата обращения 01.02.2022)

Поступила в редакцию 19 декабря 2021 г.

INFORMATION IN ENGLISH

ADAPTIVE ENSEMBLE MODELS FOR MEDIUM-TERM FORECASTING OF POWER GENERATION BY HYDROPOWER PLANTS IN ISOLATED POWER SYSTEMS TAKING INTO ACCOUNT TEMPERATURE CHANGES

Murodbek Kh. Safaraliev

Postgraduate Student, research engineer, Department of Automated Electrical Systems, Ural Federal University, Ural Power Engineering Institute, Yekaterinburg, Russia, murodbek_03@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3433-9742>

Pavel V. Matrenin

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Department of Industrial Power Supply Systems, Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia, pavel.matrenin@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5704-0976>

Stepan A. Dmitriev

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Department of Automated Electrical Systems, Ural Federal University, Ural Power Engineering Institute, Yekaterinburg, Russia, dmstepan@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8781-2383>

Javod S. Ahoyev

Ph.D.(Engineering), Associate Professor, Department of Electric Stations, Tajik Technical University named after Academician M.S. Osimi, Dushanbe, Tajikistan, javod_66@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9869-288X>

Sergey E. Kokin

D.Sc. (Engineering), Professor, Department of Automated Electrical Systems, Ural Federal University, Ural Power Engineering Institute, Yekaterinburg, Russia, s.e.kokin@urfu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7493-172X>

The article analyzes the relationship between power generation at hydropower plants (HPPs) and temperature changes for medium-term forecasting in the isolated power system of the Gorno-Badakhshan Autonomous Oblast (GBAO) of the Republic of Tajikistan. Improving the accuracy of forecasting will solve the problem of controlling water consumption, as well as optimize the generation of electricity at the HPP with the provision of reliable functioning of the power system. The solution of such problems is associated with a number of problems such as the lack of sufficient data, the uncertainty of power generation, the lack of regularity of one station operation and poorly reliable forecasting models. In the medium-term forecasting of electricity generation at HPPs, the seasonality of changes in water flow and inflow should be taken into account, especially in power systems with a high proportion of renewable energy sources, where temperature changes directly affect reserves and the possibility of regulation. The paper considers the problem of constructing a model for medium-term forecasting of electricity generation at HPPs taking into account temperature changes in isolated power systems. As a method of medium-term forecasting of power generation, an approach based on machine learning methods was chosen, which is characterized by a high degree of self-adaptation in case of sudden changes in weather conditions. A comparative study of such models as linear/polynomial regression with Tikhonov regularization, k-nearest neighbours, adaptive boosting of decision trees, adaptive boosting of linear models, random forest, extreme gradient boosting, multilayer perceptron. As a result of experimental and industrial calculations, the expediency of using a model based on adaptive boosting with linear regression (ABLR) has been proved.

Keywords: ensemble models, medium-term forecasting, hydropower plant, power generation, isolated power system, temperature.

REFERENCES

1. Sachdev H.S., Akella A.K., Kumar N. Analysis and evaluation of small hydropower plants: A bibliographical survey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, vol. 51, pp. 1013-1022. doi: 10.1016/j.rser.2015.06.065
2. Kishore T.S., Patro E.R., Harish V.S., Haghighi A.T. A Comprehensive Study on the Recent Progress and Trends in Development of Small Hydropower Projects. *Energies*, 2021, vol. 14(10), art. id. 2882. doi: 10.3390/en14102882
3. Asanov M.S., Safaraliev M.Kh., Zhabudaev T.Zh., Asanova S.M., Kokin S.E., Dmitriev S.A., Obozova A.J., Ghulomzoda A.H. Algorithm for calculation and selection of micro hydropower plant taking into account hydrological parameters of small watercourses mountain rivers of Central Asia. *Int. J. Hydrogen Energy*, 2021, vol. 46, no. 75, pp. 37109-37119. doi: 10.1016/j.ijhydene.2021.08.160
4. Bayazit Y., Bakış R., Koç C. A study on transformation of multi-purpose dams into pumped storage hydroelectric power plants by using GIS model. *International Journal of Green Energy*, 2020, pp. 1-11. doi: 10.1080/15435075.2020.1865362
5. Ghulomzoda A., Gulakhmadov A., Fishov A., Safaraliev M., Chen X., Rasulzoda K., Gulyamov K., Ahoyev J. Recloser-Based Decentralized Control of the Grid with Distributed Generation in the Lahsh District of the Rasht Grid in Tajikistan, Central Asia. *Energies*, 2020, vol. 13, no. 14, pp. 3673. doi: 10.3390/en13143673
6. Mayeda A.M., Boyd A.D. Factors influencing public perceptions of hydropower projects: A systematic literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020, vol. 121, art. id. 109713. doi: 10.1016/j.rser.2020.109713
7. Shichao X., Yangbo Ch., Lixue X., Chuan L. Baipenzhu Reservoir Inflow Flood Forecasting Based on a Distributed Hydrological Model. *Water*, 2021, vol. 13(3), art. id. 272. doi: 10.3390/w13030272
8. Banihabib M.E., Bandari R., Valipour M. Improving Daily Peak Flow Forecasts Using Hybrid Fourier-Series Autoregressive Integrated Moving Average and Recurrent Artificial Neural Network Models. *AI*, 2020, vol. 1(2), pp. 263-275. doi: 10.3390/ai1020017
9. Albo-Salih H., Mays L. Testing of an Optimization-Simulation Model for Real-Time Flood Operation of River-Reservoir Systems. *Water*, 2021, vol. 13, art. id. 1207. doi: 10.3390/w13091207
10. Priyanka S., Machiwal D. Streamflow forecasting: overview of advances in data-driven techniques. *Advances in Streamflow Forecasting*, 2021, pp. 1-50. doi: 10.1016/B978-0-12-820673-7.00013-5
11. Oluwaseun O., Stretch D. Neural network modeling of hydrological systems: A review of implementation techniques. *Natural Resource Modeling*, 2019, vol. 32(1), art. id. 12189. doi: 10.1111/nrm.12189
12. Peña R., et al. Capacity estimation of a minihydro plant based on time series forecasting. *Renewable Energy*, 2009, vol. 34(5), pp. 1204-1209. doi: 10.1016/j.renene.2008.10.011
13. Li G., Liu C.-X., Liao S.-L., Cheng C.-T. Applying a Correlation Analysis Method to Long-Term Forecasting of Power Production at Small Hydropower Plants. *Water*, 2015, vol. 7(9), pp. 4806-4820. doi: 10.3390/w7094806
14. Wenjie Z., Jing G., Lu Ch., Jianzhong Zh., Junhong Zh., Dangwei W. Future hydropower generation prediction of large-scale reservoirs in the upper Yangtze River basin under climate change. *Journal of Hydrology*, 2020, vol. 588, art. id. 125013. doi: 10.1016/j.jhydrol.2020.125013
15. Gulomzoda A.Kh., Safaraliev M.Kh., Lyukhanov E.A. A Modified method for synchronizing a microgrid with an external isolated power system. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2021, no. 3, pp. 72-80. doi: 10.18503/2311-8318-2021-3(52)-72-80 (In Russian)
16. Kirgizov A.K., Sultonov Sh.M., Kokin S.E., Safaraliev M.Kh. Algorithm for selecting compensating devices based on fuzzy logic. *Politekhnikeskiiy vestnik. Seriya: Inzhenernye issledovaniya* [Polytechnic Bulletin. Series Engineering Research], 2018, no. 4 (44), pp.10-13. (In Russian)

17. Asanova S.M., Ahyoev J.S., Dmitriev S.A., Matrenin P.V., Safaraliev M.Kh. Development of models for power consumption medium-term forecasting in isolated power systems based on ensemble methods of machine learning. *Izvestiya NTTS Edinoy energeticheskoy sistemy* [Bulletin STC of the Unified Energy System], 2021, no. 1(84), pp. 32-39. (In Russian)
18. Antonenkov D.V., Matrenin P.V. Research of ensemble and neural network methods of machine learning in the problem of short-term forecasting of power consumption of mining enterprises. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical systems and complexes], 2021, no. 3(52), pp. 57-65. doi: 10.18503/2311-8318-2021-3(52)-57-65 (In Russian)
19. Chen T., Guestrin C. XGBoost: A Scalable Tree Boosting System. 2016, pp. 1-13. Available at: <https://arxiv.org/abs/1603.02754>. doi: 10.1145/2939672.2939785
20. Scikit-Learn. Machine learning in Python. Available at: <https://scikit-learn.org> (accessed 01 February 2022) (In Russian)

Адаптивные ансамблевые модели для среднесрочного прогнозирования выработки электроэнергии гидроэлектростанциями в изолированных энергосистемах с учётом изменений температуры / М.Х. Сафаралиев, П.В. Матренин, С.А. Дмитриев, Дж.С. Ахьеев, С.Е. Кокин // Электротехнические системы и комплексы. 2022. № 1(54). С. 38-45. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-1\(54\)-38-45](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-1(54)-38-45)

Safaraliev M.Kh., Matrenin P.V., Dmitriev S.A., Ahyoev J.S., Kokin S.E. Adaptive Ensemble Models for Medium-Term Forecasting of Power Generation by Hydro-power Plants in Isolated Power Systems Taking into Account Temperature Changes. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2022, no. 1(54), pp. 38-45. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-1\(54\)-38-45](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-1(54)-38-45)

Сенюк М.Д., Дмитриева А.А.

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

АПРОБАЦИЯ АЛГОРИТМА АНАЛИЗА ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ И ПРОТИВОАВАРИЙНОГО УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМОМ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА НА МНОГОМАШИННОЙ МОДЕЛИ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ

Статья посвящена развитию и апробации на многомашинной модели тестовой энергосистемы *IEEE39* адаптивного алгоритма синтеза закона противоаварийного управления с целью обеспечения динамической устойчивости. Разработанный алгоритм направлен на обеспечение динамической устойчивости отдельной электростанции. В рамках представленного исследования под синтезом закона противоаварийного управления понимается выбор минимального положения отсечного клапана паровой турбины на основе правила площадей в пространстве «Момент синхронного генератора – угол нагрузки» и синхронизированных векторных измерений. Адаптивность алгоритма обеспечивается за счёт использования минимального количества априорно заданных параметров элементов энергосистемы и синтеза закона противоаварийного управления в темпе протекания начальной фазы послеаварийного переходного процесса. В случае невозможности обеспечения динамической устойчивости производится отключение синхронного генератора от электрической сети. Для применения алгоритма в многомашинной энергосистеме была выполнена модификация полинома, аппроксимирующего угловую характеристику синхронного генератора послеаварийного режима, путём добавления синусоидального члена двойного угла нагрузки. Используемая тестовая модель *IEEE39* включает в себя 39 узлов, 10 синхронных генераторов с автоматическими регуляторами возбуждения сильного действия, системными стабилизаторами, первичными приводами в виде одновальных паровых турбин и типовыми моделями импульсной разгрузки паровой турбины. В рамках тестирования были рассмотрены 20 различных аварийных процессов, включающих самоустраниющиеся короткие замыкания в различных узлах тестовой модели. Для численного моделирования была использована среда *Matlab/Simulink* с постоянной величиной шага численного дифференцирования, соответствующего частоте дискретизации первичных данных с частотой 30 кГц.

Ключевые слова: динамическая устойчивость, противоаварийное управление, импульсная разгрузка паровой турбины, синхронный генератор, синхронизированные векторные измерения.

ВВЕДЕНИЕ

Ключевыми задачами при эксплуатации электроэнергетических систем (ЭЭС) являются: обеспечение устойчивости параллельной работы синхронных генераторов (СГ), требуемых уровней напряжений в контролируемых узлах, токовых нагрузок элементов электрической сети, сохранность силового оборудования, экономичность электрических режимов. Все перечисленные задачи решаются в рамках оперативно-диспетчерского управления. Одна из особенностей ЭЭС связана с высокой скоростью протекания переходных процессов, что делает невозможным решение задачи противоаварийного управления без применения специально разработанной автоматики.

Противоаварийное управление с целью обеспечения статической (СУ) и динамической устойчивости (ДУ) находит широкое применение в ЭЭС с протяжёнными связями между источниками и приёмниками электроэнергии, наличием СГ большой единичной мощности, режимами работы при близких к предельным перетокам мощности по контролируемым сечениям [1]. Данными особенностями в большей степени обладают ЭЭС Российской Федерации, Китая, Соединённых Штатов Америки. В практике противоаварийного управления режимами Единой Энергетической Системы (ЕЭС) России принято разделение систем противоаварийной автоматики (ПА) на локальные, обеспечивающие устойчивость отдельной электростанции, крупного узла нагрузки или выбранного энергорайона, и централизованные, направленные на обеспечение устойчивости крупных энергообъединений

[1]. Алгоритмы локальных ПА строятся чаще всего по способу «П-До», который подразумевает формирование таблицы управляющих воздействий (ТУВ) посредством выполнения серии расчётов установившихся и переходных электрических режимов для заранее подготовленной математической модели ЭЭС с учётом наиболее вероятных аварийных процессов.

Для построения централизованных систем ПА [2] применяется способ «I-До», который подразумевает расчёт ТУВ в циклическом режиме для актуального режима ЭЭС с учётом наиболее вероятных аварийных процессов. Способы построения систем ПА «I-До» и «П-До» нашли широкое применение в практике оперативно-диспетчерского управления режимами ЕЭС России.

Общеизвестными особенностями способов построения комплексов ПА «I-До» и «П-До» являются:

- выбор управляющих воздействий (УВ) выполняется только для заранее выбранных аварийных процессов, то есть устойчивость ЭЭС может не обеспечиваться при возникновении незапланированного возмущения или их каскадного наложения;

- выбор УВ основан на использовании математических моделей ЭЭС, параметры которых могут существенно отличаться от актуальных, что приводит к снижению точности противоаварийного управления режимами ЭЭС;

- использование способа «П-До» способствует увеличению вероятности реализации излишних УВ из-за учёта наихудших сценариев развития аварийных процессов.

Обозначенные особенности традиционных систем ПА преодолеваются за счёт резервирования и эшелонного способа построения систем противоаварийного управления.

Современный этап развития ЭЭС сопровождается изменениями состава генерирующего оборудования, характера протекания переходных процессов, принципов противоаварийного и режимного управления. Возникают новые особенности режимов ЭЭС, которые не были характерны для традиционных систем с генерацией преимущественно на углеродсодержащем топливе. В качестве направлений развития ЭЭС, оказывающих влияние на способы и условия работы систем ПА, выделяются:

- активное внедрение возобновляемых источников энергии (ВИЭ) [3], влияние которых на режим ЭЭС отражается в снижении суммарной инерции за счёт отсутствия вращающихся масс, увеличении нерегулярной составляющей перетоков активной мощности по элементам сети из-за стохастического характера генерации мощности;
- развитие систем измерения параметров электрического режима (ПЭР) на базе устройств синхронизированных векторных измерений (СВИ) [4]. В результате становится возможным получение результатов оценки ПЭР с минимальной задержкой (для традиционных устройств СВИ (УСВИ) – раз в период промышленной частоты, для экспериментальных – раз в 5–10 мс), высокой точностью, а также открывается возможность построения систем ПА с контролем относительного угла между узлами ЭЭС;
- развитие методов цифровой обработки сигналов (ЦОС) совместно с использованием данных СВИ позволяет определять параметры математических моделей ЭЭС непосредственно по измерениям [5], что значительно увеличивает как адаптивность, так и точность противоаварийного управления;
- повышение производительности и быстродействия вычислительных систем, позволяющих производить анализ ДУ ЭЭС и выбор УВ с минимальными задержками.

Развитие УСВИ, методов ЦОС и вычислительной техники приводят к возможности преодоления недостатков существующих методов построения систем ПА за счёт разработки алгоритмов по способу «После». Данный способ позволяет организовать противоаварийное управление с учётом актуального аварийного процесса при актуальных параметрах математических моделей ЭЭС.

Первые работы по разработке алгоритмов ПА по способу «После» появились в начале 2000-х годов. Основная часть предлагаемых алгоритмов была основана на применении энергетических критериев суммарной энергии ЭЭС и методов машинного обучения. Ограничивающими факторами для реализации предлагаемых алгоритмов являлись отсутствие распространения УСВИ и недостаточность производительности вычислительных комплексов.

Цель данной статьи заключается в комплексной апробации метода обеспечения ДУ СГ по способу «После» [6] на многомашинной математической модели IEEE39 [7].

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Один из первых алгоритмов ПА по способу «После» был предложен Бельгийским исследователем М. Pavella [8]. Предлагаемый алгоритм основан на приме-

нении правила площадей в пространстве «Активная мощность СГ – угол нагрузки» с прогнозированием площадки торможения с помощью синусоиды. В работе приведены теоретические выкладки, позволяющие построить алгоритм ПА по способу «После» при наличии синхронизированных измерений.

Авторами работы [9] предложен алгоритм построения ПА по способу «После» на основе данных, получаемых с УСВИ. Основные этапы алгоритма выглядят следующим образом:

- выявление начала переходного процесса по фиксации плавного увеличения угла между напряжениями по концам линии при одновременном снижении величины активной мощности;
- фиксация точки минимального напряжения;
- накопление данных для оценки параметров модели ЭЭС;
- контроль измерения параметров модели на заданном интервале времени;
- вычисление объёма УВ.

Предложенный алгоритм позволяет обеспечить устойчивость по отдельной передаче, представляющей собой радиальный транзит, соединяющий две части ЭЭС, содержащих источники активной мощности.

Для построения алгоритма ПА по способу «После» зарубежные авторы предполагают использовать искусственные нейронные сети (ИНС), теорию распознавания образов [10], метод анализа центра инерции ЭЭС, теорию Ляпунова [11].

Все рассмотренные методы, предложенные зарубежными авторами, были протестированы на математических моделях ЭЭС различной сложности и конфигурации. Для ряда работ были выявлены следующие особенности:

- обучение модели выполнялось на заранее подготовленных данных изменений ПЭР в процессе смоделированных возмущений. Подобный подход может приводить к значительной погрешности при изменении структуры или характеристик защищаемой ЭЭС;
- часть авторов используют динамические эквиваленты частей ЭЭС, определение параметров которых в реальном времени является отдельной сложной задачей;
- ряд алгоритмов не обладает численной устойчивостью в условиях некорректной настройки.

АЛГОРИТМ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДУ СГ ПО СПОСОБУ «ПОСЛЕ»

На **рис. 1** приведена блок-схема предлагаемого алгоритма обеспечения ДУ СГ.

Алгоритм обеспечения ДУ СГ состоит из трёх основных этапов: определение времени возмущения и начала послеаварийного режима (ПАР), прогнозирование ДУ СГ, синтез закона противоаварийного управления за счёт импульсной разгрузки турбины или отключения СГ от электрической сети.

Для определения времени возмущения используется ускоренный алгоритм, направленный на анализ ошибки прогноза мгновенного значения сигнала на интервале прогнозирования [12].

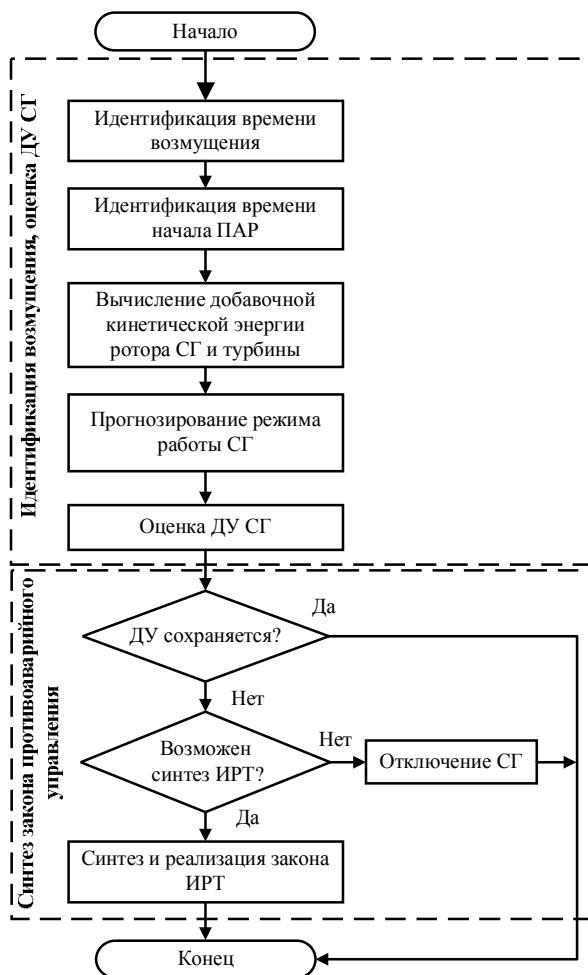


Рис. 1. Блок-схема алгоритма обеспечения ДУ СГ

Подробное описание и результаты апробации алгоритма обеспечения ДУ СГ на одномашинной модели приведены в работе [6]. Для анализа ДУ СГ в многомашинной системе внесено изменение в полином, аппроксимирующий послеаварийную моменто-угловую характеристику СГ:

$$M_{\text{СГ}}(\delta) = M_1 \sin(\delta + \varphi_1) + M_2 \sin(2\delta + \varphi_2), \quad (1)$$

где M_1 , M_2 – коэффициенты полинома; φ_1 и φ_2 – начальные фазы синусоид.

ЧИСЛЕННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Численные эксперименты выполнены с применением *Matlab/Simulink*. При апробации использовалась следующая система допущений:

- в рассматриваемой ЭЭС отсутствует автоматика ликвидации асинхронного режима;
- на всех СГ реализованы прямые измерения скорости вращения ротора [5];
- на каждом СГ установлено УСВИ;
- для привода каждого СГ используются паровые одновальные турбины с цилиндрами низкого, среднего и высокого давления [13];
- минимальная мощность паровых турбин, обеспечивающая стабильность работы котла составляет 0,3 о.е.;
- время открытия отсечного клапана принято равным 3 с;
- максимально допустимое время закрытого положения отсечного клапана составляет 1 с.

ОПИСАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Для апробации предложенного алгоритма синтеза закона противоаварийного опрвления была выполнена серия численных экспериментов с использованием модели *IEEE39* [7], содержащей 39 узлов, 10 СГ с автоматическими регуляторами возбуждения, системные стабилизаторы, модели паровых турбин и устройства импульсной разгрузки паровой турбины (ИРТ) [14]. Схема тестовой модели приведена на рис. 2, красной стрелкой показано место одного из рассмотренных коротких замыканий (КЗ).

В рассматриваемой модели СГ1 является эквивалентом внешней энергосистемы. В табл. 1 приведён исходный режим СГ в рассматриваемой математической модели ЭЭС. В качестве базовой мощности принято значение $S_{\text{base}} = 1000$ МВА. В табл. 1 приведены следующие значения: номер СГ, номер узла, к которому присоединён СГ, активная мощность СГ в рассматриваемом режиме, значение постоянной инерции СГ и паровой турбины.

Первичный привод всех СГ в рассматриваемой модели ЭЭС обеспечивается одновальной паровой турбиной [14]. Параметры модели паровой турбины и регулятора скорости вращения приведены в табл. 2.

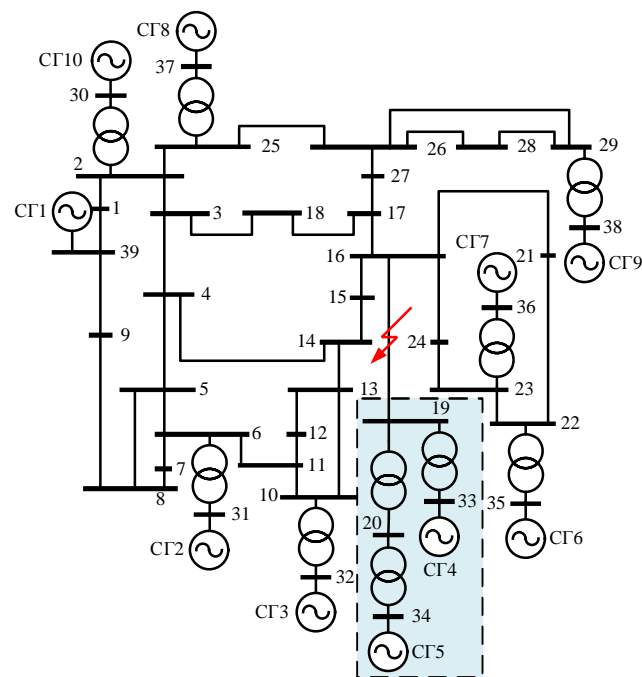


Рис. 2. Схема тестовой модели *IEEE39*

Таблица 1

Исходный режимы работы СГ

СГ	Узел	P , о.е.	H , с
1	39	0,41	50,00
2	31	0,71	3,03
3	32	0,68	3,58
4	3	0,84	2,86
5	34	1,00	2,30
6	35	0,65	3,48
7	36	0,93	2,64
8	37	0,77	2,43
9	38	0,54	3,45
10	30	0,72	4,20

Таблица 2

Параметры модели паровой турбины и регулятора частоты вращения

Модель	Параметры
Паровая одновальная турбина	$K_1 = 0,3$; $K_2 = 0,4$ $K_3 = 0,3$; $T_1 = 0,2$ с $T_2 = 7,0$ с; $T_3 = 0,4$
Регулятор частоты вращения паровой турбины	$\sigma = 4$ % $T_g = 0,3$ с $P_{CG\max} = 1,05$ о.е. $P_{CG\min} = 0,3$ о.е.

В табл. 2 приняты следующие обозначения:

- K_1, K_2, K_3 – составляющие механической мощности объёмов высокого, среднего и низкого давления;
- T_1 – постоянная времени парового объёма высокого давления, с;
- T_2 – постоянная времени пароперегревателя, с;
- T_3 – постоянная времени парораспределения и объёма низкого давления, с;
- σ – статизм автоматического регулятора частоты вращения турбины, %;
- T_g – постоянная времени регулятора, с;
- $P_{CG\max}, P_{CG\min}$ – максимальное и минимальное ограничение мощности СГ, %.

Для апробации методики оценки ДУ и синтеза закона ИРТ в работе подробно представлен один из рассмотренных численных экспериментов с трёхфазным самоустраниющимся КЗ в середине линии 13-19 в момент времени 10 с, длительностью 0,15 с. При рассмотренном возмущении СГ5 и СГ4 теряют устойчивость и переходят в асинхронный режим работы. На рис. 2 синей областью выделены СГ, которые в процессе возмущения теряют ДУ.

На рис. 3 приведены углы нагрузки СГ тестовой ЭЭС, из-за высокого значения постоянной инерции СГ 1 в рассматриваемом переходном процессе его угол нагрузки остаётся практически неизменным, поэтому он не показан.

Для СГ4 и СГ5 после устранения КЗ углы нагрузки превышают 180° , что говорит о потере устойчивости [14]. Послеаварийные колебания углов нагрузок СГ связаны с потерей устойчивости СГ4 и СГ5, приводящей к колебаниям уровней напряжений и углов нагрузок остальных СГ рассматриваемой ЭЭС.

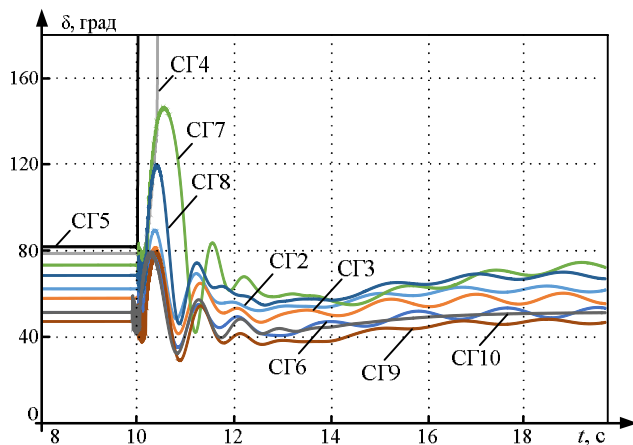


Рис. 3. Значения углов нагрузок СГ в переходном процессе

Угол нагрузки СГ5 изменяется с большей производной по сравнению с углом нагрузки СГ4 из-за меньшего значения постоянной инерции и большей нагрузки в нормальном режиме.

Оценка динамической устойчивости СГ

После идентификации времени возмущения запускается процедура вычисления избыточной кинетической энергии роторов защищаемых СГ (ΔW_k). На рис. 4 приведены значения изменений скоростей роторов СГ4 и СГ5.

На рис. 4 обозначены времена начала и окончания КЗ, которые определяются с помощью разработанного алгоритма определения времени возмущения [12]. Из-за большей нагрузки и меньшей постоянной инерции у СГ5 производная изменения скорости ротора больше, чем у СГ4.

Для прогнозирования площадки торможения в ПАР на рис. 5 приведены угловые характеристики СГ4 и СГ5 в пространстве «момент-угол нагрузки СГ».

Чёрной пунктирной линией на рис. 5 обозначены моменты паровых турбин в нормальном режиме работы ЭЭС, угловые характеристики, полученные в результате аппроксимации по выражению (1) при величине окна аппроксимации 100 мс, обозначены красными линиями.

Для получения значения площадки торможения (A_{deac}) применяется аппроксимация угловой характеристики СГ выражением (1).

Для получения допустимых параметров алгоритма прогнозирования ДУ СГ были рассмотрены зависимости ошибок определения площадки торможения от величины окна аппроксимации, которые приведены на рис. 6. Эталонное значение площадки торможения было вычислено путём численного интегрирования угловой характеристики.

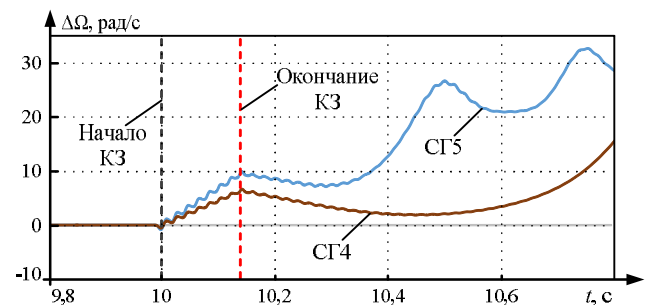


Рис. 4. Изменение угловой скорости роторов СГ 4 и СГ 5

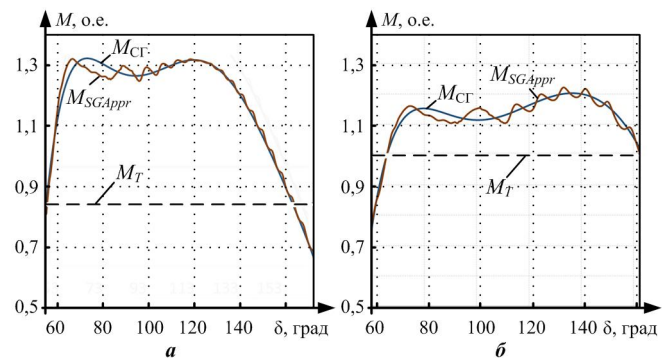


Рис. 5. Угловые характеристики СГ4 (а) и СГ5 (б)

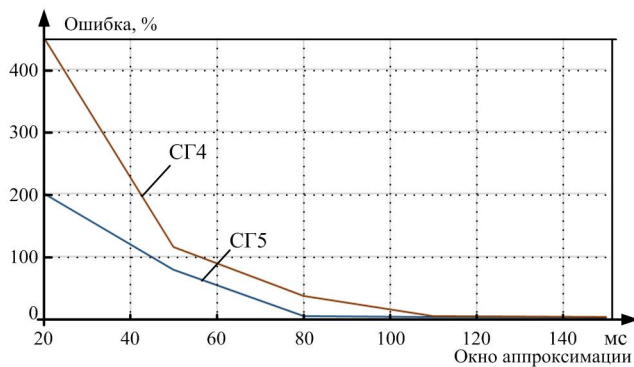


Рис. 6. Зависимости ошибок определения площади торможения от величины окна аппроксимации

Начиная с окна аппроксимации 100 мс для СГ4 и СГ5, удаётся достичь ошибки аппроксимации угловой характеристики, не превышающей 1%.

Для вычисления энергии, потраченной на демпфирование колебаний ротора СГ и турбины (ΔW_d) [6], необходимо выполнить прогноз изменения скоростей роторов СГ и их активных мощностей. Значение активной мощности СГ прогнозируется по полученным угловым характеристикам в пространстве момент-угол нагрузки СГ с переходом от момента к активной мощности, изменение скорости ротора прогнозируется с помощью полинома второй степени. На рис. 7 приведены распределения значений ΔW_d в зависимости от величины окна аппроксимации скорости ротора и активной мощности СГ4 и СГ5.

На рис. 7 чёрной пунктирной и штрихпунктирной линиями показаны установившиеся значения величины ΔW_d . Приемлемая величина окна аппроксимации для определения ΔW_d , при которой изменение значения не превосходит 1%, составляет 60 мс.

В табл. 3 приведены результаты определения избыточного ускорения ротора СГ и турбины, потенциальной энергии торможения, энергии, потраченной на демпфирование ротора СГ и турбины, а также величина энергии небаланса, которая определяется следующим образом:

$$\Delta W = \Delta W_k - A_{deac} - \Delta W_d, \quad (2)$$

где ΔW_k – избыточная кинетическая энергия роторов СГ и турбины; A_{deac} – площадка торможения ротора СГ и турбины, определённая в пространстве «момент СГ – угол нагрузки»; ΔW_d – энергия, потраченная на демпфирование колебаний ротора СГ и турбины.

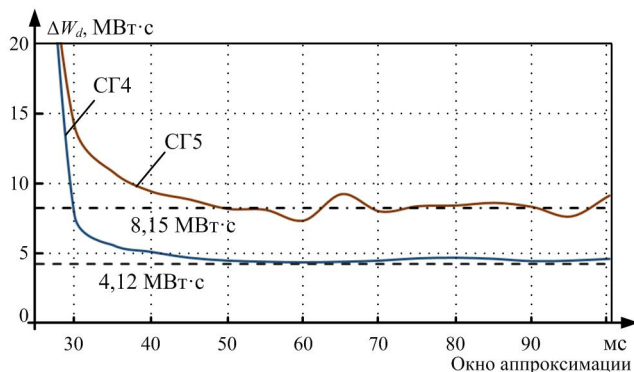


Рис. 7. Распределения значений ΔW_d в зависимости от величины окна аппроксимации, скорости ротора

и активной мощности СГ4 и СГ5

Таблица 3

Результаты оценки ДУ

СГ	ΔW_k , МВт·с	A_{deac} , МВт·с	ΔW_d , МВт·с	ΔW , МВт·с
2	5,74	36,85	3,14	-34,25
3	5,47	37,24	2,97	-34,74
4	36,14	20,47	4,12	11,55
5	49,37	12,94	8,15	28,28
6	15,17	38,14	1,96	-24,93
7	19,14	32,17	2,18	-15,21
8	5,92	40,12	1,64	-35,84
9	4,12	45,71	1,83	-43,42
10	5,36	38,17	1,85	-34,66

Положительная величина энергии ΔW указывает на потерю устойчивости СГ4 и СГ5 в послеаварийном режиме. Большая величина энергии небаланса СГ5 говорит о большей производной увеличения скорости ротора по сравнению с СГ4, что подтверждается результатами моделирования переходного процесса.

СИНТЕЗ ЗАКОНА ПРОТИВОАВАРИЙНОГО УПРАВЛЕНИЯ

Для синтеза закона ИРТ используется следующее выражение [6]:

$$\Delta W_k - A_d - W_d - \int_{\delta_{del}}^{\delta_{FVU}} \left[(M_1 \sin(\delta) + M_2 \sin(2\delta)) - M_{FV} \right] d\delta = 0, \quad (3)$$

где δ_{del} – угол нагрузки СГ, соответствующий окончанию разгрузки турбины; δ_{FVU} – угол нагрузки СГ, соответствующий пересечению угловой характеристики послеаварийного режима СГ и момента турбины после ИРТ M_{FV} .

Значение минимального положения отсечного клапана одновальной паровой турбины μ_{min} вычисляется следующим образом [6]:

$$\mu_{min} = \left(\frac{M_{FV} - M_0 K_1}{M_0 (K_2 + K_3)} \right), \quad (4)$$

где M_0 – момент турбины в нормальном режиме.

В табл. 4 приведены результаты синтеза закона ИРТ для СГ4 и СГ5.

Для СГ5 минимальное положение отсечного клапана составило -0,25 о.е., что говорит о невозможности обеспечения ДУ СГ5 за счёт применения ИРТ. Для СГ4 минимальное положение отсечного клапана составило 0,15 о.е.

На рис. 8 приведены результаты расчёта переходного процесса в рассмотренной тестовой ЭЭС с учётом реализации ИРТ на СГ4 и отключения СГ5.

В ходе апробации алгоритма синтеза закона противоаварийного управления были рассмотрены 20 аварийных возмущений, для одного из которых за счёт применения синтезированного закона противоаварийного управления не удалось обеспечить устойчивость ПАР.

Таблица 4

Результаты синтеза закона ИРТ

СГ	ΔW , МВт·с	M_{FV} , о.е.	M_0 , о.е.	μ_{min} , о.е.
4	11,55	0,41	0,84	0,15
5	28,28	0,12	1,00	-0,25

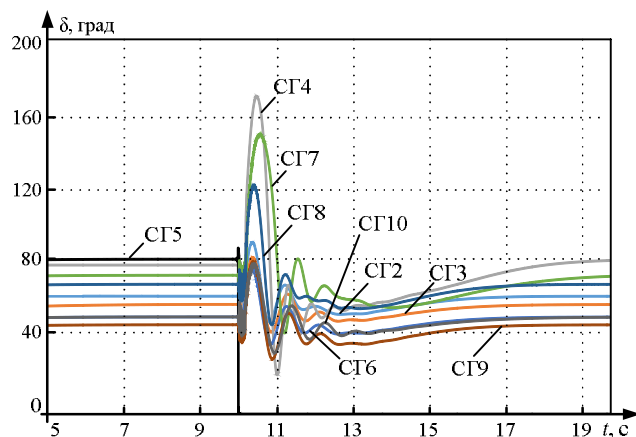


Рис. 8. Значения углов нагрузок СГ в переходном процессе с учётом реализации ИРТ на СГ4 и отключении СГ5

Перспективы дальнейших исследований будут направлены на апробацию разработанного алгоритма противоаварийного управления в режиме жёсткого реального времени на моделирующем комплексе реального времени [15]. Второе направление развития алгоритма относится к разработке метода распределения УВ, полученных для динамического эквивалента электрической станции, между отдельными объектами управления, к которым относится СГ.

Предложенный алгоритм может быть использован для построения адаптивной автоматической разгрузки блока при близких КЗ, реализации автоматики ликвидации асинхронного режима, действующей до первого цикла асинхронного хода.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе приведена апробация алгоритма обеспечения ДУ СГ и по способу «После» на многомашинной модели IEEE39. Метод состоит из следующих этапов: определение времени возмущения по мгновенным измерениям напряжений, оценка ДУ СГ по правилу площадей, синтез закона ИРТ на основании полученного значения энергии небаланса, которая вычисляется как разность избыточной кинетической энергии ротора СГ и турбин, потенциальной энергии торможения и энергии, потраченной на демпфирование колебаний ротора СГ и турбины. Адаптивность алгоритма обеспечивается отсутствием необходимости использования заранее заданных параметров математических моделей элементов ЭЭС. Для работы алгоритма необходимы измерения мгновенных токов, напряжений, угла нагрузки и скорости вращения ротора защищаемого СГ. Для определения угла нагрузки и скорости ротора на валу ротора СГ может быть установлен датчик углового положения ротора и зубчатое колесо.

Апробация алгоритма выполнена на тестовой модели IEEE39, реализованной в Matlab/Simulink. В тестовой ЭЭС были учтены модели одновальной паровой турбины с ИРТ, регулятора скорости турбины, автоматические регуляторы возбуждения и системные стабилизаторы. Для апробации алгоритма в тестовой модели ЭЭС было смоделировано трёхфазное КЗ длительностью 0,15 с, приводящее к выходу из синхронизма СГ4 и СГ5. При синтезе закона ИРТ для СГ4 было выбрано приемлемое положение отсечного клапана для обеспечения ДУ СГ. Для СГ5 за счёт ИРТ ДУ не может быть обеспечена, поэтому СГ5 был отключен. Для подтверждения корректности алгоритма была проведена серия расчётов ДУ с разными законами ИРТ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Автоматическое противоаварийное управление в энергосистемах / А.С. Герасимов, Л.А. Кошечев, В.А. Крицкий, А.А. Лисицын // Электрические станции. 2020. №1. С. 41-49.
2. Кошечев Л.А., Шульгинов Н.Г. ЦСПА на базе алгоритмов нового поколения – очередной этап в развитии противоаварийного управления в энергосистемах // Известия НТЦ Единой энергетической системы. 2013. №1. С. 7-14.
3. Опыт внедрения моделей краткосрочного прогнозирования выработки солнечных электростанций / С.А. Ершченко, Е.С. Кочнева, П.А. Крючков, А.И. Хальясмаа // Энергоэксперт. 2018. №2. С. 64-68.
4. Сенюк М.Д., Дмитриева А.А., Дмитриев С.А. Исследование характеристик метода экспресс-оценки параметров электрического режима в стационарных и динамических процессах // Электротехнические системы и комплексы. 2021. №4(53). С. 4-12. doi: 10.18503/2311-8318-2021-4(53)-4-12
5. Адаптивная модель синхронной машины с параметрами, определяемыми в эксплуатационных режимах работы / А.С. Бердин, А.С. Герасимов, П.Ю. Коваленко, А.Н. Мойсейченков, М.Д. Сенюк // Известия НТЦ Единой энергетической системы. 2020. №2. С. 74-84.
6. Развитие алгоритма автоматической разгрузки энергоблока при близких коротких замыканиях на основе синхронизированных векторных измерений / А.С. Бердин, А.А. Лисицын, А.Н. Мойсейченков, М.Д. Сенюк // Известия НТЦ Единой энергетической системы. 2021. №2(85). С. 76-89.
7. Open data IEEE test systems implemented in SimPowerSystems for education and research in power grid dynamics and control / A. Moeini, I. Kamwa, P. Brunelle, G. Sybille // Proceedings of 50th International Universities Power Engineering Conference (UPEC). IEEE, 2015. Pp. 1-6. doi: 10.1109/UPEC.2015.7339813
8. Ernst D., Pavella M. Closed-loop transient stability emergency control // Proceedings of Power Engineering Society Winter Meeting. IEEE, 2000. Vol. 1. Pp. 58-62. doi: 10.1109/PESW.2000.849927
9. Апросин К.И., Хохрин А.А., Иванов Ю.В. Оценка дозировки управляющих воздействий автоматики предотвращения нарушения устойчивости на базе синхронизированных векторных измерений // Релейщик. 2021. №3(41). С. 26-31.
10. Karady G.G., Gu J. A hybrid method for generator tripping // IEEE Transactions on Power Systems. 2002. Vol. 17. No. 4. Pp. 1102-1107. doi: 10.1109/TPWRS.2002.805014
11. A predictive out of step protection scheme based on PMU enabled dynamic state estimation / E. Farantatos, R. Huang, G.J. Cokkinides, A.P. Meliopoulos // Proceedings of Power and Energy Society General Meeting. IEEE, 2011. Pp. 1-8. doi: 10.1109/PES.2011.6039836

12. Detection Event Inception Point Algorithms Based on Instantaneous Point-on-wave Measurements / P.Y. Kovalenko, M.D. Senyuk, V.I. Mukhin, D.D. Kornilova // Proceedings of Ural Smart Energy Conference (USEC). IEEE, 2020. Pp. 151-154. doi: 10.1109/USEC50097.2020.9281158
13. Jiang P., Gao L., Dai Y. A new non-linear model of steam turbine unit for dynamic analysis of power system // Proceedings of International Conference on Power System Technology. IEEE, 2010. Pp. 1-6. doi:

- 10.1109/POWERCON.2010.5666735
14. Kundur P. Power System Stability and Control. New York: McGraw-Hill, Inc, 1994. 1176 p.
15. Аскаров А.Б., Суворов А.А., Андреев М.В. Применение всережимного моделирующего комплекса для энергосистем с распределенной генерацией // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2019. Т. 23. №1(144). С. 75-89. doi: 10.21285/1814-3520-2019-1-75-89

Поступила в редакцию 24 декабря 2021 г.

INFORMATION IN ENGLISH

APPROBATION OF THE ALGORITHM FOR SYNCHRONOUS GENERATOR MODE DYNAMIC STABILITY AND EMERGENCY CONTROL ANALYSIS ON A MULTI-MACHINE MODEL OF THE POWER SYSTEM

Mikhail D. Senyuk

Postgraduate Student, Department of Automated Electrical Systems, Ural Federal University, Ural Power Engineering Institute, Yekaterinburg, Russia, mdsenuk@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5589-7922>

Anna A. Dmitrieva

Postgraduate Student, Department of Automated Electrical Systems, Ural Federal University, Ural Power Engineering Institute, Yekaterinburg, Russia, anyaprox@gmail.com

The article is devoted to the development of an adaptive algorithm for the synthesis of the emergency control law in order to ensure dynamic stability and its testing on a multi-machine model of the IEEE39 test power system. The developed algorithm is aimed at ensuring the dynamic stability of a particular power plant. In the presented study, the emergency control law synthesis is understood as the choice of the minimum position of the steam turbine shut-off valve based on the area rule in "Synchronous generator moment – load angle" space and synchronized vector measurements. The adaptability of the algorithm is ensured by using a minimum number of a priori power system elements specified parameters and the emergency control law synthesis alongside the initial phase of the post-emergency transient process. In case of dynamic stability ensuring impossibility, the synchronous generator is disconnected from the electrical network. To apply the proposed algorithm in a multi-machine power system, a polynomial approximating the angular characteristic of a synchronous generator of a post-emergency mode was modified by adding a sinusoidal term of the load double angle. The IEEE39 test model used in this study contained 39 nodes, 10 synchronous generators with automatic strong-acting excitation regulators, system stabilizers, single-shaft steam turbines as primary drives and fast turbine valving control models. The proposed method has been tested and evaluated for 20 different emergency processes including self-clearing short circuits in test model various nodes. Simulation was carried out using Matlab/Simulink environment with a constant numerical differentiation step magnitude that was equal to the initial data sampling frequency of 30 kHz.

Keywords: dynamic stability, emergency control, fast turbine valving control, synchronous generator, phasor measurement unit.

REFERENCES

1. Gerasimov A.S., Koshcheev L.A., Kritckii V.A., Lisitsyn A.A. Automatic emergency control in power systems. *Elektricheskie stantsii* [Power Technology and Engineering], 2020, no. 1, pp. 41-49. (In Russian)
2. Koshcheev L.A., Shulginov N.G. Centralized emergency control system based on the new generation algorithms as the next stage of power systems emergency control development. *Izvestiya NTTS Edinoy energeticheskoy sistemy* [STC Unified Power System Proceedings], 2013, no. 1, pp. 7. (In Russian)
3. Eroshenko S.A., Kochneva E.S., Kryuchkov P.A., Khal-yasmaa A.I. Implementation of short-term generation forecasting models for solar power station. *Energoekspert* [Energy expert], 2018, no. 2, pp. 64-68. (In Russian)
4. Senyuk M.D., Dmitrieva A.A., Dmitriev S.A. Research of electrical mode parameters expressing estimation method characteristics in stationary and dynamic processes. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical systems and complexes], 2021, no. 4 (53), pp. 4-12. doi: 10.18503/2311-8318-2021-4(53)-4-12 (In Russian)
5. Berdin A.S., Gerasimov A.S., Kovalenko P.Yu., Moiseichenkov A.N., Senyuk M.D. Adaptive model of a synchronous machine with parameters defined in operational modes. *Izvestiya NTTS Edinoy energeticheskoy sistemy* [STC Unified Power System Proceedings], 2020, no. 2, pp. 74-84. (In Russian)
6. Berdin A.S., Lisitsyn A.A. A.A., Moiseichenkov A.N., Senyuk M.D. Development of the generation unit unloading in case of nearby fault algorithm based on phasor measurement units. *Izvestiya NTTS Edinoy energeticheskoy sistemy* [STC Unified Power System Proceedings], 2021, no. 2 (85), pp. 76-89. (In Russian)
7. Moeini A., Kamwa I., Brunelle P., Sybille G. Open data IEEE test systems implemented in SimPowerSystems for education and research in power grid dynamics and control. Proceedings of 50th International Universities Power Engineering Conference (UPEC). IEEE, 2015, pp. 1-6. doi: 10.1109/UPEC.2015.7339813
8. Ernst D., Pavella M. Closed-loop transient stability emergency control. Proceedings of Power Engineering Society Winter Meeting. IEEE, 2000, vol. 1, pp. 58-62. doi: 10.1109/PESW.2000.849927
9. Aprosina K.I., Khokhrin A.A., Ivanov Yu.V. Amount of automatic control action preventing loss of stability on the basis of synchronized vector measurements. *Reljezhchik* [Relay protection engineer], 2021, no. 3(41), pp. 26-31. (In Russian)
10. Karady G.G., Gu J. A hybrid method for generator tripping. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2002, vol. 17, no. 4, pp. 1102-1107. doi: 10.1109/TPWRS.2002.805014
11. Farantatos E., Huang R., Cokkinides G.J., Meliopoulos A.P.

- A predictive out of step protection scheme based on PMU enabled dynamic state estimation. 2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting. IEEE, 2011, pp. 1-8. doi: 10.1109/PES.2011.6039836
12. Kovalenko P.Y., Senyuk M.D., Mukhin V.I., Kornilova D.D. Detection Event Inception Point Algorithms Based on Instantaneous Point-on-wave Measurements. 2020 Ural Smart Energy Conference (USEC). IEEE, 2020, pp. 151-154. doi: 10.1109/USEC50097.2020.9281158
 13. Jiang P., Gao L., Dai Y. A new non-linear model of steam turbine unit for dynamic analysis of power system. 2010 International Conference on Power System Technology. IEEE, 2010, pp. 1-6. doi: 10.1109/POWERCON.2010.5666735
 14. Kundur P. Power System Stability and Control. McGraw-Hill, Inc., New York, 1994. 1176 p.
 15. Askarov A.B., Suvorov A.A., Andreev M.V. Use of all-mode modeling complex for power systems with distributed generation. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk state technical university], 2019, vol. 23, no. 1 (144), pp. 75-89. (In Russian)
-
- Сенюк М.Д., Дмитриева А.А. Аprobация алгоритма анализа динамической устойчивости и противоаварийного управления режимом синхронного генератора на многомашинной модели энергосистемы // *Электротехнические системы и комплексы*. 2022. № 1(54). С. 46-53. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-1\(54\)-46-53](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-1(54)-46-53)
- Senyuk M.D., Dmitrieva A.A. Approbation of the Algorithm for Synchronous Generator Mode Dynamic Stability and Emergency Control Analysis on a Multi-Machine Model of the Power System. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2022, no. 1(54), pp. 46-53. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-1\(54\)-46-53](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-1(54)-46-53)
-

Газизова О.В.¹, Панова Е.А.¹, Кий А.В.², Патшин Н.Т.²

¹ Тюменский индустриальный университет, филиал ТИУ в Тобольске

² Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ НЕПОЛНОФАЗНОЙ РАБОТЫ АВТОТРАНСФОРМАТОРНОЙ ГРУППЫ УЗЛОВОЙ ПОДСТАНЦИИ 500/220/110 кВ

При функционировании узловых подстанций большой мощности с однофазными автотрансформаторными группами из-за ремонтов и аварийных ситуаций не исключен выход из работы одной фазы. В таких режимах с целью повышения надежности электроснабжения возможна работа подстанции в неполнофазном режиме. При этом возникает ряд важных практических задач по использованию неполнофазных режимов работы оборудования. Особенно эффективно использование таких режимов на малозагруженных подстанциях при высоких токах короткого замыкания на каждой ступени трансформации. Применение длительных неполнофазных нагрузочных режимов может потребовать меньших затрат, чем другие способы резервирования. Кроме аварийных переходов на работу воздушных линий двумя фазами, такой режим может быть предусмотрен как мероприятие, значительно повышающее надежность работы электрической системы, например при проведении пофазного ремонта линий электропередачи, пофазной плавки гололеда. С целью анализа возможности работы в неполнофазном режиме разработан алгоритм определения области допустимых режимов с учетом уровней напряжения и мощности короткого замыкания питающей энергосистемы на каждой ступени трансформации. Область допустимых режимов строится с учетом коэффициентов несимметрии и степени загрузки обмоток статора местных генераторов токами обратной последовательности. В качестве объекта исследования выбран крупный промышленный узел, имеющий несколько ступеней трансформации, сильную связь с энергосистемой и собственные источники электроэнергии. С помощью метода симметричных составляющих проведены расчеты на примере узловой подстанции 801 МВА напряжением 500/220/110 кВ с автотрансформаторной группой, питающей рассматриваемый узел. Разработаны рекомендации по возможности обеспечения подобных режимов.

Ключевые слова: автотрансформатор, неполнофазный режим, программный комплекс, узловая подстанция, коэффициент несимметрии, синхронный генератор.

ВВЕДЕНИЕ

При эксплуатации трех однофазных автотрансформаторных групп (ТОАТГ) с целью повышения надежности электроснабжения потребителей встает вопрос о возможности работы в неполнофазном режиме, например при выводе в ремонт одной фазы. Такие режимы могут быть вызваны как ремонтными, так и аварийными ситуациями.

В рамках РД 153-34.3-20.670-97 [1] для бесперебойного питания потребителей возможно применение неполнофазного режима (НПФР) работы ТОАТГ. Применение подобного режима актуально на крупных узловых, распределительных подстанциях, питающих крупные энергоузлы. В данной работе рассматривается промышленный энергоузел (ПЭУ), имеющий как собственные источники распределенной генерации, так и несколько линий связи 500 и 220 кВ с энергосистемой. При первоначальной оценке допустимости такого режима необходимо проведение основных расчетов с целью определения коэффициента несимметрии по обратной и нулевой последовательности. Дальнейшее его внедрение в эксплуатацию может потребовать изменения первичной и вторичной схем электрических соединений подстанции, в ряде случаев замену выключателей, а также схем релейной защиты и автоматики.

Анализу неполнофазных режимов и эффективности их реализации посвящено значительное количество трудов. Так, в работе [2] изложены общие подходы при моделировании различных несимметричных режимов, в том числе сложных. В статье [3] приведены характеристики работы неполнофазного режима трансформа-

торов и автотрансформаторов с заземленными нейтральными, виды обрывов при их эксплуатации, условия работы, наиболее вероятные варианты развития аварийных ситуаций, а также описаны последствия работы в таких режимах. Исследуя возможность реализации ненормального режима работы на продолжительное время, необходимо разработать и продумать виды и схемы защит. В статье [4] рассматриваются вопросы возникновения НПФР, а также особенности действия релейной защиты в подобных условиях. Приводится реальный случай возникновения НПФР с хронологической расшифровкой работы защит. В данном труде предлагаются алгоритмы селективного выявления подобных аварийных ситуаций для реализации при выполнении защит. При моделировании неполнофазных и комбинированных режимов работы силовых ТОАТГ в основу исследований положен известный метод симметричных составляющих [5, 6]. В труде [7] рассматривается методика определения возможности использования НПФР воздушных линий для повышения надежности электроснабжения. Перечислены технические требования, которые должны выполняться при введении данного режима.

При возможности включения подстанции с ТОАТГ в НПФР необходимо оценить допустимость работы местных генераторов, по обмоткам которых будут протекать токи обратной последовательности и грузить машину. При проведении данных исследований также необходимо оценить допустимость режимов работы местных источников распределенной генерации в нормальном и оптимальном режимах, что приведено в работе [8]. Здесь же выполнена оценка влияния пофазных ремонтов электрооборудования питающих сетей

на режим работы рассматриваемого ПЭУ с использованием для расчета НПФР методов последовательного эквивалентирования и симметричных составляющих. Таким образом, при анализе возможности работы в подобных режимах необходимо обеспечить прежде всего допустимый коэффициент несимметрии (КН) согласно ГОСТ [9, 10]. Во-вторых, выполнить анализ уровня токов обратной последовательности местных генерирующих источников питания согласно [11]. Вследствие возникновения НПФР помимо изменений значений токов и напряжений, возникает изменение качества электроэнергии, дополнительные потери мощности и электроэнергии для сети. Мероприятия, применяющие НПФР работы ТОАТГ, должны быть согласованы с их владельцами и оговорены в договоре по расчетам за электроэнергию.

ОСОБЕННОСТЬ ВОЗНИКНОВЕНИЯ НЕПОЛНОФАЗНОГО РЕЖИМА РАБОТЫ И ОЦЕНКА ЕГО ДОПУСТИМОСТИ

Основной целью применения НПФР работы ТОАТГ в электрических сетях напряжением 330-1150 кВ является сохранение при эксплуатации на достаточно высоком уровне надежности электроснабжения потребителей. Недостатками при этом являются повышенная опасность повреждения оборудования и электроустановок источников электроэнергии, электрически близких подстанций и электроприемников. Работа ТОАТГ в НПФР представляет собой достаточно редкое явление. Она опасна масштабами последствий, так как охватывает большие участки электрической сети, электрически связанные с источником и местом возникновения несимметрии. Возникновение НПФР возможно при обрыве проводов питающей воздушной линии, стихийных явлениях, отказе оборудования в момент отключения автотрансформатора, выводе в плановый или послеаварийный ремонт. Неблагоприятно наложение аварийного и ремонтного режимов.

В общем случае продольную несимметрию в любой точке трехфазной системы можно представить включением в рассечку каждой фазы разных по величине сопротивлений, которые могут быть связаны между собой различной взаимной индукцией [6, 12, 13]. Такой подход к решению задачи позволяет получить расчетные выражения в общем виде, в том числе эквивалентное дополнительное сопротивление. Однако он связан с необходимостью проводить довольно сложные вычисления. Поэтому, как и при поперечной несимметрии, существенно проще и нагляднее проводить решение для каждого вида продольной несимметрии, используя граничные условия. В данной работе рассмотрим однофазную продольную несимметрию, отключение одного из трансформаторов ТОАТГ.

При эксплуатации узловой подстанции большой мощности, связывающей напряжения 500 и 220 кВ, уровень несимметрии будет определяться величинами напряжений от энергосистемы со стороны высокого и среднего напряжения. Как показал анализ фактически поддерживаемых уровней напряжений, при эксплуатации они могут значительно изменяться. С учетом этого фактора был разработан алгоритм, приведенный на рис. 1.

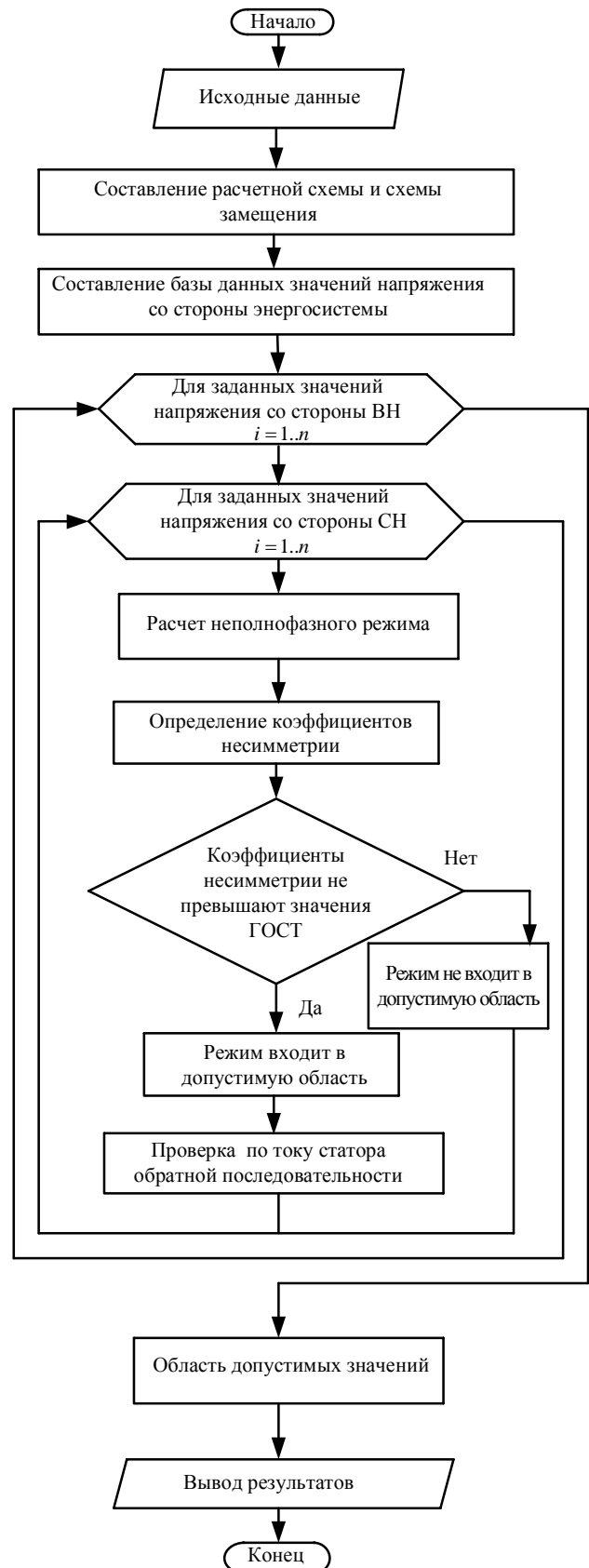


Рис. 1. Алгоритм определения области допустимых режимов

Этот алгоритм предусматривает предварительный анализ возможного изменения уровня напряжения со стороны питающих участков энергосистемы с учетом мощности КЗ. Данный фактор оказывает существенное влияние на уровень несимметрии при выводе одной

фазы в ремонт. Фактически он накладывается на искусственную несимметрию. Далее расчетным путем для выбранного сочетания уровней напряжения со стороны высокого и среднего напряжения определяются параметры несимметричных режимов и КН. Вопросам определения КН и исследованию НПФР при проектировании и эксплуатации посвящены труды [10, 14]. Дополнительно при анализе возможных режимов можно определить точки, в которых уровень напряжения не соответствует нормативным требованиям [15, 16]. В частности, оценить влияние несимметрии на распределение напряжения в сети. Далее производится проверка полученных значений по допустимой величине КН в соответствии с ГОСТ, определяется загрузка генераторов токами обратной последовательности. На основе полученных результатов выполняется построение области допустимых НПФР.

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕПОЛНОФАЗНОГО РЕЖИМА НА ПРИМЕРЕ УЗЛОВОЙ ПОДСТАНЦИИ

Выбранный для примера ПЭУ приведен на **рис. 2**. На рисунке упрощенно показаны связи с энергосистемой на напряжении 500 кВ посредством подстанций №1 и 2. Линии 500 кВ показаны сплошными жирными линиями, 220 кВ – пунктиром, 110 кВ – сплошными тонкими линиями. Также в составе узла имеются собственные источники распределенной генерации общей установленной мощностью 660 МВт. Нагрузки не показаны и составляют порядка 1000 МВт.

В качестве вида несимметрии был принят вывод в ремонт одной фазы автотрансформаторной группы 500/220/10 узловой подстанции ПС №1 500 кВ, имеющей автогруппу АТГ1 мощностью $S_{ном} = 267$ МВА на фазу (суммарная установленная мощность АТГ1 $S_{уст} = 801$ МВА) и трехфазный автотрансформатор АТЗ мощностью $S_{ном} = 200$ МВА. Данная подстанция, являясь транзитной, имеет связь с ПС № 2 500 кВ, на которой также установлены две автотрансформаторные группы АТГ1, АТГ2 ($S_{уст} = 1602$ МВА) и дополнитель-

ную связь с энергосистемой. Подстанция входит в состав ПЭУ, приведенного на **рис. 2**.

Таким образом, с целью анализа возможности реализации НПФР для выбранной узловой подстанции были определены КН и оценена их допустимость.

Далее были подробно исследованы местные синхронные генераторы по величине токов обратной последовательности. Следует отметить, что состав местных источников распределенной генерации разнороден. Установленные мощности составляют от 6 до 60 МВт, а генераторные распределительные устройства имеют уровень напряжения 3-6-10 кВ. Токи обратной последовательности, замыкаясь по обмоткам статора, создают вращающееся магнитное поле, противоположно направленное по отношению к вращению ротора. Это создает дополнительный нежелательный электромагнитный момент, поэтому исследования должны быть проведены не только в нормальных, но и утяжеленных режимах.

Схема замещения данной узловой подстанции, полученная в результате преобразований для расчета НПФР, приведена на **рис. 3**. В месте рассматриваемой продольной несимметрии была составлена комплексная схема замещения, учитывающая схемы замещения отдельных последовательностей.

В результате расчета в месте обрыва были получены эпюры напряжений отдельных последовательностей, приведенные на **рис. 4**.

На **рис. 4** точки 1-4 соответствуют падению напряжения на эквивалентном сопротивлении от источника питания со стороны 500 кВ, на обрыве, на эквивалентном сопротивлении от источника питания со стороны 220 кВ (см. **рис. 3**). Подобное изменение напряжений объясняется поддержанием и регулированием напряжения со стороны рассматриваемого ПЭУ и питающей энергосистемы. Предварительно можно сделать вывод о том, что мощности рассматриваемого энергоузла достаточно для поддержания подобного режима.

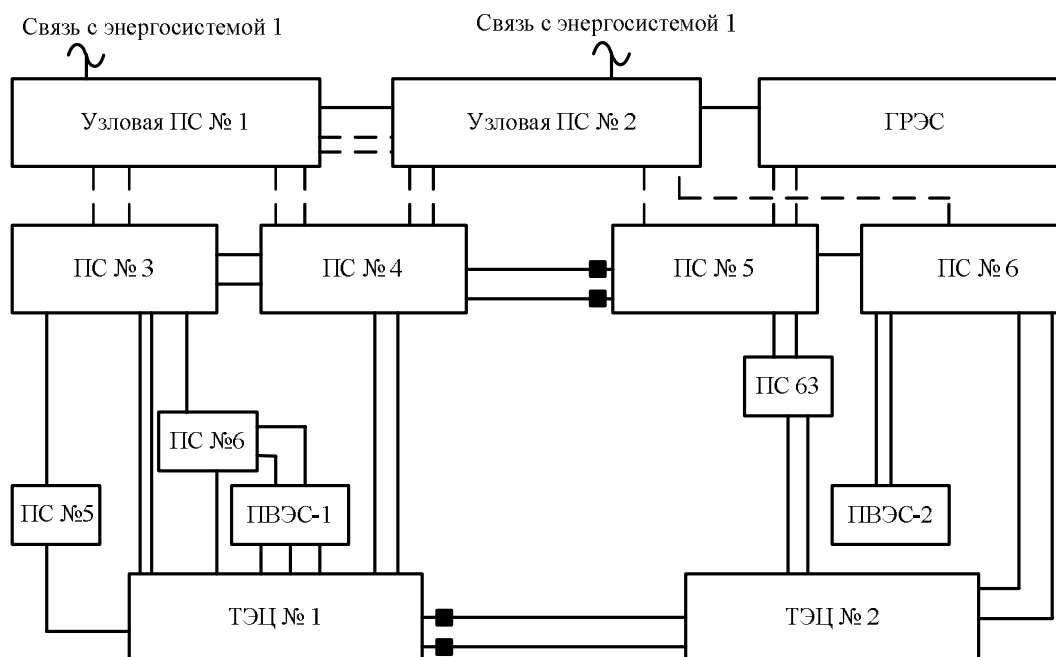


Рис. 2. Упрощенная схема ПЭУ

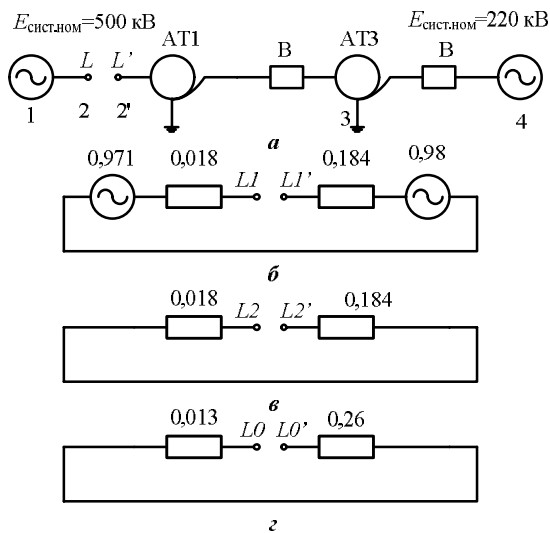


Рис. 3. Расчетная схема сети

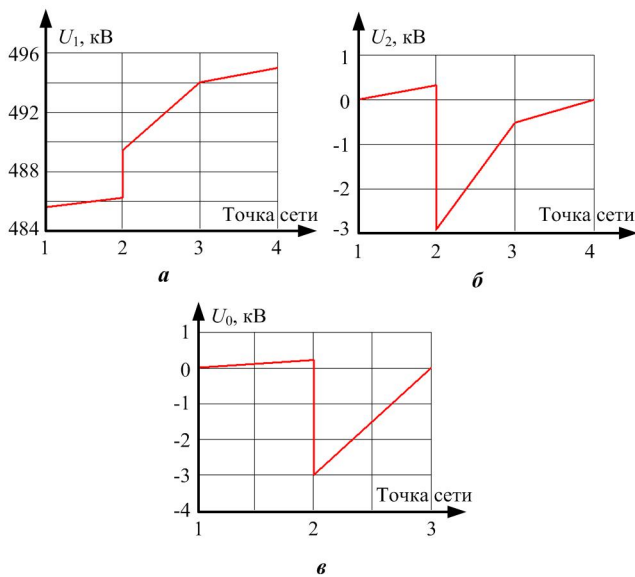


Рис. 4. Эпюры напряжений прямой (а), обратной (б) и нулевой (в) последовательностей

Как отмечалось ранее, осуществляя анализ НПФР, рассматривается вопрос о качестве электроэнергии, решающим критерием которого является КН напряжений по обратной последовательности (K_{2U} , %) и КН напряжений по нулевой последовательности (K_{0U} , %). Одним из основных факторов, влияющих на данную величину при расчёте, является напряжение со стороны 500 и 220 кВ энергосистем. В результате анализа выборки реальных напряжений на действующей узловой подстанции выяснилось, что за промежуток с 2018 по 2020 год напряжение со стороны системы 220 кВ не снижалось ниже 220,6 кВ и не повышалось выше 239,6 кВ. Аналогична ситуация для системы со стороны 500 кВ. Напряжение не снижалось ниже 485,6 кВ и не повышалось выше 514,6 кВ. Дополнительно было оценено влияние включения самого трансформатора и величины его нагрузки на уровень напряжения. Как показали расчеты, в силу существенной мощности питающей энергосистемы оно невелико.

При оценке допустимости неполнофазного режима работы ТАТГ рассчитывались параметры несимметрии на узловой подстанции, где установлено это оборудо-

вание, и вдоль линий, отходящих от нее. Была получена область допустимых соотношений между напряжениями обмоток на стороне высокого и низкого напряжения, при которых КН не превышает в условиях отключения одной фазы 2%. Полученная область приведена на рис. 5.

Аналогичные расчеты были выполнены для параметров обратной последовательности. Также в рамках проведенной работы исследована степень загрузки генераторов ПЭУ в рассматриваемом режиме НПФР, приведенная в таблице.

Вычисления производились с использованием программного комплекса «КАТРАН» [17-19], предназначенным для расчета эксплуатационных и аварийных режимов установившихся и переходных режимов. Данный программный комплекс позволяет исследовать как установившиеся, так и переходные сложносимметричные режимы и подробно учитывать местные генераторы и специфичную нагрузку.

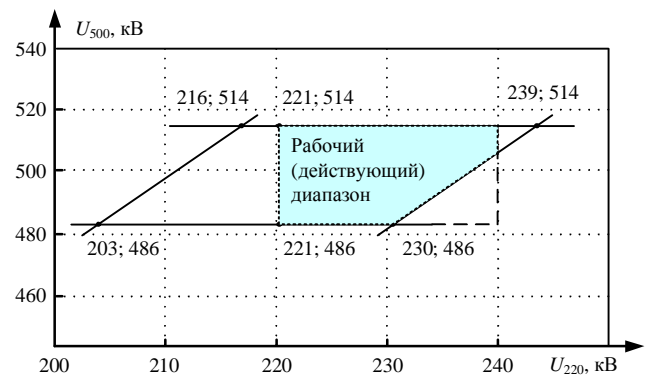


Рис. 5. Допустимая область работы при обрыве одной фазы с учетом величины коэффициента несимметрии обратной последовательности 2%

Загрузка генераторов токами обратной последовательности

ТЭЦ №2							ПВЭС-1			
	Г-1	Г-2	Г-3	Г-4	Г-5	Г-6	Г-1	Г-2	Г-3	Г-4
I_a , кА	3,32	2,11	2,18	3,17	2,96	3,61	1,11	0,759	0,554	1,13
I_b , кА	3,34	2,13	2,2	3,19	2,98	3,63	1,13	0,774	0,568	1,16
I_c , кА	3,35	2,12	2,2	3,21	2,99	3,65	1,12	0,774	0,569	1,16
I_1 , кА	3,34	2,12	2,19	3,19	2,98	3,63	1,12	0,769	0,564	1,15
I_2 , кА	0,021	0,013	0,014	0,021	0,019	0,024	0,012	0,01	0,009	0,018
U_a , кВ	9,7	10,32	10,36	9,74	9,57	9,66	6,3	10,09	9,8	9,87
U_b , кВ	9,7	10,32	10,36	9,75	9,58	9,67	6,31	10,1	9,81	9,88
U_c , кВ	9,69	10,31	10,35	9,74	9,56	9,65	6,3	10,07	9,77	9,85
U_1 , кВ	9,7	10,32	10,36	9,74	9,57	9,66	6,3	10,09	9,8	9,87
U_2 , кВ	0,008	0,005	0,005	0,007	0,009	0,008	0,006	0,016	0,026	0,022
$I_{ном}$, кА	3,437	3,437	3,437	4,124	4,124	4,124	3,437	2,062	0,825	2,062
ΔI_{ϕ} , %	0,873	0,582	0,582	0,970	0,727	0,970	0,582	0,727	1,697	1,455
I_2 , %	0,608	0,364	0,402	0,509	0,468	0,582	0,346	0,491	1,127	0,887

ТЭЦ №1							ПВЭС-2				
	Г-1	Г-2	Г-3	Г-4а	Г-4б	Г-5	Г-6	Г-7	Г-8	Г-1	Г-2
I_a , кА	1,4	1,32	1,16	0,258	0,258	1,03	1,08	1,03	0,964	0,386	0,49
I_b , кА	1,43	1,35	1,2	0,264	0,264	1,05	1,1	1,06	0,994	0,392	0,497
I_c , кА	1,43	1,34	1,2	0,264	0,264	1,05	1,1	1,06	0,994	0,39	0,495
I_1 , кА	1,42	1,34	1,18	0,262	0,262	1,05	1,09	1,05	0,984	0,389	0,494
I_2 , кА	0,016	0,015	0,024	0,004	0,004	0,018	0,015	0,016	0,201	0,004	0,004
U_a , кВ	2,99	3,02	10,15	9,82	9,82	9,93	9,82	9,97	10,1	6,37	6,22
U_b , кВ	2,99	3,03	10,15	9,82	9,82	9,93	9,82	9,98	10,11	6,37	6,22
U_c , кВ	2,98	3,02	10,12	9,79	9,79	9,89	9,79	9,94	10,07	6,36	6,21
U_1 , кВ	2,99	3,02	10,14	9,81	9,81	9,92	9,81	9,96	10,09	6,37	6,22
U_2 , кВ	0,004	0,004	0,019	0,021	0,021	0,03	0,021	0,023	0,021	0,006	0,005
$I_{ном}$, кА	2,749	2,749	2,749	0,412	0,412	1,72	1,718	1,718	2,749	0,458	0,687
ΔI_{ϕ} , %	1,091	1,091	1,455	1,456	1,456	1,16	1,164	1,746	1,091	1,310	1,019
I_2 , %	0,567	0,535	0,880	0,881	0,881	1,03	0,879	0,955	7,312	0,773	0,643

Для турбогенераторов, имеющих массивный неавтотрансформаторный магнитопровод, согласно нормативным документам, допускается длительная работа с неравенством токов обмотки статора в фазах, не превышающим 12% от номинального значения, а значения токов обратной последовательности не должны превышать 5%. При этом полный ток статора не должен превышать номинальный. В **таблице** представлены неравенство токов в фазах и значения токов обратной последовательности генераторов местных электростанций ПЭУ. Здесь показаны токи прямой I_1 и обратной I_2 последовательностей, полные токи фаз I_a, I_b, I_c , напряжения прямой U_1 и обратной U_2 последовательностей, полные напряжения фаз U_a, U_b, U_c , номинальный ток обмотки статора $I_{ном}$, процентные соотношения отклонения фазного тока ΔI_ϕ и тока обратной последовательности I_2 . Как видим, токи обратной последовательности не превышают значения, предусмотренные ГОСТ. Следовательно, в нормальном эксплуатационном режиме указанная область работы по токам статора также является допустимой. Аварийные при необходимости нужно исследовать индивидуально.

При реализации рассмотренных режимов возможно изменение качества электроэнергии в целом и дополнительные потери мощности и электроэнергии в сетях, смежных с сетями подстанции, применяющей НПФР. Особенности изменения потерь активной мощности в распределительных сетях, обусловленные возникающей несимметрией изложены в [20]. При разработке мероприятий, обеспечивающих применение НПФР работы ТОАТГ, следует рассматривать нормальные, послеаварийные и ремонтные схемы электрических соединений, а также изменение схем подстанций при производимых переключениях на данной и электрически близких подстанциях. Также при исследовании подобных режимов следует учесть возможность применения автоматики однофазных повторных включений [21], повышающих надежность работы сети. Длительность НПФР работы ТОАТГ может составлять от нескольких часов до нескольких месяцев.

При вопросе о допустимости НПФР должен быть рассмотрен вопрос об изменении уставок релейной защиты, поскольку правильность работы токовых защит нулевой последовательности воздушных и кабельных линий во многих случаях не обеспечивается органами направления мощности из-за их недостаточной чувствительности в режимах при обрывах одной или двух фаз [21-23]. Кроме того, значения напряжения нулевой последовательности могут оказываться недостаточными для срабатывания блокирующих органов направления мощности на подстанциях электрической сети со значительными величинами токов КЗ и малыми сопротивлениями нулевой последовательности на шинах. Тогда нарушается селективность защит, и некорректно могут работать защиты линий, имеющие большую чувствительность по току, или защиты с меньшей установкой по времени срабатывания. Решением данной проблемы могло бы стать комплексное применение различных методов выявления НПФР [24]. Также необходимо учесть обеспечение функций дальнего резервирования релейной защиты автотрансформаторов в условиях продольно-поперечной несимметрии, что подробно рассмотрено в работе [25], и особенности переход-

ных процессов в таких режимах с учетом работы релейной защиты электрически близко расположенных источников питания [26]. При необходимости можно скорректировать особенности выполнения дифференциальной защиты трансформатора [27, 28].

Учет вышеуказанных мероприятий в комплексном виде позволит обеспечивать достаточно надежную работу автотрансформатора в неполнофазном режиме.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С целью повышения надежности электроснабжения потребителей крупных энергоузлов возможно применение неполнофазного режима работы автотрансформаторных групп узловых подстанций. Коэффициент несимметрии в таком режиме работы определяется в том числе и уровнем напряжений со стороны питающей энергосистемы на стороне высокого и среднего напряжения. С целью анализа возможности реализации данного режима был получен алгоритм определения допустимой области режимов работы подстанции по коэффициентам несимметрии. Он учитывает изменение уровней напряжения со стороны питающей энергосистемы и загрузку собственных генераторов токами обратной последовательности в обмотке статора в неполнофазном режиме.

На примере узловой подстанции, питающей крупный промышленный энергетический узел, был произведен расчет совокупности режимов и получена область допустимых значений работы автотрансформаторов в неполнофазном режиме при выводе в ремонт одной автотрансформаторной группы.

Внедрение данного мероприятия может потребовать замены выключателей со стороны 500 и 220 кВ на каждую фазу по отдельности, то есть отдельный привод на каждый выключатель. Также может быть реализовано проектирование или изменение действующей схемы релейной защиты и автоматики выключателя, в частности с рассмотрением изменения цепи защиты от неполнофазного режима (НПФР) для ее адекватной работы. Разработанный алгоритм позволяет сформулировать мероприятия по обеспечению неполнофазного режима работы, что актуально при невысокой загрузке автотрансформатора в условиях энергосистемы большой мощности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Методические указания по применению неполнофазных режимов работы основного электрооборудования электроустановок 330-1150 кВ. РД 153-34.3-20.670-97. М.: ОРГРЭС, 1999. 55 с.
2. Fortescue C.L. Method of symmetrical coordinates applied to the solution of polyphase networks // Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. 1918. No. 2(37). Pp. 1027-1140. doi: 10.1109/T-AIEE.1918.4765570
3. Особенности работы тупиковых подстанций 220-110 кВ при неполнофазных режимах по признаку заземления нейтралей трансформаторов / М.Ш. Мисриханов, Т.Е. Путова, В.П. Гречин, П.Г. Малюцкий // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2005. №1. С. 82-89.
4. Нагай И.В. О совершенствовании защит от неполнофазных режимов электрических сетей // Известия вузов. Электромеханика. 2011. № 1. С. 63-66.
5. Мартынов В.А., Голубев А.Н. Моделирование неполнофазных режимов работы силовых автотрансформаторов // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2017. №3. С. 40-47.

6. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах. М.: Энергия, 1970. 517 с.
7. Бессолицын А.В., Кушкова Е.И., Петров Н.В. Использование неполнофазного нагрузочного режима ВЛ 110 кВ для повышения надежности электроснабжения потребителей // Известия вузов. Электромеханика. 2014. № 6. С. 38-42.
8. Панова Е.А., Савельева К.С., Кочкина А.В. Оценка допустимости режимов работы синхронных генераторов собственных электростанций промышленных предприятий при пофазном ремонте электрооборудования питающих сетей в нормальном и оптимальном режимах // Электротехнические системы и комплексы. 2013. №21. С. 214-220.
9. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: Стандартинформ, 2014. 16 с.
10. Иванов В.С. Режимы потребления и качество электроэнергии систем электроснабжения промышленных предприятий: учебник / под ред. В.С. Иванова, В.И. Соколова. М.: Энергоатомиздат, 1987. 336 с.
11. ГОСТ Р 53471-2009. Генераторы трехфазные синхронные мощностью свыше 100 кВт. Общие технические условия. М.: Стандартинформ, 2010. 16 с.
12. Игуменцев В.А., Малафеев А.В., Панова Е.А. Расчет и анализ аварийных несимметричных режимов систем электроснабжения: монография. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2013. 135 с.
13. Моделирование неполнофазных аварийных режимов в задаче расчёта и анализа работы систем промышленного электроснабжения / А.В. Малафеев, Е.А. Панова С.В., Беляев, А.А. Емельянов, А.Я. Альбрехт, О.Ю. Биктеева // Известия вузов. Электромеханика. 2011. № 4. С. 119-123.
14. Voltage unbalance factor detection based Kaiser- maximum sidelobe decay convolution window and amplitude method / L. Dan, G. Yunpeng, W. Cong, G. Dexi, H. Rui // Electric Power Systems Research. 2021. Vol. 204. 107705. doi: 10.1016/j.epsr.2021.107705
15. A comprehensive review of improving power quality using active power filters / L. Dayi, W. Tingkan, P. Wenhao, D. Xinzhi, G. Jie // Electric Power Systems Research. 2021. Vol. 199. 107389. doi: 10.1016/j.epsr.2021.107389.
16. Yusuff A.A., Mosetle T.C., Ayodele T.R. Statistical method for identification of weak nodes in power system based on voltage magnitude deviation // Electric Power Systems Research. 2021. Vol. 200. 107464. doi: 10.1016/j.epsr.2021.107464
17. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № RU 2019610251. Комплекс автоматизированного режимного анализа КАТРАН 10.0 / Игуменцев В.А., Малафеев А.В., Панова Е.А., Варганова А.В., Газизова О.В., Кондрашова Ю.Н., Зиновьев В.В., Юлдашева А.И., Крубцова А.А., Анисимова Н.А., Насибуллин А.Т., Трёмасов М.А., Щербак В.С., Богуш В.К.; заявитель ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»; заявл. 29.10.2018, опубл. 09.01.2019.
18. Определение границ динамической устойчивости генераторов промышленной электростанции с учетом двигательной нагрузки / О.В. Газизова, А.А. Аллаяров, Ю.Н. Кондрашова, Н.Т. Патшин // Электротехнические системы и комплексы. 2018. № 2(39). С. 34-41. doi: 10.18503/2311-8318-2018-2(39)-34-41
19. Газизова О.В., Кондрашова Ю.Н., Малафеев А.В. Повышение эффективности управления режимами электростанций промышленного энергоузла за счет прогнозирования статической и динамической устойчивости при изменении конфигурации сети // Электротехнические системы и комплексы. 2016. №3(32). С. 27-38. doi: 10.18503/2311-8318-2016-3(32)-27-38
20. Abd el-Ghany H.A., Abd-El Fatta S.H., Azmy A.M. Evaluating the effect of considering repairing-fault periods on calculating technical losses in medium-voltage feeders of ring distribution networks // Electric Power Systems Research. 2021. Vol. 196. 107192. doi: 10.1016/j.epsr.2021.107192.
21. Acosta J.S., Tavares M.C., Gole A.M. Optimizing multi-circuit transmission lines for single-phase auto-reclosing // Electric Power Systems Research. 2021. Vol. 197. 107329. doi: 10.1016/j.epsr.2021.107329
22. Убин К.А., Хватова К.А., Колос Е.А. О проблемах создания и внедрения микропроцессорных устройств релейной защиты и автоматики электроэнергетических устройств // Современные тенденции развития науки и технологий. 2016. №10-1. С. 126-131.
23. Бобров С.Е. Анализ работы дифференциально-фазной защиты при наложении короткого замыкания на доаварийный неполнофазный режим работы сети // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2010. № 2. С. 41-47.
24. Бурбело М.И., Мельничук С. М., Емельянов А.А. Применение направленной токовой защиты для выявления неполнофазного нагрузочного режима в сетях с эффективно заземленной нейтралью // Научные труды Винницкого национального технического университета. 2014. № 2. С. 5.
25. Нагай И.В. Обеспечение функций дальнего резервирования релейной защиты трансформаторов в условиях продольно-поперечной несимметрии // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2011. № 5. С. 19-24.
26. Определение асинхронной мощности синхронных генераторов в расчетах электромеханических переходных процессов при несимметричных режимах / О.В. Буланова, А.В. Малафеев, Н.А. Николаев, Ю.Н. Ротанова, Е.А. Панова // Электрика. 2010. № 8. С. 24-26.
27. A wavelet-based restricted earth-fault power transformer differential protection / Aires M.N.O., Medeiros R.P., Costa F.B., Silva K.M., Chavez J.J., Popov M. // Electric Power Systems Research. 2021. Vol. 196. 107246. doi: 10.1016/j.epsr.2021.107246
28. A power transformer differential protection based on support vector machine and wavelet transform / Simões L.D., Costa H.J.D., Aires M.N.O., Medeiros R.P., Costa F.B., Bretas A.S. // Electric Power Systems Research. 2021. Vol. 197. 107297. doi: 10.1016/j.epsr.2021.107297

Поступила в редакцию 14 декабря 2021 г.

INFORMATION IN ENGLISH

FEASIBILITY ANALYSIS OF INCOMPLETE-PHASE OPERATION OF THE AUTOTRANSFORMER GROUP AT THE 500/220/110 KV SUBSTATION

Olga V. Gazizova

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Electrical Power Engineering Department, Tobolsk Industrial Institute, Tobolsk Branch of the Industrial University of Tyumen, Tobolsk, Russia
Тобольск, logan_b_7@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9416-672X>

Evgeniya A. Panova

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, 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>

Anatolij V. Kij

Master's Degree Student, Department of Industrial Electric Power Supply, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Nikolaj T. Patshin

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Department of Industrial Electric Power Supply, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

When nodal high power substations operate with single-phase autotransformer groups, repairs and emergencies can cause the deactivating of one phase. In such modes in order to improve the reliability of power supply the substation can operate in the incomplete-phase mode. At the same time, a number of important practical tasks arise on the use of open-phase mode. It is especially effective to use such modes on few loaded substations at high short circuit currents at each stage of transformation. The use of long-term open-phase loading modes may require smaller investment than other backup methods. In addition to emergency transitions to the operation of air lines with two phases, such a mode can be provided for an event that significantly improves the reliability of the electrical system, for example, when carrying out a phase renovation of power lines or forced ice-melting. In order to analyze the possibility of working in the open-phase mode, an algorithm for determining the area of permissible modes, taking into account the voltage levels and the short-circuit power of the supply power system at each stage of transformation, was developed. The area of permissible modes is based on the coefficients of asymmetry and the degree of the stator windings loading of local generators of reverse sequence. A large industrial node has been chosen as an object of study with several stages of transformation, a strong connection with the power system and its own sources of electricity. The symmetrical component method was used to calculate the parameters of the 801 MVA tie substation with a 500/220/110 kV autotransformer group feeding the node in question. Recommendations were developed in order to ensure such modes.

Keywords: Autotransformer, open-phase mode, software package, nodal substation, asymmetry coefficient, synchronous generator.

REFERENCES

1. RD 153-34.3-20.670-97. Procedural Guidelines for Use of Partial-Phase Operating Modes of Main Electrical Equipment of 330-1150 kV Electrical Installations. Moscow, SPO ORGRES Publ., 1999. (In Russian)
2. Fortescue C.L. Method of symmetrical coordinates applied to the solution of polyphase networks. NAPS, University of Waterloo. Canada. October 23-24. 2000. Pp.1027-1140. doi: 10.1109/T-AIEE.1918.4765570
3. Misrihanov M.Sh., Putova T.E., Grechin V.P., Mal-yushickij P.G. Features of the work of 220-110 kV dead-end substations with incomplete phase modes on the basis of grounding of transformer neutral. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta* [Vestnik of Ivanovo State Power Engineering University], 2005, no. 1, pp. 1-10. (In Russian)
4. Nagaj I.V. On improving protection against incomplete-phase regimes of electrical networks *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika* [Russian Electromechanics], 2011, no. 1, pp. 63-66. (In Russian)
5. Martynov V.A., Golubev A.N. Modeling of incomplete-phase modes of operation of power vehicles. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta* [Vestnik of Ivanovo State Power Engineering University], 2017, no. 3, pp. 1-8. (In Russian)
6. Ulyanov S.A. *Elektromagnitnye perekhodnye processy v elektricheskikh sistemah* [Electromagnetic transition processes in electrical systems]. Moscow, Energy Publ., 1970. 517 p. (In Russian)
7. Bessolitsyn A.V., Kushkova E.I., Petrov N.V. Using an incomplete-phase loading regime of 110 kV airlines to increase customer power supply. *Izvestiyavuzov. Elektromekhanika* [Russian Electromechanics], 2014, no. 6, pp.1-5. (In Russian)
8. Panova E.A., Savelyeva K.S., Kochkina A.V. Assessment of the permissibility of modes of operation of synchronous generators of own power plants of industrial enterprises in phaz-nous repair of electrical equipment of the feeding networks in normal and optimal modes. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2013, no. 21, pp. 214-220. (In Russian)
9. GOST 32144-2013. Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality limits in the public power supply systems. Moscow, SPO ORGRES Publ., 2014. 16 p. (In Russian)
10. Ivanov V.S. *Rezhimy potrebleniya i kachestvo elektroenergii sistem elektrosnabzheniya promyshlennyyh predpriyatij* [Modes of consumption and quality of electric power supply systems of industrial enterprises]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1987. 336 p. (In Russian)
11. GOST R 53471-2009. Synchronous three-phase generators of power above 100 kW. General specifications. Moscow, STANDARTINFORM Publ., 2011. 16 p. (In Russian)
12. Igumenshchev V.A., Malafeev A.V., Panova E.A. *Rascheti analiza avariynh nesimmetrichnyh rezhimov sistem elektrosnabzheniya* [Calculation and analysis of emergency asymmetric modes of power supply systems]. Magnitogorsk, NMSTU Publ., 2013. 135 p. (In Russian)
13. Malafeev A.V., Panova E.A., Belyaev S.V., Emel-yanov A.A., Albrekht A.YA., Bikteeva O.Yu. Simulation of incomplete-phase emergency modes in the task of calculating and analyzing the operation of industrial power supply systems. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika* [Russian Electromechanics], 2011, no. 4, pp. 119-123. (In Russian)
14. Dan L., Yunpeng G., Cong W., Dexi G., Rui H. Voltage unbalance factor detection based Kaiser-maximum sidelobe decay convolution window and amplitude method. *Electric Power Systems Research*, 2021, vol. 204, article 107705. doi: 10.1016/j.epsr.2021.107705
15. Dayi L., Tingkang W., Wenhao P., Xinzhi D., Jie G. A comprehensive review of improving power quality using active power filters. *Electric Power Systems Research*, 2021, vol. 199, article 107389. doi: 10.1016/j.epsr.2021.107389
16. Yusuff A.A., Moselethe T.C., Ayodele T.R. Statistical method for identification of weak nodes in power system based on voltage magnitude deviation. *Electric Power Systems Research*, 2021, vol. 200, article 107464. doi: 10.1016/j.epsr.2021.107464
17. Igumenshchev V.A., Malafeev A.V., Panova E.A., Varganova A.V., Gazizova O.V., Kondrashova Yu.N., Zinoviev V.V., Yuldasheva A.I., Krubtsova A.A., Anisimova N.A., Nasibullin A.T., Tremasov MA, Shcherbakova V.S., Bogush V.K. *Kompleks avtomatizirovannogo rezhimnogo ana-*

- liza KATRAN 10.0* [Complex of the automated regime analysis KATRAN 10.0]. Computer program RF, no. RU 2019610251, 2019.
18. Gazizova O.V., Allayarov A.A., Kondrashova YU.N., Patshin N.T. Determination of the boundaries of the dynamic stability of generators of an industrial power plant taking into account the motor load. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2018, no. 2(39), pp. 34-41. doi: 10.18503/2311-8318-2018-2(39)-34-41 (In Russian)
 19. Gazizova O.V., Kondrashova YU.N., Malafeyev A.V., Increase of Effective Management of Modes of Electric Power Plants Due to Forecasting of Static and Dynamic Stability at Change of Network Configuration. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2016, no. 3(32), pp. 27-38. doi: 10.18503/2311-8318-2016-3(32)-27-38 (In Russian)
 20. Abdel-Ghany H.A., Abd-El Fatta S.H., Azmy A.M. Evaluating the effect of considering repairing-fault periods on calculating technical losses in medium-voltage feeders of ring distribution networks. *Electric Power Systems Research*, 2021, vol. 196, article 107192. doi: 10.1016/j.epsr.2021.107192
 21. Acosta J.S., Tavares M.C., Gole A.M. Optimizing multi-circuit transmission lines for single-phase auto-reclosing. *Electric Power Systems Research*, 2021, vol. 197, article 107329. doi: 10.1016/j.epsr.2021.107329
 22. Ubin K.A., Hvatova K.A., Kolos E.A. On the problems of creating and implementing microprocessor devices of relay protection and automation of electric power devices. *Sovremennye tendencii razvitiya nauki i tekhnologii* [Modern tendency to develop science and technology], 2016, no. 10-1, pp. 126-131. (In Russian)
 23. Bobrov S.E. Analysis of the operation of differential-phase protection when overlapping a short circuit before the emergency is incomplete-phase network operation. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta* [Vestnik of Ivanovo State Power Engineering University], 2010, no. 2, pp.1-7. (In Russian)
 24. Burbelo M.I., Melnichuk S. M., Emelyanov A.A. The use of directional protection for the detection of an incomplete-phase load mode in networks with effectively grounded neutral. *Nauchnye trudy Vinnickogo natsionalnogo tekhnicheskogo universiteta* [Scientific works of Vinnitsa National Technical University], 2014, no.2, pp. 1-5.
 25. Nagaj I.V. Ensuring the functions of long-range reservation of relay protection of transformers in the conditions of longitudinal transverse non-symmetry. *Izvestiyavuzov. Severo-Kavkazskij region. Tekhnicheskie nauki* [University news. North-Caucasian region. Technical sciences series], 2011, no. 5, pp. 19-24. (In Russian)
 26. Bulanova O.V., Malafeev A.V., Nikolaev N.A., Rotanova YU.N., Panova E.A. Determination of asynchronous power of synchronous generators in the calculations of electromechanical transient processes in asymmetric modes. *Elektrika* [Electrical engineering], 2010, no. 8, pp. 24-26. (In Russian)
 27. Aires M.N.O., Medeiros R.P., Costa F.B., Silva K.M., Chavez J.J., Popov M. A wavelet-based restricted earth-fault power transformer differential protection. *Electric Power Systems Research*, 2021, vol. 196, article 107246. doi: 10.1016/j.epsr.2021.107246
 28. Simões L.D., Costa H.J.D., Aires M.N.O., Medeiros R.P., Costa F.B., Bretas A.S. A power transformer differential protection based on support vector machine and wavelet transform. *Electric Power Systems Research*, 2021, vol. 197, article 107297. doi: 10.1016/j.epsr.2021.107297

Анализ возможности неполнофазной работы автотрансформаторной группы узлов подстанции 500/220/110 кВ / О.В. Газизова, Е.А. Панова, А.В. Кий, Н.Т. Патшин // *Электротехнические системы и комплексы*. 2022. № 1(54). С. 54-61. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-1\(54\)-54-61](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-1(54)-54-61)

Gazizova O.V., Panova E.A., Kij A.V., Patshin N.T. Feasibility Analysis of Incomplete-Phase Operation of the Autotransformer Group at the 500/220/110 kv Substation. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2022, no. 1(54), pp. 54-61. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-1\(54\)-54-61](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-1(54)-54-61)

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ОТКЛОНЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ НА ПЛАЗМООБРАЗОВАНИЕ УСТАНОВКИ ПЛАЗМЕННОГО УПРОЧНЕНИЯ БАНДАЖЕЙ КОЛЕСНЫХ ПАР

Настройки параметров сигналов отклоняющей системы установки плазменного упрочнения влияют на результаты упрочнения банджа колесной пары подвижного состава железных дорог. Цель исследования заключается в том, чтобы определить зависимость воздействия отклоняющей системы установки плазменного упрочнения на плазмообразующий процесс и результат упрочнения колесной пары при варьировании настроек параметров сигналов. Для анализа и сравнения параметров отклоняющей системы в статье применены методы имитационного моделирования и экспериментальные исследования на действующей установке плазменного упрочнения типа УПЗГ-2П. Описан принцип работы и основные характеристики установки плазменного упрочнения типа УПЗГ-2П. Разработана и смоделирована схема управления и формирования широтно-импульсной модуляции для отклоняющей системы в среде *Proteus VSMPLAB*. Произведена корректировка программы управления для отклоняющей системы установки плазменного упрочнения, написанной на ассемблере, применяющаяся при экспериментальных запусках установки типа УПЗГ-2П. Произведены экспериментальные запуски установки плазменного упрочнения типа УПЗГ-2П с целью определения соответствия требуемых параметров упрочнения в зависимости от изменения параметров отклоняющей системы. Показано, что при изменении настроек формы и частоты тока в блоке управления установкой происходит изменение параметров упрочнения, показана зависимость результатов упрочнения от параметров отклоняющей системы. Проведя анализ полученных результатов моделирования и экспериментов, было отмечено, что при изменении частоты тока отклоняющей системы происходит изменение ширины упрочняемого слоя, а изменение формы тока отклоняющей системы влияет на концентрацию энергии, распределенной по площади упрочнения банджа колесной пары.

Ключевые слова: плазменное упрочнение, бандаж, колесная пара, плазматрон, плазматрон косвенного действия, плазматрон прямого действия, отклоняющая система, частота, форма тока.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время на российских железных дорогах получили широкое применение установки для плазменного упрочнения гребней банджажей колесных пар локомотивов. Плазменное упрочнение банджажей колесных пар является неотъемлемой частью технического обслуживания и ремонта подвижного состава, так как в процессе эксплуатации под воздействием нагрузок колесные пары утрачивают свои эксплуатационные свойства и в связи с этим увеличиваются затраты на запасные части, текущий и капитальный ремонт [1].

Проблема продления ресурса банджажей является весьма актуальной как в экономическом, так и в экологическом и ресурсосберегающем аспектах, поскольку их первичное производство, ремонт и утилизация сопровождаются потреблением сырьевых и энергетических ресурсов, а также техногенным загрязнением окружающей среды.

МЕТОДЫ И ИНСТРУМЕНТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Совершенствование технологий поверхностного упрочнения является важной и актуальной задачей инженерии поверхности – нового направления в материаловедении, изучающего закономерности управления структурой и свойствами поверхностных слоев за счет воздействия на них физико-химическими методами [2]. Одним из перспективных направлений решения этой задачи является плазменное упрочнение, позволяющее управлять структурой и свойствами поверх-

ности банджа колесной пары для повышения твердости, износостойкости и других эксплуатационных свойств.

На рынке представлен ряд комплексов, имеющих как свои достоинства, так и недостатки. Для получения требуемых значений, указанных в [3], каждая компания стремится модернизировать свои установки в направлении автоматизации и совершенствования технологического процесса. Установки плазменного упрочнения принято разделять на два типа:

- косвенного действия;
- прямого действия.

В установке плазменного упрочнения косвенного действия (**рис. 1**) плазмообразующий процесс происходит в плазматроне. Катод и анод-сопло расположены внутри плазматрона, а высокотемпературная струя азота выдувается из сопла за счет газа под давлением. Задание требуемой ширины упрочняемого слоя определяется щелевыми насадками, которые требуется изготавливать под каждый тип колесной пары. Щелевые насадки подвержены сильному термическому нагреву, что приводит к деформации щелевой насадки.

В установке плазменного упрочнения прямого действия (**рис. 2**) плазмообразующий процесс протекает непосредственно между банджажом (который является анодом) и катодом плазматрона. Электрическая дуга находится в потоке плазмы [4]. Для создания требуемой ширины и твердости упрочняемого слоя используется отклоняющая система, которая воздействует своим магнитным полем на электрическую дугу, протекающую в плазме.

Проанализируем влияние отклоняющей системы на примере установки УПЗГ-2П.

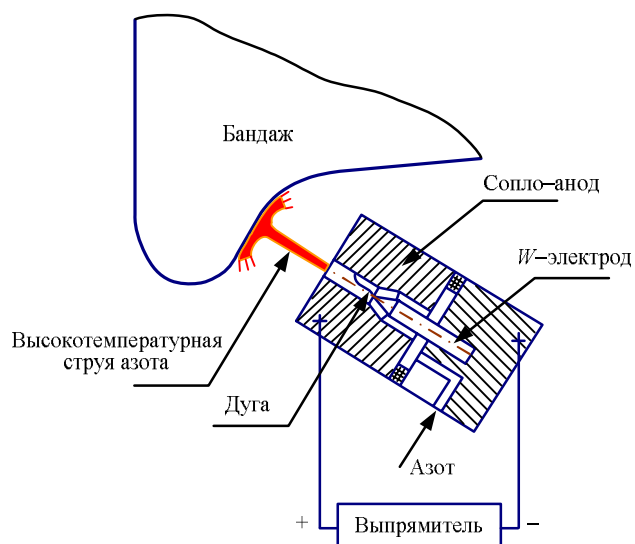


Рис. 1. Плазматрон косвенного действия

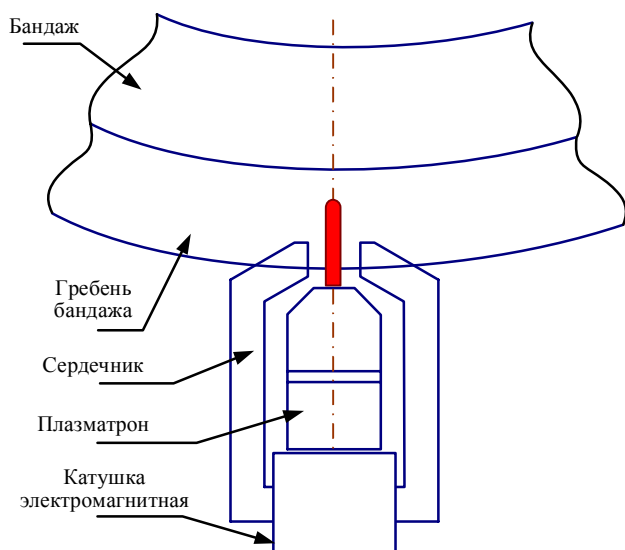


Рис. 2. Плазматрон прямого действия с отклоняющей системой

На рис. 3 представлен плазматрон прямого действия с отклоняющей системой. Основным элементом отклоняющей системы является электромагнитная катушка и сердечник.

Управление электромагнитной системой осуществляется платой управления, представленной на рис. 4, в основе которой лежит микроконтроллер типа PIC16F819, с помощью которого формируются управляющие сигналы ШИМ [5-7] на транзисторные ключи VT1-VT4 [8-11].

Рабочая программа для системы управления написана на машинно-ориентированном языке – ассемблере. В программе могут быть заданы следующие параметры отклоняющей системы:

- нижний и верхний пределы тока возбуждения ($I_{нач}=60$ А, $I_{раб}=100$ А);
- форма тока («трапеция» или «треугольник»);
- частота тока (40 или 60 Гц).

Согласно [3], упрочнённый слой бандажа колесной пары должен иметь следующие параметры:

- ширина упрочненного слоя 32-33 мм;
- равномерная твердость 700-750 HV по всей ширине упрочненного слоя.



Рис. 3. Плазматрон прямого действия УПЗГ-2П

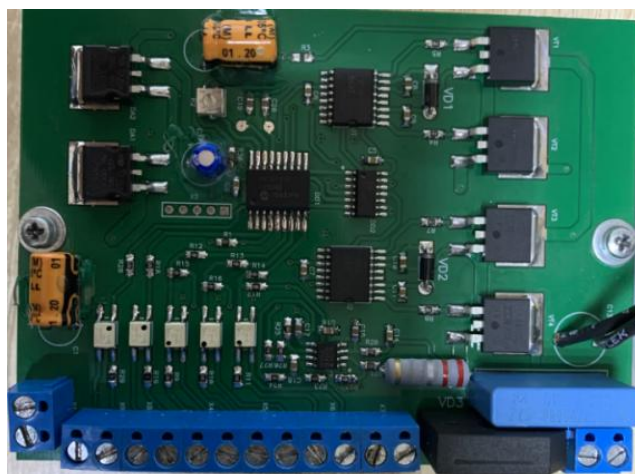


Рис. 4. Плата управления отклоняющей системой

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В целях исследования установим в программе микроконтроллера значение частоты 60 Гц, форму тока «трапеция» и проведем моделирование работы отклоняющей системы в рабочей среде Proteus VSMPLAB (рис. 5).

Результаты моделирования приведены на рис. 6, где указаны осциллограммы сигналов управления и тока.

Произведем задание тока возбуждения установки УПЗГ-2 ($I_{нач} = 60$ А, $I_{раб} = 100$ А) и настройки отклоняющей системы (форма тока «трапеция», $f = 60$ Гц). После проведенного физического эксперимента получим визуальную картину упрочнения бандажа, представленную на рис. 7.

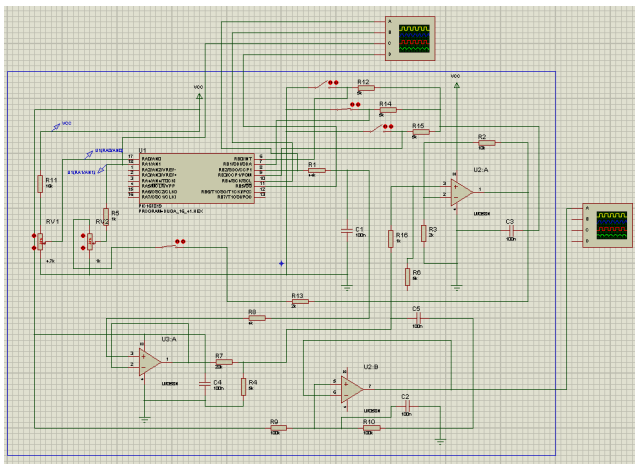


Рис. 5. Модель системы управления отклоняющей системой

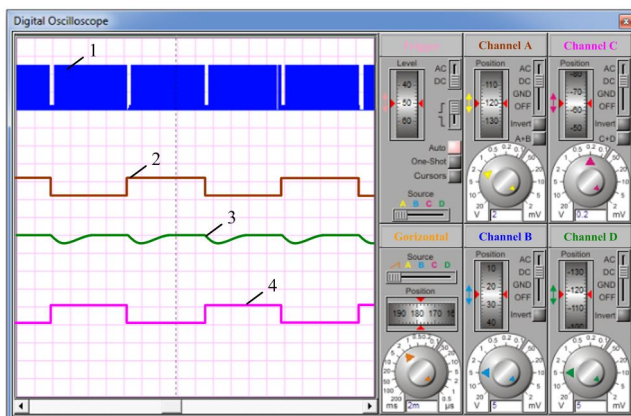


Рис. 6. Осциллограммы работы отклоняющей системы (форма тока «трапеция», $f=60$ Гц): 1 – ШИМ-сигнал управления; 2 – управление по оси X; 3 – ток возбуждения; 4 – управление по оси Y



Рис. 7. Упрочнённый слой бандажа колесной пары (форма тока «трапеция», $f=60$ Гц)

В результате эксперимента получились следующие параметры твердости: 700-750 HV на границах и 600-630 HV по центру упрочненного слоя. При этом ширина упрочненного слоя составила 32 мм. На основе данных результатов можно увидеть неравномерность упрочненного слоя, большую концентрацию энергии на границах и меньшую в центре, а также визуально наблюдать оплавление металла на границах упрочняемого слоя, что не соответствует требованиям [3].

Установив в программе отклоняющей системы установки УПЗГ-2 значение частоты 40 Гц, форму тока «трапеция» и параметры инверторного источника $I_{нач} = 60$ А и $I_{раб} = 100$ А, получаем визуальную картину упрочнения бандажа, представленную на рис. 8.

Твердость по всей плоскости упрочненного слоя варьируется в пределах 280-310 HV, что незначительно превышает исходную твердость металла бандажа колесной пары, равной 240 HV. Ширина упрочненного слоя составляет 50 мм, ближе к границам присутствуют следы оплавления металла. На основе этого эксперимента видно, что при таких заданных параметрах требуемые значения твердости и ширины упрочняемого слоя не достигаются.

По результатам проведенных экспериментов видно, что изменение частоты работы отклоняющей системы влияет на ширину развертки электрической дуги, заключенной в плазменном потоке [12, 13]. Частота 60 Гц удовлетворяет требованиям формирования необходимой ширины упрочняемого слоя, следовательно, для равномерного распределения энергии требуется изменить форму тока отклоняющей системы.

Установив значение частоты 60 Гц и форму тока «треугольник» в программе отклоняющей системы, получим осциллограммы, показанные на рис. 9.

Установим данную программу на контроллер платы управления отклоняющей системы. Произведя запуск установки УПЗГ-2 с параметрами $I_{нач}=60$ А и $I_{раб}=100$ А, получим визуальную картину упрочнения бандажа, представленную на рис. 10.

В результате эксперимента получились следующие параметры твердости: 700-750 HV, с оплавлением в центре, ширина упрочненного слоя 33 мм.



Рис. 8. Упрочнённый слой бандажа колесной пары, частота тока отклоняющей системы 40 Гц

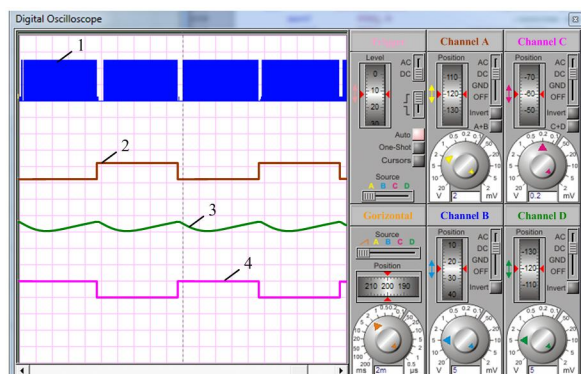


Рис. 9. Осциллограммы работы отклоняющей системы (форма тока «треугольник», $f=60$ Гц): 1 – ШИМ-сигнал управления; 2 – управление по оси X; 3 – ток возбуждения; 4 – управление по оси Y



Рис. 10. Упрочнённый слой бандажа колесной пары (форма тока «треугольник», $f=60$ Гц)

Итог трех проведенных экспериментов показан на рис. 11. Значение твердости, соответствующее требованиям [3], демонстрирует только эксперимент №3 (форма тока «треугольник» и частота 60 Гц).

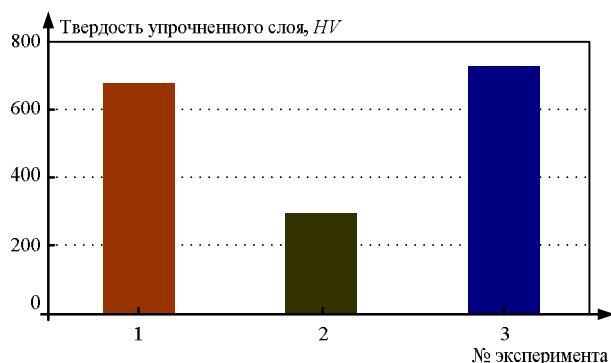


Рис. 11. Гистограмма твердости упрочненного слоя

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании комплекса проведенных экспериментальных исследований установлено, что изменение частоты влияет на ширину упрочняемого слоя, а на распределение энергии по площади упрочнения влияет форма тока отклоняющей системы [14]. При форме тока «трапеция» и высоком значении тока происходит оплавление металла границ слоя, обусловленное продолжительным нахождением дуги на границах, заданное верхним основанием формы «трапеция». При форме тока «треугольник» энергия в большей мере концентрируется в центре упрочняемого слоя, что вызвано продолжительным нахождением дуги в центре. Изменяя параметры отклоняющей системы, можно формировать требуемые значения параметров (твердость и ширину) упрочнения бандажа колесной пары.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Балановский А.Е. Оценка возможности применения технологий поверхностного упрочнения рельсов для уменьшения бокового износа // Сварка в Сибири. 2002. № 2(8). С. 16-21.
2. Плазменное поверхностное упрочнение / Лещинский Л.К., Сомотугин С.С., Пирч И.И., Комар В.И. Киев: Тэхника, 1990. 109 с.
3. ТУ ЦРТ-0001-2010 ОАО «РЖД». Колеса бандажные с плазменным упрочнением гребня для грузовых, пассажирских и маневровых локомотивов. 2010. С. 5-6.
4. Сафонов Е.Н., Дружинин И.С., Орлова Н.В. Закалка поверхностного слоя деталей машин плазменной дугой прямого действия // Упрочняющие технологии и покрытия. 2010. № 9. С. 23-29.
5. Colak I., Kabalci E., Bayindir R. Review of multilevel voltage source inverter topologies and control schemes // Energy Conversion and Management. 2011. Vol. 52. Pp. 1114-1128. doi: 10.1016/j.enconman.2010.09.006
6. Pulse Width and Pulse Frequency Modulation Pattern Controlled Active Clamp ZVS Inverter Link AC-DC Power Converter Utility AC Side Active Power Filtering Function for Consumer Magnetron Driver / Nakaoka M., Saha B., Mun S.P., Mishima T., Kwon S.K. // 33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON). IEEE, 2007. Pp. 1968-1971. doi: 10.1109/IECON.2007.4460148
7. Control of a single phase cascaded H-bridge multilevel inverter for grid-connected photovoltaic systems / E. Villanueva, P. Correa, J. Rodriguez, M. Pacas // Industrial Electronics, IEEE Transactions. 2009. Vol. 56. Pp. 4399-4406. doi: 10.1109/TIE.2009.2029579
8. Ertan H.B., Simsir N.B. Comparison of PWM and PFM induction drives regarding audible noise and vibration for household applications // IEEE Transactions on Industry Applications. 2004. Vol. 40. No. 6. Pp. 1621-1628. doi: 10.1109/TIA.2004.836316
9. Nguyen H.V., Lee D. Comparison of power losses in single-phase to three-phase AC/DC/AC PWM converters // 9th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE-ECCE Asia). IEEE, 2015. Pp. 940-945. doi: 10.1109/ICPE.2015.7167894
10. Wang C.M. A novel single-stage full-bridge buck-boost inverter // Eighteenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC'03). IEEE, 2003. Pp. 51-57. doi: 10.1109/TPEL.2003.820583
11. Modular Cascaded H-Bridge Multilevel PV Inverter With Distributed MPPT for Grid-Connected Applications / B. Xiao, L. Hang, J. Mei, C. Riley, L.M. Tolbert, B. Ozpineci // IEEE Transactions on Industry Applications. 2015. Vol. 51. Pp. 1722-1731. doi: 10.1109/TIA.2014.2354396

12. Пыкин Ю.А. Анахов С.В., Наумейко А.В. Эффективность и безопасность технологий плазменно-дуговой резки металлов // Безопасность труда в промышленности. 2003. №9. С. 15-17.
13. Балановский А. Е. Плазменное поверхностное упрочне-

- ние металлов. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2006. 180 с.
14. Коновалов Ю.В., Гладышев М.А. Автоматизация плазменного упрочнения деталей // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2014. С. 83-87.

Поступила в редакцию 10 января 2022 г.

INFORMATION IN ENGLISH

THE INFLUENCE OF DEFLECTING SYSTEM ON PLASMA FORMATION IN THE WHEEL SET PLASMA HARDENING UNIT

Mikhail P. Dunaev

D.Sc. (Engineering), Professor, Department of Electric Drive and Electric Transport, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia, mdunaev10@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1523-5553>

Maksim A. Gladishev

Postgraduate student, Department of Electric Drive and Electric Transport, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia, maxgldshv1@gmail.com

Mikhail O. Arsentev

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Department of Electric Drive and Electric Transport, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia, miha_ars@mail.ru

The deflection system influences the hardening results of the wheel set plasma hardening unit. The aim of the study is to determine the dependence of the deflecting system impact on the plasma-forming process and the result of wheel set hardening. To analyze and compare the deflecting system parameters, the article uses the methods of simulation and experimental launches on the operating unit UPZG-2P. The operation principle and the main aspects of the plasma hardening unit are described. The control scheme and setting of pulse-width modulation in the Proteus VSMPLAB environment have been developed and modeled. The control program written in the machine-oriented language, assembler, which rejects systems for experimental launches of the installation, has been corrected. Experimental launches of the plasma hardening unit were carried out in order to determine the correspondence of the required hardening parameters depending on the change in the deflecting system parameters. It is shown that when the shape and frequency of the current change, the hardening parameters change, the dependences of the hardening results and the deflecting system parameters are indicated. After analyzing the obtained parameters of modeling and experiments, it was noted that when the current frequency of the deflecting system changes, the width of the hardened layer changes, the change in the current shape of the deflecting system depends on the energy concentration distributed over the hardening area.

Keywords: plasma hardening, tread, wheel set, plasmatron, indirect plasmatron, direct plasmatron, deflecting system, frequency, current shape.

REFERENCES

1. Balanovsky A.E. Feasibility assessment of applying technologies for surface hardening of rails to reduce lateral wear. *Svarka v Sibiri* [Welding in Siberia], 2002, no. 2(8), pp. 16-21. (In Russian)
2. Leshchinsky L.K., Samotugin S.S., Pirch I.I., Komar V.I. *Plazmenoe poverhnostnoe uprochnenie* [Plasma surface hardening]. Kiev, TekhnikaPubl., 1990. 109 p. (In Russian)
3. TU TsRT-0001-2010 JSC "Russian Railways". *Kolesa bandazhie s plazmenim uprochneniem grebnia dlia gruzovih, passazhirskih i manevrovih lokomotivov* [Bandage wheels with plasma ridge hardening for freight, passenger and maneuver locomotives], 2010, pp. 5-6. (In Russian)
4. Safonov E.N., Druzhinin I.S., Orlova N.V. Hardening of the surface layer of machine parts with a direct plasma arc. *Uprochniaushie tehnologii i pokritia* [Strengthening technologies and coatings], 2010, no. 9, pp. 23-30. (In Russian)
5. Colak I., Kabalci E., Bayindir R. Review of multilevel voltage source inverter topologies and control schemes. *Energy Conversion and Management*, 2011, vol. 52, pp. 1114-1128. doi: 10.1016/j.enconman.2010.09.006
6. Nakaoka M., Saha B., Mun S.P., Mishima T., Kwon S.K. Pulse Width and Pulse Frequency Modulation Pattern Controlled Active Clamp ZVS Inverter Link AC-DC Power Converter Utility AC Side Active Power Filtering Function for Consumer Magnetron Driver. *IECON 2007 - 33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. IEEE, 2007, pp. 1968-1971. doi: 10.1109/IECON.2007.4460148
7. Villanueva E., Correa P., Rodriguez J., Pacas M. Control of a single phase cascaded H-bridge multilevel inverter for grid-connected photovoltaic systems. *Industrial Electronics, IEEE Transactions*, 2009, vol. 56, pp. 4399-4406. doi: 10.1109/TIE.2009.2029579
8. Ertan H.B., Simsir N.B. Comparison of PWM and PFM induction drives regarding audible noise and vibration for household applications. *IEEE Transactions on Industry Applications*. IEEE, 2004, vol. 40, no. 6, pp. 1621-1628. doi: 10.1109/TIA.2004.836316
9. Nguyen H.V., Lee D. Comparison of power losses in single-phase to three-phase AC/DC/AC PWM converters. *2015 9th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE-ECCE Asia)*, Seoul, Korea (South), 2015, pp. 940-945. doi: 10.1109/ICPE.2015.7167894
10. Wang C.M. A novel single-stage full-bridge buck-boost inverter. *Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC'03)*, IEEE, 2003, pp. 51-57. doi: 0.1109/TPEL.2003.820583
11. Xiao B., Hang L., Mei J., Riley C., Tolbert L. M., Ozpineci B. Modular Cascaded H-Bridge Multilevel PV Inverter With Distributed MPPT for Grid-Connected Applications. *IEEE Transactions on Industry Application*. IEEE, 2015, vol. 51, pp. 1722-1731.
12. Pykin Yu.A., Anakhov S.V., Naumeiko A.V. Efficiency and safety of plasma-arc cutting technologies of metals. *Be-*

- zopastnost truda v promishlenosti* [Labor safety in industry], 2003, no. 9, pp. 15-17. (In Russian)
13. Balanovsky A.E. *Plazmennoe poverhnostnoe uprochnenie metallov* [Plasma surface hardening of metals]. Irkutsk, ISTU Publ., 2006. 180 p. (In Russian)
 14. Konovalov Yu.V., Gladyshev M.A. Plasma hardening automation. *Povishenie effektivnosti proizvodstva i ispolzovania energii v usloviakh Sibiri* [Increasing the efficiency of production and use of energy in Siberia]. Irkutsk, ISTU Publ., 2014, pp. 83-87. (In Russian)
-
- Дунаев М.П., Гладышев М.А., Арсентьев М.О. Анализ влияния отклоняющей системы на плазмообразование установки плазменного упрочнения бандажей колесных пар // *Электротехнические системы и комплексы*. 2022. № 1(54). С. 62-67. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-1\(54\)-62-67](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-1(54)-62-67)
- Dunaev M.P., Gladishev M.A., Arsentev M.O. The Influence of Deflecting System on Plasma Formation in the Wheel Set Plasma Hardening Unit. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2022, no. 1(54), pp. 62-67. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-1\(54\)-62-67](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-1(54)-62-67)
-

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕЕ УПРАВЛЕНИЕ СЖИГАНИЕМ СМЕШАННОГО ГАЗА В ПРОХОДНЫХ ПЕЧАХ ЛИСТОПРОКАТНЫХ СТАНОВ

При сжигании газообразного топлива важным управляющим параметром является поддержание соотношения газ–воздух, которое обеспечивается с учетом стехиометрического коэффициента газообразного топлива. При сжигании смешанного газа, в котором соотношение компонентов в газовой смеси не контролируется или стехиометрический коэффициент не является постоянным, поддержание оптимального соотношения газ–воздух является достаточно сложной задачей. Кроме того, на процесс сжигания газа оказывают влияние неконтролируемые подсосы воздуха в рабочее пространство, в котором происходит процесс сжигания. Использование поисковой системы управления позволяет определять оптимальное соотношение газ–воздух в процессе непрерывного поиска, однако работа таких систем не должна оказывать влияние на безопасность процесса. В работе рассматривается поисковая система управления сжиганием смешанного газа, которая включает две подсистемы – подсистему стабилизации и подсистему поисковой оптимизации. Каждая из подсистем представляет собой отдельный контур управления, работа которых производится последовательно. Переключение работы с одной системы на другую производится по условию, которое формируется с использованием предложенной в работе методики. При интенсивных изменениях температурных условий и соответствующих изменениях расхода газа производится управление с использованием стабилизирующей подсистемы, а при достижении параметров управляемого процесса заранее определенной зоны происходит переключение на подсистему оптимизации, которая осуществляет поиск наиболее эффективного для текущих условий соотношения газ–воздух, определяемого тепловым эффектом от сжигания. Использование рассматриваемой системы энергосберегающего управления процессом сжигания смешанного газа на одной методической печи производительностью 110 т/ч позволило уменьшить затраты условного топлива на 12,4 т/сут.

Ключевые слова: смешанный газ, теплотворная способность, коэффициент расхода воздуха, сжигание топлива, энергосбережение, двухконтурное управление, экстремальное регулирование.

ВВЕДЕНИЕ

При переходе металлургических предприятий с полным технологическим циклом на непрерывную разливку стали с применением МНЛЗ появилась возможность использования коксового газа, ранее используемого для отопления нагревательных колодцев обжимных заготовочных станов, на отопление проходных печей широкополосных станов горячей прокатки, как альтернативный природному газу более дешевый вид топлива.

Это существенно снижает себестоимость производимой горячекатаной продукции, но одновременно обуславливает возникновение определенных трудностей при управлении эффективным сжиганием смешанного газа в условиях нестационарной работы нагревательных печей, неустойчивости параметров коксового газа, производимого на данном предприятии и неконтролируемой теплотворной способности смешанного газа.

Эффективное управление процессом сжигания газообразного топлива, в свою очередь, подразумевает, что в каждый момент времени должно определяться и поддерживаться такое соотношение газ–воздух, чтобы получать максимальный тепловой эффект [1]. Для решения задач по непрерывному определению и поддержанию требуемого соотношения газ–воздух используются поисковые системы автоматической оптимизации. Нестационарные условия работы печей для нагрева заготовок перед прокаткой приводят к крайне не-

стабильной работе подобных систем, что усложняет их использование при управлении объектами, управляемые параметры которых подвержены сильному влиянию возмущений [2].

ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СЖИГАНИЕМ СМЕШАННОГО ГАЗА

В рабочем пространстве нагревательной печи, разделенном на несколько (от 3 до 10) индивидуально управляемых зон нагрева, осуществляется двухсторонний нагрев непрерывнолитых слабовых или сортовых заготовок. Так как производительность проходных печей жестко увязана с производительностью листопркатного стана, то основной их задачей становится своевременное обеспечение процесса прокатки нагретыми заготовками. В свою очередь, при нагреве заготовок на станах горячей прокатки затрачивается около 20% всего топлива, потребляемого в металлургии, поэтому становится актуальным энергосберегающее управление процессом его сжигания [3].

При наличии достаточных объемов топлива, производимого на данном предприятии, с целью снижения себестоимости технологического процесса, в котором в качестве источника тепловой энергии используется энергия, получаемая от сжигания топлива, целесообразно вместо дорогостоящего природного газа использовать смешанный газ, состоящий из смеси природного и коксового или коксового и доменного газов. В этом случае для сжигания топлива определенного химического состава необходимо обеспечить непрерывное соблюдения соотношения между теоретическим количеством необходимого для сжигания воздуха $V_B^T(\tau)$,

объемом смешанного газа $V_{CM}(\tau)$ и управляющим воздействием $Y(\tau)$ от контура управления соотношением и выраженное в виде некой функциональной зависимости:

$$V_B^T(\tau) = F[V_{CM}(\tau), Y(\tau)], \text{ при } V_B^T(\tau) \in (V^B, V^H), \quad (1)$$

где V^B, V^H – соответственно верхнее и нижнее значения диапазона изменения расхода воздуха, $\text{м}^3/\text{ч}$.

Для систем отопления печей, в которых производительность воздушного вентилятора недостаточна, в качестве ведущего параметра используется расход воздуха, а ведомым параметром будет являться расход смешанного газа. В этом случае принципиального изменения в стратегии управления не будет. Величины расходов газа и воздуха в соотношении меняются местами.

Типовая система управления соотношением расходов газообразного топлива и воздуха строится по схеме объемного пропорционирования, которая основана на определении и стабилизации величины коэффициента расхода воздуха $\alpha(\tau)$, являющегося управляющим воздействием $Y(\tau)$:

$$\alpha_B(\tau) = \frac{V_B(\tau)}{L_0 V_{CM}(\tau)}, \quad (2)$$

где $V_B(\tau)$ – текущее значение расхода воздуха, $\text{м}^3/\text{ч}$; L_0 – коэффициент, равный количеству воздуха, теоретически необходимого для полного сжигания 1 м^3 смешанного газа, $\text{м}^3/\text{м}^3$ (конкретное значение этого параметра зависит от химического состава отопительного газа [4]); $V_{CM}(\tau)$ – текущее значение расхода смешанного газа, $\text{м}^3/\text{ч}$.

Результатом сжигания топлива нагревательной печи является нагрев рабочего пространства. В общем случае текущая температура рабочего пространства $t_{rp}(\tau)$ определяется: величиной расхода смешанного газа, величиной расхода воздуха, величиной внешних случайных технологических возмущений $\delta(\tau)$ [5].

Внешними случайными возмущениями $\delta(\tau)$ являются: изменение производительности прокатного стана от 50 до 750 т/ч [3]; изменение давления коксового газа в общем газопроводе от 5,2 до 6,2 кПа; изменение теплотворной способности (калорийности) коксового газа от 3515 до 3560 ккал/м³ [4]; изменение начального теплового состояния непрерывнолитых заготовок от 20 до 700°C [3, 5] и изменение расхода природного газа, $\text{м}^3/\text{ч}$.

Простая и широко используемая система автоматической стабилизации $\alpha_B(\tau)$ путем объемного пропорционирования расходов газа и воздуха имеет существенный недостаток.

Для используемых на печах двухпроводных или плоскопламенных типов горелок в зависимости от используемого вида топлива и конструктивного исполнения горелок существует нелинейная зависимость рационального технологически обоснованного текущего значения $\alpha_B(\tau)$ от текущего расхода топлива. Конкретный вид такой зависимости для двухпроводных горелок, используемых для сжигания природного газа, представлен на **рис. 1**. Так, при малых расходах газа требуется увеличивать количество подаваемого воздуха для лучшего их перемешивания за счет обеспечения большой кинетической энергии потока [4].

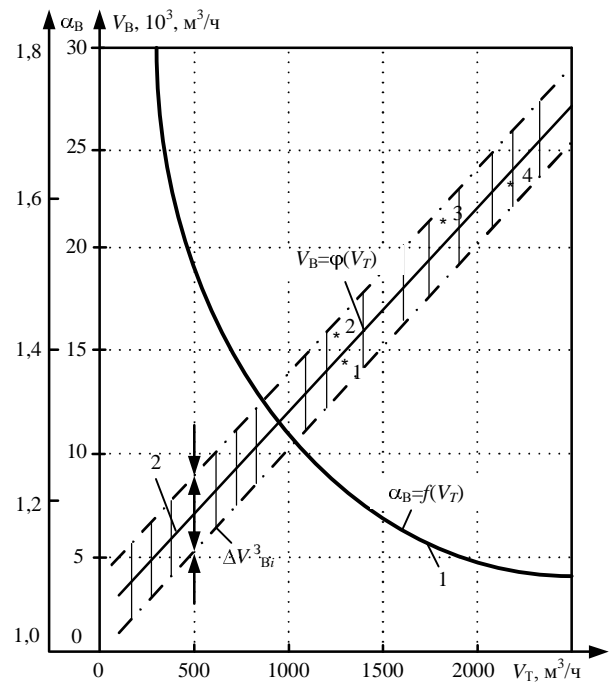


Рис. 1. Зависимость эффективного значения коэффициента расхода воздуха α_B от расхода смешанного газа: 1 – $\alpha_B = f(V_T)$; 2 – $V_B = \phi(V_T)$

Основной проблемой использования соотношения (2) для управления процессом сжигания является погрешность измерения количества воздуха, подающегося на горелочные устройства из-за наличия потерь воздуха на участке между измерительным устройством и горелкой, а также участия в процессе горения кислорода из рабочего пространства, в которое подсасывается воздух из атмосферы. Только при достаточно больших (более 2000 $\text{м}^3/\text{ч}$) расходах топлива значение α_B достаточно стабильно на уровне 1,05–1,1, когда обеспечивается нормальная работа системы объемного пропорционирования [6].

В условиях нестационарного режима работы печей проходного типа расходы топлива в зонах нагрева достаточно часто изменяются, и технолог-оператор просто физически неспособен устанавливать заданное рациональное значение α_B . Поэтому реально устанавливается завышенное значение α_B , способное обеспечивать удовлетворительное сжигание газа во всем диапазоне его наиболее вероятного изменения [7, 8]. Это обстоятельство способствовало использованию на современных печах импульсного управления температурным режимом, когда двухпроводные горелки работают в зоне устойчивого значения α_B при максимальных расходах топлива. Тепловой режим при этом обеспечивается включением числа горелок.

Вторым значительным возмущающим фактором, усложняющим эффективное управление процессом сжигания смешанного газа, является изменение его химического состава, которое, в свою очередь, приводит к изменению его теплотворной способности (калорийности), а с другой стороны, к изменению стехиометрического коэффициента. Причиной этому является не только изменение во времени давления и расхода коксового газа, но и изменение расхода природного газа, что представлено на **рис. 2** для одной из печей широкополосного стана горячей прокатки [9, 10].

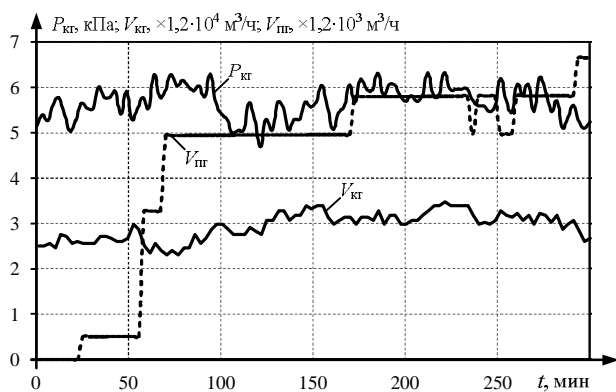


Рис. 2. Изменение во времени давления коксового газа $P_{кг}(\tau)$, расхода природного газа в смесь $V_{пг}(\tau)$ и коксового газа в смесь $V_{кг}(\tau)$ для нагревательной печи стана горячей прокатки

Определение текущей калорийности смешанного газа осуществляется в соответствии с выражением

$$\bar{Q}_{см}(\tau) = \frac{V_{пг}(\tau)\bar{Q}_{пг} + V_{кг}(\tau)\bar{Q}_{кг}}{V_{см}(\tau)}, \quad (3)$$

где $V_{см}(\tau)$, $V_{пг}(\tau)$, $V_{кг}(\tau)$ – контролируемые текущие расходы смешанного, природного и коксового газов, $\text{м}^3/\text{ч}$; $\bar{Q}_{пг}$, $\bar{Q}_{кг}$ – усредненные величины теплотворной способности природного и коксового газов, $\text{ккал}/\text{м}^3$.

Рациональное технологически обоснованное энергосберегающее текущее заданное значение расхода воздуха в индивидуально управляемую зону печи может быть определено в соответствии с выражением

$$V_{Bi}^3(\tau) = \alpha_{Bi}(\tau)L_i(\tau)V_{смi}(\tau), \quad (4)$$

где $\alpha_{Bi}(\tau)$ – рациональное в соответствии с рабочей характеристикой горелки $\alpha_{Bi}(\tau) = f[V_{смi}(\tau)]$ (см. рис. 1) значение коэффициента расхода воздуха для текущего значения теплотворности смешанного газа $\bar{Q}_{см}$; $L_i(\tau) = \mu[\bar{Q}_{см}(\tau)]$ – коэффициент, учитывающий суммарное количество воздуха, необходимого для получения каждой 1000 ккал тепловой энергии (примерно $0,9-1 \text{ м}^3$) из текущей калорийности $\bar{Q}_{см}$ смешанного газа [4]; $V_{смi}(\tau)$ – текущий расход смешанного газа в отапливаемую i -ю зону печи, $\text{м}^3/\text{ч}$.

При реализации типового способа пропорционирования расходами газа и воздуха по зонам нагревательной печи сигнал управления на клапан воздуха формируется с использованием стандартного закона управления, например ПИ-регулятором. Рассогласование контура, подаваемого на ПИ-регулятор, формируется в соответствии с выражением [11]

$$\varepsilon(\tau) = V_{Bi}^3(\tau) - V_{Bi}(\tau), \quad (5)$$

где $V_{Bi}(\tau)$, $V_{Bi}^3(\tau)$ – текущие действительное и заданное значения расходов воздуха в i -ю зону проходной нагревательной печи, $\text{м}^3/\text{ч}$.

Таким образом, при типовом способе управления подачей воздуха на сжигания топлива, не учитывается действие возмущений как со стороны изменения химического состава газа (и его теплотворной способности), так и со стороны системы контроля действительного количества воздуха, подаваемого на горелки, а также

неконтролируемых возмущений, заключающихся в подсосе воздуха в рабочее пространство печи из атмосферы. Эти недостатки типовой системы пропорционирования не позволяют добиться автоматического поддержания максимально возможного теплового эффекта при сжигании газообразного топлива при стационарных условиях работы [3, 10].

ОБОСНОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ АВТОМАТИЧЕСКОГО ПОИСКОВОГО РЕЖИМА УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ СЖИГАНИЯ ГАЗОВОГО ТОПЛИВА

В основу предлагаемой помехоустойчивой автоматической системы энергосберегающего, минимизирующего затраты топлива, управления процессом сжигания заложено наличие унимодальной зависимости температуры в рабочем пространстве нагревательной печи от расхода воздуха, которая была бы достигнута в стационарном режиме работы нагревательной печи. Такая зависимость будет являться статической характеристикой процесса сжигания топлива.

Также статические характеристики процесса сжигания топлива могут быть получены как зависимости температуры греющей среды (факела), измеряемой пирометром полного излучения, от расхода воздуха. Для двухпроводной горелки при различных постоянных расходах смешанного газа и различных условий теплообмена экспериментально получены статические характеристики сжигания топлива, представленные на рис. 3. При определении каждой статической характеристики обеспечивалась стационарность работы нагревательной печи в течение часа.

При малой производительности печи при расходе газа $1250 \text{ м}^3/\text{ч}$ температура греющей среды выше, чем при расходе $2100 \text{ м}^3/\text{ч}$ и высокой производительности. Экстремумы температуры постоянно смещаются (дрейфуют) в зависимости от условий теплообмена и расхода газа.

При управлении процессом сжигания газа от системы управления требуется поиск и поддержание условий, при которых достигается максимальный тепловой эффект от сжигания. Так как управляемым параметром является только расход воздуха на сжигание топлива, то компенсация всех возмущающих воздействий на процесс сжигания должна осуществляться целенаправленным изменением расхода воздуха. Поддержание максимального теплового эффекта от сжигания топлива приведет, в свою очередь, к снижению расхода топлива при стабилизации температуры по зонам нагревательной печи.

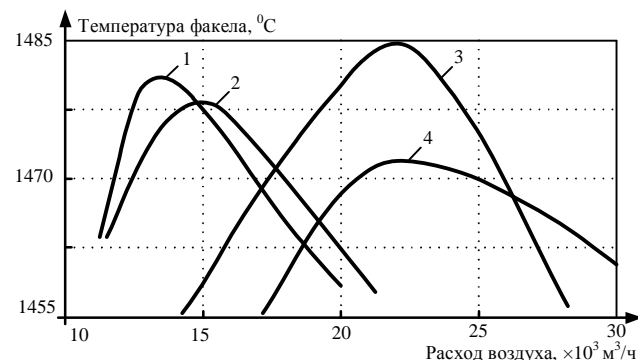


Рис. 3. Зависимости температуры греющей среды от расхода воздуха при различных расходах газа в стационарных условиях: линии 1, 2 – при $1250 \text{ м}^3/\text{ч}$; линия 3 – при $1800 \text{ м}^3/\text{ч}$; линия 4 – при $2100 \text{ м}^3/\text{ч}$ для второй сварочной зоны проходной печи толкательного типа

Для решения задачи формирования поискового режима управления используется система экстремального регулирования (СЭР), теоретические основы работы которых разработаны российским ученым В.В. Казакевичем [12,13]. Поисковый режим работы СЭР осложнен дополнительно тем, что текущее положение экстремума и форма статической экстремальной характеристики оптимизируемого процесса не определены и неизвестны. В известных СЭР [14] обычно совмещены поисковое и рабочее управляющие воздействия. Поэтому для таких СЭР характерен периодический (колебательный) поисковый режим работы. Такой режим работы нельзя признать удовлетворительным, поскольку он способствует преждевременному износу контрольно-управляющих технических средств (датчиков и исполнительных механизмов) [15, 16].

С целью исключения периодического поискового режима работы СЭР процесса сжигания газа, обеспечения помехоустойчивости от действия низкочастотных технологических возмущений и подавления высокочастотных помех в информационных каналах предлагается использовать двухконтурную СЭР управления энергосберегающим режимом сжигания смешанного газа. Каждый контур в такой СЭР представляет собой управляющую расходом воздуха подсистему, работа которой происходит последовательно, в соответствии с методикой, в которой условия переключения определяются в зависимости от текущего состояния процесса сжигания.

Первая подсистема реализует контур стабилизации управляемого параметра, который и обеспечивает быстрое, но «грубое» определение величины расхода воздуха. Переключение на работу первой подсистемы производится при резком изменении расхода газа, которое возникает при действии технологического возмущения, которое формирует контур стабилизации температуры, например, при загрузке или входа в зону ненагретой заготовки [17, 18].

Вторая подсистема реализует контур оптимизации, который обеспечивает точный, но более медленный вывод процесса сжигания топлива на оптимальный энергосберегающий режим в заданной зоне ΔV_{Bi}^3 , составляющий 5-8% от максимального расхода воздуха V_{Bi}^{MAX} для i -й зоны.

Для целей управления и контроля со стороны технологического персонала использование характеристики $\alpha_{Bi}(\tau) = f[V_{CMi}(\tau)]$ является более удобной в виде зависимости $V_{Bi}^3(\tau) = \varphi[V_{CMi}(\tau)]$. В такой форме данная характеристика представлена на **рис. 1**, линия 2.

Заданная зона работы оптимизирующего контура $\Delta V_{Bi}^3(\tau)$, определяемая как директивный параметр, на **рис. 1** заштрихована и точками в этой зоне показаны экстремумы статических характеристик, изображенных на **рис. 3**.

Принцип действия, положенный в методику переключения подсистем стабилизации и оптимизации при энергосберегающем управлении процессом сжигания смешанного газа представлен на **рис. 4**.

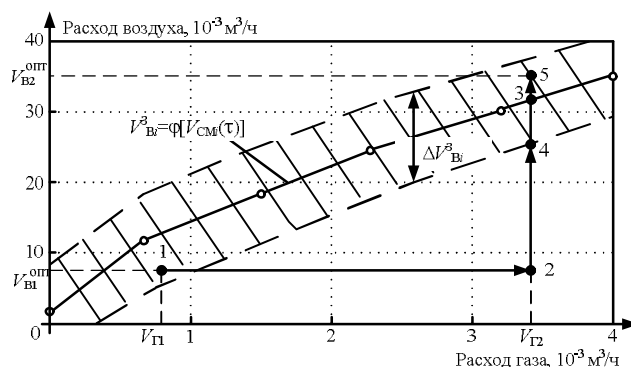


Рис. 4. Принцип работы переключения подсистем в двухконтурной системе управления расходом воздуха

Методика включает в себя следующие этапы:

1. Для каждой индивидуально отапливаемой и управляемой зоны печи методом экспертных оценок определяется рациональная рабочая характеристика $V_{Bi}^3(\tau) = \varphi[V_{CM}(\tau)]$, изображенная на **рис. 4** сплошной линией.

2. Пусть в начальный момент времени для расхода газа $V_{Г1}$ было определено и поддерживалось оптимальное значение расхода воздуха V_{B1} (точка 1). При изменении регулятором температуры расхода газа до значения $V_{Г2}$ процесс оказывается в точке 2, которая лежит вне области, определяющей рациональное значение расхода воздуха. На **рис. 1** и **4** эти области заштрихованы.

3. При выходе значения $V_B(\tau)$ из зоны $\Delta V_{Bi}^3(\tau)$ (на **рис. 4** заштрихованная область) в работу оперативно включается стабилизирующая подсистема, в которой в соответствии с зависимостью $V_{Bi}^3(\tau) = \varphi[V_{CM}(\tau)]$ для текущего значения $V_{Г2}$ устанавливается требуемое значение расхода воздуха, соответствующее точке 4.

4. При достижении значения расходом воздуха границы ΔV_B^3 в точке 4 происходит переключение работы подсистем и включается в работу подсистема оптимизации, в которой в соответствии с используемым оптимизирующим алгоритмом управления (ОАУ) в пределах зоны ΔV_B^3 осуществляется определение оптимального расхода воздуха (точка 5) [17].

Если принять величину ΔV_B^3 равной нулю, то в работе будет использован только стабилизирующий контур, осуществляющий управление в соответствии с реализацией зависимости $V_{Bi}^3(\tau) = \varphi[V_{CM}(\tau)]$, определяемой точкой 3.

СТРУКТУРА АВТОМАТИЧЕСКОЙ ПОИСКОВОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ СЖИГАНИЯ СМЕШАННОГО ГАЗА

Структурная схема поисковой автоматической системы управления процессом сжигания смешанного газа представлена на **рис. 5**. Система управления включает в себя две подсистемы, каждая из которых реализует независимый контур управления: стабилизирующий и оптимизирующий контур.

Стабилизирующий контур содержит датчики текущих расходов газа ДТ и воздуха ДВ с нормирующими преобразователями и вторичными приборами ВП. Функциональный преобразователь ФП осуществляет формирование значения требуемого расхода воздуха в соответствии с рабочей характеристикой:

$$V_{Bi}^3(\tau) = \varphi[V_{CM}(\tau)]. \quad (6)$$

Значение сигнала $V_{Bi}^3(\tau)$ сравнивается в элементе сравнения ЭС с величиной $V_{Bi}(\tau)$, соответствующей действительному текущему расходу воздуха. На выходе элемента сравнения формируется сигнал ΔV_B в соответствии с условием

$$\Delta V_{Bi}(\tau) = V_B(\tau) - V_{Bi}^3(\tau). \quad (7)$$

Сигнал $\Delta V_B(\tau)$ одновременно подается на вход стабилизирующего регулятора и на вход логического элемента сравнения ЛЭС.

Стабилизирующий регулятор в соответствии с принятым ПИ-законом управления формирует управляющее воздействие $\sigma_1(\tau)$, поступающее на логическое переключающее устройство ЛПУ, осуществляющее текущий выбор работы стабилизирующего или оптимизирующего контура.

В ЛЭС осуществляется сравнение текущего значения сигнала $\Delta V_{\text{В;}}(\tau)$ с заданным $\Delta V_{\text{В;}}^3(\tau)$, определяющим разрешенный диапазон работы оптимизирующего контура, формируемый задающим устройством ЗУ.

На выходе ЛЭС формируется логический управляющий сигнал $\sigma_{\text{L}}(\tau)$, определяющий выбор режима управления расходом воздуха $\Delta V_{\text{B}}(\tau)$ в соответствии с условием

$$\sigma_0(\tau) = \begin{cases} +1, & \text{если } -\frac{\Delta V_B^3(\tau)}{2} \geq \Delta V_{Br}(\tau) \geq \frac{\Delta V_B^3(\tau)}{2}; \\ 0, & \text{если } -\frac{\Delta V_B^3(\tau)}{2} < \Delta V_{Br}(\tau) < \frac{\Delta V_B^3(\tau)}{2}. \end{cases} \quad (8)$$

Информационный сигнал для оптимизирующего контура формируется датчиком температуры T , который в зависимости от типа горелок является либо оптическим пирометром для двухпроводного типа [19, 20], либо термопарой для сводовых плоскопламенных горелок [3, 4]. Сигнал с датчика температуры, преобразованный нормирующим преобразователем НП, подается на вход оптимизатора.

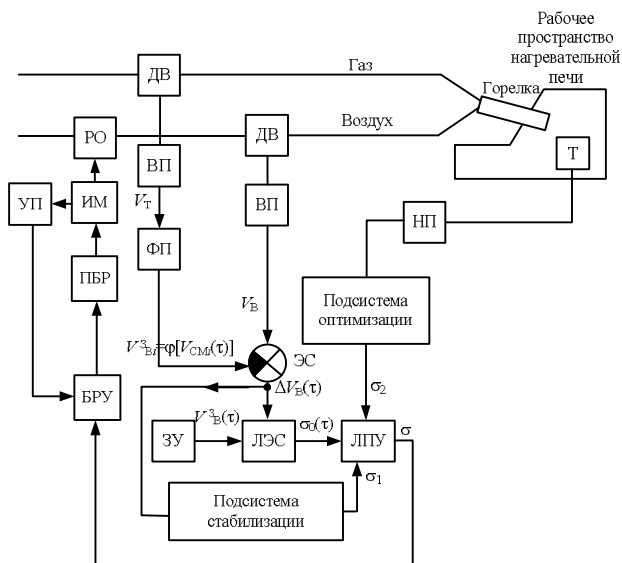


Рис. 5. Структурная схема двухконтурной энергосберегающей системы автоматического управления процессом сжигания газообразного топлива

Оптимизатор осуществляет определение и поддержание энергосберегающих условий сжигания топлива в пределах разрешенной зоны $\Delta V_{\text{Вг}}^3(\tau)$ с использованием одного из видов оптимизирующих алгоритмов управления, подробно изложенных в работах [24, 25]. Управляющее воздействие оптимизирующего контура формируется в виде функции $\sigma_2(\tau) \in (+1, 0, -1)$.

Управляющие сигналы стабилизирующего контура $\sigma_1(\tau)$ и оптимизирующего контура $\sigma_2(\tau)$ подаются на вход логического переключающего устройства ЛПУ, на выходе которого формируется сигнал $\sigma(\tau)$, определяющий выбор режима управления процессом сжигания топлива в соответствии с условием

$$\sigma(\tau) = \begin{cases} \sigma_1(\tau), & \text{если } \sigma_0(\tau) = +1; \\ \sigma_2(\tau), & \text{если } \sigma_0(\tau) = 0. \end{cases} \quad (9)$$

Сигнал $\sigma(\tau)$ подается на вход блока ручного управления БРУ, осуществляющего: переключение режима дистанционного или автоматического управления; ручное-кнопочное управление движением исполнительного механизма ИМ; индикацию прохождения команд «открыто», «закрыто» и текущего положения регулирующего органа РО в процентах хода 0-100%.

Бесконтактный реверсивный пускатель ПБР обеспечивает управление исполнительным механизмом ИМ по сигналам с выхода БРУ.

Для определения реального эффекта от работы предлагаемой энергосберегающей системы процессом сжигания смешанного газа с теплотворной способностью 5000 ккал/м³ был произведен анализ работы нагревательной печи, управление процессом горения на трех (основных) зонах нагрева осуществлялось рассматриваемой системой.

Снижение средних расходов газа по всем трем зонам составило:

$$\Delta V_{CM} = 365 \text{ m}^3/\text{ч} + 252 \text{ m}^3/\text{ч} + 229 \text{ m}^3/\text{ч} = 846 \text{ m}^3/\text{ч}.$$

При допустимых регламентированных простоях стана 3,3 ч снижение расхода смешанного газа на одну печь составило: $846 \text{ м}^3/\text{ч} \cdot 20,7 = 17512 \text{ м}^3/\text{сут}$.

Количество условного топлива будет
 $17512 \cdot (5000/7000) = 12433 \text{ кг/сут.}$ Годовая экономия
 условного топлива при 330 рабочих сутках на одну печь
 составляет: $12433 \cdot 330 = 4102890 \text{ кг/год} = 4103 \text{ т/год.}$

Использование предлагаемой системы управления рассчитано на программную реализацию и не требует дополнительных значительных затрат.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренная система автоматического энергосберегающего управления процессом сжигания смешанного газа при нестационарном режиме работы нагревательной печи и переменной неконтролируемой теплотворности смешанного газа позволяет без существенных затрат заметно повысить эффективность управления процессом сжигания топлива.

Использование двух последовательно работающих подсистем позволяет повысить устойчивость управления процессом сжигания топлива, а значение величины зоны работы оптимизирующей подсистемы является

настроечным параметром, позволяющим определять моменты переключения подсистем. Использование оптимизирующего контура позволяет полностью исключить субъективное вмешательство технологического персонала в режим управления энергоемким процессом сжигания топлива.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Генкин А.Л. Проблемы энергосберегающего управления листопркатным комплексом. Ч.1 // Проблемы управления. 2006. № 6. С.50-54.
- Ariyur K.B. Real-time optimization by extremum-seeking control / K.B. Ariyur, M. Krstic // New-Jersey: Wiley and Sons, 2003. 326 p.
- Андреев С.М., Парсункин Б.Н. Оптимизация режимов управления нагревом в печах проходного типа: монография. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2013. 375 с.
- Линчский В.П. Топливо и его сжигание. М.: Metallurgizdat, 1959. 400 с.
- Кривандин В.А., Егоров А.В. Тепловая работа и конструкция печей черной металлургии. М.: Металлургия, 1989. 462 с.
- Автоматизация методических печей / Л.И. Буглак, И.Б. Вольфман, С.Ю. Ефроймович, Г.К. Захаров, М.Д. Климовицкий, А.М. Сегаль. М.: Металлургия, 1981. 196 с.
- Генкин А.Л. Информативность энергосиловых параметров при управлении температурно-скоростным режимом горячекатаной полосы // Автоматизация в промышленности. 2009. № 8. С. 45-48.
- Арутюнов В.В., Бухмиров В.В., Крупенников С.А. Математическое моделирование тепловой работы промышленных печей. М.: Металлургия, 1990. 239 с.
- Андреев С.М., Парсункин Б.Н. Экспериментальное исследование эффективности энергосберегающих оптимальных режимов нагрева металла // Автоматизированные технологии и производства. 2014. №6. С. 134-143.
- Application of optimization technology for ratio of air to fuel combining feedforward with feedback in heating furnace / H. Zhu, Z. Wen, X. Wang, H. Xu, S. Tao // Journal of Thermal Science. 2002. Vol. 11. No. 3. Pp. 271-276. doi: 10.1007/s11630-002-0065-6
- Васильев М.И., Власов Д.Л., Васильев И.И. Анализ и сравнение основных входных регулирующих воздействий на ПИД-регулятор // Автоматизированные технологии и производства. №2(16). 2017. С. 35-39.
- Казакевич В.В., Родов А.Б. Системы автоматической оптимизации. М.: Энергия, 1977. 288 с.
- 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.
- Самарина И.Г., Толстова Ю.С., Газизова В.А. Система экстремального регулирования с запоминанием максимума скорости изменения выходного параметра // Автоматизированные технологии и производства. 2019. №2(20). С. 14-18.
- Парсункин Б.Н., Васильев М.И., Сибилова Н.С. Энергосберегающее автоматическое нечеткое управление давлением в рабочем пространстве нагревательных печей // Электротехнические системы и комплексы. 2018. №2(39). С. 63-69. doi: 10.18503/2311-8318-2018-2(39)-63-69
- Толстова Ю.С., Газизова В.А., Мухина Е.Ю. Обзор систем управления температурой в методических печах // Автоматизированные технологии и производства. 2019. № 1(19). С. 29-31.
- Прасолов А.С., Самарина И.Г., Бондарева А.Р. Моделирование системы экстремального регулирования на языке LAD // Автоматизированные технологии и производства. 2020. №1(21). С. 22-26
- Hybrid intelligent control of combustion process for ore-roasting furnace / A. Yan, T. Chai, F. Wu, P. Wang // Journal of Control Theory and Applications. 2008. Vol. 6. No. 1. Pp. 80-85. doi: 10.1007/s11768-008-7001-6
- Цимбал В.П. Математическое моделирование металлургических процессов: учеб. пособие. М.: Металлургия, 1986. 240 с.
- Парсункин Б.Н., Бондарева А.Р., Полухина Е.И. Выбор температурного параметра для оперативного управления нагревом металла в методических печах // Автоматизированные технологии и производства. 2015. № 1(7). С. 9-12.

Поступила в редакцию 10 января 2022 г.

INFORMATION IN ENGLISH

ENERGY-SAVING AUTOMATED CONTROL OF MIXED GAS COMBUSTION IN HEATING THROUGH-TYPE FURNACES OF SHEET ROLLING MILLS

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>

Irina G. Samarina

Assistant Professor, Automated Control Systems Department, Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, ig_samarina@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0045-9028>

The important control parameter for the combustion of gaseous fuels is the maintenance of the gas-air ratio, which is provided by taking into account the stoichiometric coefficient of the gaseous fuel. During combustion of the mixed gas, the ratio of components in the gas mixture is not controlled, or the

stoichiometric factor is not constant, the maintaining of optimal gas - air ratio is quite difficult. In addition, the combustion of gas is affected by uncontrolled air leaks in the working space where a combustion process takes place. The use of a control search engine makes it possible to determine the optimal gas-air ratio

during the continuous search, but the operation of such systems should not affect the safety of the process. The two subsystems, the stabilization subsystem and the search engine, are considered in the paper. Each of the subsystems is a separate control circuit that works sequentially. The switching of operation from one system to another is carried out according to the condition, which is formed using the method proposed in the work. In case of intensive temperature condition changes and corresponding gas flow changes, control should be carried out by using the stabilizing subsystem and, upon reaching the parameters of the controlled process of the predetermined zone, it will be switched to the optimization subsystem, which searches for the most efficient gas-air ratio for the current condition determined by the thermal effect from combustion. The use of the energy-saving mixed gas combustion control system under consideration in a single methodical furnace with the capacity of 110 tonnes/h made it possible to reduce conventional fuel costs by 12.4 tonnes/day.

Keywords: mixed gas, calorific value, air flow coefficient, fuel combustion, energy saving, dual-loop control, extremum control.

REFERENCES

- Genkin A.L., Kudelin A.R. Problems of Energy-saving Control of Sheet Mill. Part 1. *Problemy upravleniya* [Control sciences], 2006, no. 6, pp. 50-54. (In Russian)
- Ariyur K.B., Krstic M. Real-time optimization by extremum-seeking control. New-Jersey, Wiley and Sons, 2003. 326 p.
- Andreev S.M., Parsunkin B.N. *Optimizatsiya rezhimov upravleniya nagrevom v pechakh prokhodnogo tipa* [Optimization of Control Modes of Heating Through-type Furnaces]. Magnitogorsk, Nosov Magnitogorsk State Technical University Publ., 2013, 375 p. (In Russian)
- Lincheskiy V. P. *Toplivo i yego szhiganiye* [Fuel and fuel combustion]. Moscow, Metallurgy Publ., 1959, 400 p. (In Russian)
- Krivandin V.A., Yegorov A.V. *Teplovaya rabota i konstruktivnaya pechey chernoy metallurgii* [Thermal production and construction of steel furnaces]. Moscow, Metallurgy, 1989, 462 p. (In Russian)
- Buglak L.I., Volfman I.B., Yefroymovich S.YU., Zakharov G.K., Klimovitskiy M.D., Segal A.M. *Avtomatizatsiya metodicheskikh pechey* [Automation of continuous furnaces]. Moscow, Metallurgy, 1981, 196 p. (In Russian)
- Genkin A.L. Information Capacity of Power Parameters in Controlling the Temperature and Speed Mode of Hot Strip. *Avtomatizatsiya v promyshlennosti* [Automation in Industry], 2008, no. 8, pp.45-48. (In Russian)
- Arutyunov V.V., Bukhmirov V.V., Krupennikov S.A. *Matematicheskoe modelirovanie teplovooy raboty promyshlennykh pechey* [Mathematical Modeling of Thermal Performance of Industrial Furnaces]. Moscow, Metallurgy Publ., 1990, 239 p. (In Russian)
- Andreev S.M., Parsunkin B.N. Pilot study of efficiency of energy saving optimum metal heating modes. *Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva* [Automated technologies and production], 2014, no. 6, pp. 134-143. (In Russian)
- Zhu H., Wen Z., Wang X., Xu H., Tao S. Application of optimization technology for ratio of air to fuel combining feedforward with feedback in heating furnace. *Journal of Thermal Science*, 2002, vol. 11, no. 3, pp. 271-276. doi: 10.1007/s11630-002-0065-6
- Vasilyev M.I., Vlasov D.L., Vasilyev I.I. Analysis and comparison of the main input regulatory actions on the PID regulator. *Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva* [Automated technologies and production], 2017, no. 2(16), pp. 35-39. (In Russian)
- Kazakevich V.V., Rodov A.B. *Sistemy avtomaticheskoy optimizatsii* [Systems of automatic optimization]. Moscow, Energiya, 1977, 288 p. (In Russian)
- 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)
- Samarina I.G., Tolstova Yu.S., Gazizova V.A. The system of extreme regulation with storing the maximum rate of change of the output parameter. *Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva* [Automated technologies and production], 2019, no. 2, pp. 14-18. (In Russian)
- Parsunkin B.N., Vasilyev M.I., Sibileva N.S. Energy-saving automatic fuzzy pressure control in the working space of heating furnaces. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы*, [Electrotechnical Systems and Complexes], 2018, no. 2(39), pp. 63-69. doi: 10.18503/2311-8318-2018-2(39)-63-69 (In Russian)
- Tolstova Yu.S., Gazizova V.A., Mukhina E.Yu. The review of methods and measuring instruments of metal level in continuous-casting machines crystallizer. *Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva* [Automated technologies and production], 2019, no. 1(19), pp. 21-24. (In Russian)
- Prasolov A.S., Samarina I.G., Bondareva A.R. Modeling of the extreme control system in the LAD language. *Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva* [Automated technologies and production], 2020 no. 1(21), pp. 22-26. (In Russian)
- Yan A., Chai T., Wu F., Wang P. Hybrid intelligent control of combustion process for ore-roasting furnace. *Journal of Control Theory and Applications*, 2008, vol. 6, no. 1, pp. 80-85. doi: 10.1007/s11768-008-7001-6
- Tsimbal V.P. *Matematicheskoe modelirovanie metalurgicheskikh protsessov* [Mathematical modeling of metallurgical processes]. Moscow, Metallurgy, 1986. 240 p. (In Russian)
- Parsunkin B.N., Bondareva A.R., Polukhina E.I. Selecting the temperature setting for the operational control of metal heating in continuous furnaces. *Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva* [Automated technologies and production], 2015, no. 1(7), pp. 9-12. (In Russian)

Парсункин Б.Н., Андреев С.М., Самарина И.Г. Автоматизированное энергосберегающее управление сжиганием смешанного газа в проходных печах листопрокатных станов // Электротехнические системы и комплексы. 2022. № 1(54). С. 68-74. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-1\(54\)-68-74](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-1(54)-68-74)

Parsunkin B.N., Andreev S.M., Samarina I.G. Energy-saving Automated Control of Mixed Gas Combustion in Heating Through-Type Furnaces of Sheet Rolling Mills. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2022, no. 1(54), pp. 68-74. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-1\(54\)-68-74](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-1(54)-68-74)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Амангалиев Ерлан Зингалеевич – старший преподаватель, кафедра электроснабжения и возобновляемых источников энергии, Алматинский университет энергетики и связи им. Г.Д. Даукеева, Алматы, Республика Казахстан, amangaliev_erlan@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2842-2702>

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>

Арсентьев Михаил Олегович – канд. техн. наук, доцент, кафедра электропривода и электрического транспорта, Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия, miha_ars@mail.ru

Ахъев Джавод Саламшоевич – канд. техн. наук, доцент, кафедра электрических станций, Таджикский технический университет им. академика М.С. Осими, Душанбе, Таджикистан, javod_66@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9869-288X>

Баранов Денис Сергеевич – аспирант, кафедра электропривода, автоматики и управления в технических системах, Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия, den.baranov.1993.@bk.ru

Белоусов Алексей Сергеевич – аспирант, кафедра электропривода, Липецкий государственный технический университет, Липецк, Россия, 011bas962@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-9464-2260>

Газизова Ольга Викторовна – канд. техн. наук, доцент, кафедра электроэнергетики, Тюменский индустриальный университет, филиал ТИУ в Тобольске, Тобольск, Россия, logan_b_7@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9416-672X>

Гладышев Максим Александрович – аспирант, кафедра электропривода и электрического транспорта, Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия, maxgldshv1@gmail.com

Дмитриев Степан Александрович – канд. техн. наук, доцент, кафедра автоматизированных электрических систем, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия, dmstepan@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8781-2383>

Дмитриева Анна Алексеевна – аспирант, кафедра автоматизированных электрических систем, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия, Korelina-aa@yandex.ru

Дунаев Михаил Павлович – д-р техн. наук, профессор, кафедра электропривода и электрического транспор-

та, Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия, mdunaev10@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1523-5553>

Кий Анатолий Вячеславович – магистрант, кафедра электроснабжения промышленных предприятий, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

Кокин Сергей Евгеньевич – д-р техн. наук, профессор, кафедра автоматизированных электрических систем, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия, s.e.kokin@urfu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7493-172X>

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>

Косматов Валерий Иванович – канд. техн. наук, профессор, кафедра автоматизированного электропривода и мехатроники, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия, <https://orcid.org/0000-0002-1985-3244>

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

Малахов Олег Сергеевич – канд. техн. наук, доцент, кафедра автоматизированного электропривода и мехатроники, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия, osmalahov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2716-004X>

Матренин Павел Викторович – канд. техн. наук, доцент, старший преподаватель, кафедра систем электроснабжения предприятия, Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия, pavel.matrenin@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5704-0976>

Мешеряков 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>

Омельченко Евгений Яковлевич – д-р техн. наук, профессор, кафедра автоматизированного электропривода и мехатроники, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия, <https://orcid.org/0000-0002-0547-485X>

Панова Евгения Александровна – канд. техн. наук, доцент, кафедра электроэнергетики, Тюменский индустриальный университет, филиал ТИУ в Тобольске, Тобольск, 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>

Патшин Николай Трофимович – канд. техн. наук, доцент, кафедра электроснабжения промышленных предприятий, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

Пермякова Ольга Валерьевна – старший преподаватель, кафедра информатики и информационной безопасности, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия, mrs.permyakova.olga@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-4949-0744>

Петушков Михаил Юрьевич – д-р техн. наук, доцент, кафедра электроники и микроэлектроники, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия, m.petushkov@magtu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4154-375X>

Самарина Ирина Геннадьевна – старший преподаватель, кафедра автоматизированных систем управления, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия, ig_samarina@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0045-9028>

Сарваров Анвар Сабулханович – д-р техн. наук, профессор, кафедра автоматизированного электропривода и мехатроники, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия, anvar@magtu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0529-4488>

Сафаралиев Муродбек Холназарович – инженер-исследователь, кафедра автоматизированных электрических систем, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия, murodbek_03@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3433-9742>

Сенюк Михаил Дмитриевич – аспирант, кафедра автоматизированных электрических систем, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия, mdsenuk@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5589-7922>

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

Шохин Валерий Владимирович – канд. техн. наук, доцент, кафедра автоматизированного электропривода и мехатроники, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия, shwww@mgn.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8804-2253>

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.