

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

ИЗДАЕТСЯ С ЯНВАРЯ 1996 Г.

№4(33), ДЕКАБРЬ 2016

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).

Редакционный совет

Председатель редсовета:

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

Зам. председателя редсовета:

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

Члены редакционного совета:

Н.Ф. Джагаров – проф., д-р техн. наук, г. Варна, Болгария;

В.Д. Дмитриенко – проф., д-р техн. наук, Харьковский политехнический институт;

Р.А. Сытдыков – доц., д-р техн. наук, Ташкентский государственный технический университет, г. Ташкент, Узбекистан;

К.Т. Тергемес – доц., канд. техн. наук, Алматинский университет энергетики и связи, г. Актау, Казахстан;

Б.А. Левин – канд. техн. наук, Академический колледж Тель-Авив-Яфо, Тель-Авив, Израиль;

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

А.Е. Козярук – проф., д-р техн. наук, Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, Россия;

Л.И. Цытович – проф., д-р техн. наук, ЮУрГУ (НИУ), г. Челябинск, Россия;

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

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

Ю.П. Журавлев – канд. техн. наук, гл. энергетик ОАО «ММК», г. Магнитогорск, Россия.

Д.В. Чистяков – канд. социол. наук, исполнительный директор ЗАО «КонсОМ СКС».

Редакционная коллегия

Главный редактор:

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

Члены редакционной коллегии:

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

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

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

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

Е.Б. Агапитов – проф., д-р техн. наук, МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия;

Ю.И. Савченко – доц., канд. физ.-мат. наук, МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия.

Ответственный редактор:

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

Технические редакторы:

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

Д.А. Савинов – МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия.

© ФГБОУ ВО «МГТУ», 2016

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.

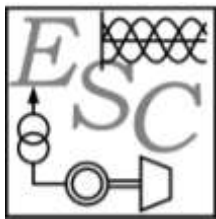
Адрес редакции:

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

Журнал отпечатан на полиграфическом участке
МГТУ им. Г.И. Носова.

455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38.

Выход в свет 25.12.2016. Заказ ... Тираж 500 экз. Цена
свободная.



ELECTROTECHNICAL SYSTEMS AND COMPLEXES

PUBLISHED SINCE JAN., 1996

NO.4(33) DEC., 2016

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 committee

Head of editorial committee:

Sergey I. Lukianov – Professor, D.Sc. (Eng.),
NMSTU, Magnitogorsk, Russia.

Vice Chairman of editorial committee:

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

Members of Editorial committee:

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

V.D. Dmitrienko – Professor, D.Sc. (Eng.), Na-
tional Technical University "Kharkiv Polytechnic
Institute", Kharkov, Ukraine;

R.A. Sitdikov – Associate Professor, D.Sc. (Eng.),
Tashkent State Technical University, Tashkent,
Uzbekistan;

K.T. Tergemes – Associate Professor, Ph.D. (Eng.),
Almaty University of Power Engineering & Tele-
communications, Aktau, Kazakhstan;

B.A. Levin – D.Sc. (Eng.), The Academic College of
Tel-Aviv-Yaffo, Tel-Aviv, Israel;

O.I. Osipov – Professor, D.Sc. (Eng.),
NRU «MPEI», Moscow, Russia;

A.E. Kozyaruk – Professor, D.Sc. (Eng.), Saint-
Petersburg Mining University, Saint-Petersburg,
Russia;

L.I. Tsitovitch – Professor, D.Sc. (Eng.), «SUSU»
(NRU), Chelyabinsk, Russia;

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

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

I.P. Zhuralev – Ph.D.(Eng.), chief power engineer
«MMK» JSC, Magnitogorsk, Russia.

D.V. Chistyakov – Ph.D.(Sociology), chief execu-
tive «KonsOM SKS» JSC.

Editorial board

Editor-in-chief:

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

Editorial board members:

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

I.I. Barankova – Professor, D.Sc. (Eng.),
NMSTU, Magnitogorsk, Russia;

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

S.M. Andreev – Associate Professor, Ph.D.(Eng.),
NMSTU, Magnitogorsk, Russia;

E.B. Agapitov – Associate Professor,
D.Sc. (Eng.), NMSTU, Magnitogorsk, Russia;

Yu.I. Savchenko – Associate Professor, Ph.D. in
Physics and Mathematics, NMSTU, Magnito-
gorsk, Russia.

Executive editor:

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

Typographers:

E.A. Panova – Ph.D.(Eng.), NMSTU, Magnito-
gorsk, Russia;

D.A. Savinov – NMSTU, Magnitogorsk, Russia.

© FSBEI HE NMSTU, 2016

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 .

The publisher:

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

Printed by the NMSTU printing section,
38, pr. Lenina, city of Magnitogorsk, 455000, Russia.
Publication date: 25.12.2016. Order. Circulation: 500.
Open price.

СОДЕРЖАНИЕ

К 50-летию кафедры электроснабжения промышленных предприятий Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова.....	4
ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА	6
<i>Малафеев А.В., Трemasов М.А.</i> Анализ устойчивости двигателей собственных нужд тепловых электростанций с учетом характеристик приводных механизмов	6
<i>Мугалимов Р.Г., Мугалимова А.Р.</i> Сравнительная оценка класса энергоэффективности асинхронных двигателей и электротехнических комплексов с их применением	14
ЭЛЕКТРО- И ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА.....	20
<i>Устимов К.В., Агапитов Е.Б., Михайловский В.Н., Семенов Е.А., Осолков С.В.</i> Поиск технических решений по увеличению выработки электроэнергии на низкопотенциальном паре охладителей конвертерных газов	20
<i>Ягольникова Е.Б., Рудаков Н.А., Шошин М.А.</i> Расчет и анализ составляющих потерь электроэнергии на примере ОАО «ММК»	25
<i>Варганов Д.Е., Варганова А.В., Баранкова И.И.</i> Применение экономико-математических моделей газопоршневых установок с целью повышения эффективности работы энергоузлов с источниками распределенной генерации.....	29
<i>Панова Е.А., Альбрехт А.Я.</i> Уточненные удельные электрические параметры двухцепных ЛЭП 110 кВ для дистанционного определения места повреждения.....	35
<i>Шеметов А.Н., Федорова С.В., Кузнецов С.В., Ляпин Р.Н.</i> Современные проблемы и перспективы формирования модели управления энергохозяйством на предприятиях горно- металлургического комплекса	41
<i>Бунин А.А., Газизова О.В., Тарасов В.М.</i> Анализ статической устойчивости и энергопотребления синхронных двигателей при их подключении к преобразователям частоты с изменением технологических и электрических параметров режима работы	49
ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА, АВТОМАТИКА И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ.....	61
<i>Николаев А.А., Анохин В.В., Тулупов П.Г.</i> Разработка математической модели электротехнического комплекса «дуговая сталеплавиная печь – статический тиристорный компенсатор».....	61
<i>Абулвелеев И.Р., Храмшин Т.Р., Корнилов Г.П., Никифоров Г.В.</i> Принципы построения векторной широтно-импульсной модуляции для трехуровневого инвертора	72
<i>Климаш В.С., Йе Мин Тху</i> Обобщенное математическое описание и моделирование тиристорных преобразователей, ведомых сетью	78
ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ.....	88

CONTENT

To The 50th Anniversary of Electric Power supply Department of Nosov Magnitogorsk State Technical University	4
THE THEORY AND PRACTICE OF AUTOMATED ELECTRIC DRIVE.....	6
<i>Malafeev A.V., Tremasov M.A.</i> A Analysis of Auxiliary Motor Stability at Heat Power Plants Taking Into Account Characteristics of Drive Mechanisms	6
<i>Mugalimov R.G., Mugalimova A.R.</i> Comparative Estimation of Energy Efficiency of Asynchronous Motors and Electrical Engineering Complexes with their Application.....	14
ELECTRO- AND THERMOTECHNICS	20
<i>Ustimov K.V., Agapitov E.B., Mikhaylovskiy V.N., Semenov E.A., Oskolkov S.V.</i> Search for Technical Solutions to Increase Power Generation Using Low- potential Steam of Converter Gas Coolers	20
<i>Yagol'nikova E.B., Rudakov N.A., Shoshin M.A.</i> Calculation and Analysis of Components of Power Loss Using JSC "MMK" as an Example.....	25
<i>Varganov D.E., Varganova A.V., Barankova I.I.</i> Application of Economic and Mathematical Models of Gas Reciprocating Unit to Improve Operational Efficiency of Power Center with Distributed Generation Sources	29
<i>Panova E.A., Al'brekht A.Ya.</i> Specified Per-unit Parameters of Double-circuit 110 kV Overhead Lines for Distant Fault Location	35
<i>Shemetov A.N., Fedorova S.V., Kuznetsov S.V., Lyapin R.N.</i> C Modern Problems and Prospects of Model Forming of Energy Management at Enterprises of Mining and Metallurgical Complex	41
<i>Bunin A.A., Gazizova O.V., Tarasov V.M.</i> Analysis of static stability and energy consumption of synchronous motors when they are connected to frequency converters with changing technological and electrical operating parameters	49
POWER ELECTRONICS, AUTOMATION AND CONTROL SYSTEMS	61
<i>Nikolaev A.A., Anokhin V.V., Tulupov P.G.</i> Design of Mathematical Model of Electrotechnical Complex "Electric Arc Furnace – Static Var Compensator".....	61
<i>Abulveleev I.R., Khramshin T.R., Kornilov G.P., Nikiforov G.V.</i> Basic principles of space vector modulation for three-level NPC-inverters	72
<i>Klimash V.S., Ye Min Tkhu</i> Generic Mathematical Description and Modeling of Thyristor Converters Controlled by Power Line	78

К 50-ЛЕТИЮ КАФЕДРЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ МАГНИТОГОРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА ИМ. Г.И. НОСОВА

50 лет назад, в 1966 году, в Магнитогорском горно-металлургическом институте на базе кафедры горной электротехники была организована кафедра электроснабжения промышленных предприятий (ЭПП), за годы своего существования ставшая основным поставщиком инженеров-электриков для предприятий Южного Урала и, в первую очередь, Магнитогорского металлургического комбината.

Первым заведующим кафедрой был Игорь Антонович Саламатов – один из основателей электротехнической школы в нашем вузе, талантливый ученый, педагог и опытный производственник, который до приглашения в институт работал главным энергетиком рудника на Кузнецком металлургическом комбинате, а затем – начальником Карпинского энергоуправления.

Первоначально в составе кафедры было всего 6 человек: доцент, к.т.н. И.А. Саламатов, старшие преподаватели Р.Б. Авринский, С.С. Наумов, В.Ф. Туров и ассистенты Г.Б. Белых и Н.В. Вдовина.

С 1970 года началось научное сотрудничество кафедры ЭПП с Магнитогорским металлургическим комбинатом, которое успешно продолжается по сей день. Основные направления совместной научной деятельности – нормирование электропотребления и совершенствование режимов системы электроснабжения. Научно-исследовательский сектор кафедры увеличивается до 12 человек, на должность инженера-исследователя приходит Валентин Алексеевич Игуменцев – ведущий специалист в области режимов эксплуатации систем электроснабжения промышленных предприятий, до этого занимавший должность заместителя начальника цеха электрических сетей ММК.

В 1971 г. состоялся первый выпуск (56 человек) инженеров по специальности «Электроснабжение», а в 1972 г. был проведен первый набор студентов (25 человек) на новую специальность «Электроэнергетика» для подготовки инженеров-преподавателей электро-энергетических дисциплин. Выпускники этого курса по настоящее время успешно работают в нашем вузе и многопрофильном колледже.

В 1977 году кафедра ЭПП, выполнявшая ряд научно-исследовательских работ по компенсации реактивной мощности, стала организатором республиканской конференции, в которой приняли участие 36 специалистов различных вузов и промышленных предприятий. Научное сотрудничество кафедры и ПТП «Уралэнергочермет» продолжалось в течение 15 лет. За этот период под научным руководством В.А. Игуменцева и И.А. Саламатова выполнены НИР для 23 горно-металлургических предприятий Советского Союза, позволившие получить экономию электроэнергии в объеме более 150 млн кВт·ч.

С 1979 года в течение 30 лет кафедру возглавлял Борис Иванович Заславец – канд. техн. наук, профессор, заслуженный работник высшей школы РФ, автор более 150 научных и учебно-методических работ. Под его руководством, в целом, и сформировался современный высокопрофессиональный преподавательский

коллектив, проведена полная реконструкция лабораторной базы кафедры, открыта аспирантура по научной специальности 05.09.03 – «Электротехнические системы и комплексы», что позволило освоить новые научные направления и обеспечить подготовку высококвалифицированных кадров как для нашего вуза, так и для энергослужб ОАО «ММК».

С приходом к руководству Б.И. Заславца значительно активизировалась научно-исследовательская работа преподавателей и сотрудников кафедры, приобрели новое содержание и формы научно-технического сотрудничества с ОАО «ММК», РАО «Газпром» и другими крупнейшими предприятиями региона и страны. За счет притока молодых специалистов и аспирантов активизировались защиты диссертаций.

На сегодняшний день в рамках научной школы «Создание энергоэффективных систем транспортировки, распределения и потребления тепловой и электрической энергии на промышленных предприятиях» на кафедре три основных направления:

- энергосбережение и управление электропотреблением на промышленных предприятиях;
- компенсация реактивной мощности и оптимизация ее распределения в системах электроснабжения;
- расчет, оптимизация и оперативное управление установившимися и переходными режимами систем электроснабжения.

По результатам выполненных НИОКР кафедрой проведены три всесоюзные научно-технические конференции по повышению эффективности электроснабжения промышленных предприятий (в 1983, 1985 и 1990 гг.), две международные конференции «Энергосбережение на промышленных предприятиях» (в 1997 и 2000 гг.), подготовлены и защищены 8 кандидатских и 2 докторских диссертации, опубликованы более 500 статей и 20 монографий.

О значимости работ наших ученых говорят их награды:

- В 2003 году профессора кафедры ЭПП В. К. Олейников и Г. В. Никифоров стали Лауреатами премии Правительства РФ за разработки и внедрение в ОАО «ММК» результатов научно-исследовательских работ по энергосбережению.
- В 2005 году А.В. Малафеев и А.Н. Шеметов выиграли грант ведомственной научной программы «Развитие научного потенциала высшей школы» Министерства образования и науки РФ с исследовательским проектом «Разработка методов оперативного управления режимами электроснабжения и электропотребления крупных металлургических предприятий с целью повышения их энергоэффективности».
- В 2010 году молодые доценты О.В. Буланова и Ю.Н. Ротанова заслужили престижную премию Российского Союза научных и инженерных общественных организаций «Надежда России» в области науки и техники.
- В 2012 году Е.А. Панова стала победителем открытого публичного конкурса на получение стипендии Президента Российской Федерации молодым ученым и

аспирантам, осуществляющим перспективные научные исследования и разработки по приоритетным направлениям модернизации российской экономики 2012-2014 гг., а в 2016 году аспирант И.Р. Абдулвелеев одержал победу в конкурсе на получение стипендии Президента РФ для студентов и аспирантов, обучающихся по направлениям подготовки, соответствующим приоритетным направлениям модернизации и технологического развития российской экономики.

Студенты и аспиранты кафедры регулярно занимают призовые места на конференциях, олимпиадах и конкурсах научных работ различного уровня.

С 2004 года кафедра электроснабжения промышленных предприятий реализует образовательные программы бакалавриата и магистратуры по направлению «Электроэнергетика и электротехника» (профили «Электроснабжение» и «Менеджмент в электроэнергетике»), аспирантуры по специальности «Электротехнические системы и комплексы», а также ведет переподготовку и повышение квалификации выпускников, целевую подготовку специалистов-электриков для ОАО «ММК» и других предприятий региона.

Студенты приобретают знания, умения и опыт работы в области проектирования, монтажа, наладки и эксплуатации электроэнергетических систем различного уровня от коммунально-бытовой сферы до крупных промышленных предприятий и региональных электрических сетей.

Преподавателями и сотрудниками кафедры подготовлено и опубликовано 2 учебника, десятки учебных пособий, сотни методических указаний и разработок.

Неотъемлемой частью обучения студентов является практическая работа, для чего на кафедре имеется шесть специализированных учебных лабораторий, в том числе научно-исследовательская лаборатория режимов электроэнергетических систем, оборудованная современной вычислительной техникой с оригинальным авторским программным обеспечением (руководитель разработки – А.В. Малафеев).

В 2016 году специалисты кафедры приняли участие в создании совместного научно-образовательного центра ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова» и компании Schneider Electric. Учебную и производственную практику студенты проходят на ведущих предприятиях города и региона: ОАО «ММК», ОАО «МРСК Урала», ОАО «Северсталь», ОАО «УГМК» и др., а также за рубежом – в научно-производственных центрах Италии, Франции, Турции.

За годы работы кафедрой ЭПП выпущено более 2500 инженеров-электриков по специальности «Электроснабжение», 89 бакалавров и 40 магистров по направлению «Электроэнергетика и электротехника». Наши выпускники успешно работают на промышленных предприятиях, в городском коммунальном и сельском хозяйстве, в учебных заведениях, проектных и научно-исследовательских организациях, а также в бизнесе. Многие стали руководителями высокого уровня. Среди них: Ю.П. Журавлев – главный энергетик ОАО «ММК», А.Л. Савицкий – академик АПН РФ; С.Я. Улитенко – директор МУП трест «Горэлектросеть г. Магнитогорск», Даниленко В.Г. – зам. главного энергетика ОАО «ММК» по электроснабжению и многие другие.

Наша кафедра имеет богатые традиции, широкую известность в городе и регионе и высокий интеллектуальный потенциал. Именно они дают возможность развиваться во всех направлениях – научном, учебно-методическом, общественном, инновационном.

Мы гордимся своими выпускниками и уделяем много внимания работе со студентами, стремясь воспитывать высокообразованных и думающих людей, помогая им раскрыться, максимально проявить все свои способности. Мы учим ставить высокие жизненные цели и достигать их, сочетая современные профессиональные знания с нравственностью, порядочностью и честностью.

*Заведующий кафедрой ЭПП,
д-р техн. наук, профессор
Геннадий Петрович Корнилов*

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

УДК 621.311.22

DOI: 10.18503/2311-8318-2016-4(33)-6-13

Малафеев А.В.¹, Тремасов М.А.²¹ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»²ОАО «Магнитогорский ГИПРОМЕЗ»АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ ДВИГАТЕЛЕЙ СОБСТВЕННЫХ НУЖД ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ
С УЧЕТОМ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИВОДНЫХ МЕХАНИЗМОВ

В работе проводится анализ устойчивости приводных асинхронных двигателей механизмов собственных нужд тепловой электростанции. При расчете учитываются рабочие (напорные) характеристики насосов и тягодутьевых машин, а также характеристики трубопроводных сетей, необходимые для определения моментно-скоростных характеристик механизмов. Полученная методика расчета была интегрирована в программное обеспечение «КАТРАН», где расчет переходных процессов проводится на основе метода последовательных интервалов с учетом уточненной аналитической зависимости момента от скорости рабочего механизма. Моделирование аварийных режимов позволяет определить успешность самозапуска генераторов и двигателей собственных нужд электростанции. На основе смоделированных аварийных режимов выявлены сенсорные элементы в схеме объекта исследования на основе оценки устойчивости генераторов и двигателей собственных нужд. Разработанная методика может быть использована для более точного выбора параметров срабатывания релейной и технологической защит в системах собственных нужд тепловых электростанций для более надежной работы основного и вспомогательного технологического оборудования.

Ключевые слова: собственные нужды, питательные насосы, рабочие характеристики, характеристика трубопроводной сети, моментно-скоростные характеристики, динамическая устойчивость, самозапуск двигателей, сенсорность.

ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение стабильной работы электроустановок собственных нужд (СН) электростанции является приоритетной задачей поддержания электроснабжения основных приемников электрической энергии как самой электростанции (котлы, турбины, генераторы), так и цехового оборудования промышленного предприятия. Так как механизмы СН заводских электростанций относятся к приемникам I категории по надежности электроснабжения, то следует уделить внимание быстрому восстановлению работы этих приемников в послеаварийном режиме, а также выявить места с наихудшими показателями устойчивости двигателей СН. Это позволит выявить участки схемы, повреждение которых в наибольшей степени затрагивает технологическое оборудование. Кроме того, анализ кривых основных параметров асинхронных двигателей от времени позволит выполнить оценку эффективности уточненной методики по сравнению с упрощенными методами расчета устойчивости. Поэтому правильный выбор уставок и выдержек времени электрических защит и согласование с уставками и выдержками времени технологических защит позволяет обеспечить итоговую успешность самозапуска.

Исследованию устойчивости механизмов СН тепловых электростанций уделяется большое внимание. Для оценки успешности самозапуска механизмов СН применяются различные методы расчета, основанные на решении системы дифференциальных уравнений, описывающих работу ЭД, питающихся от общих шин. В [1] рассматриваются следующие методы расчета:

1. *Метод Донецкого политехнического института.* Анализ группового выбега электродвигателей (ЭД) ведется по дифференциальным уравнениям. Расчет

процесса после восстановления питания СН ведется по алгебраическим уравнениям и дифференциальным уравнениям движения роторов ЭД.

2. *Упрощенный метод Союзтехэнерго.* Расчет самозапуска основан на решении уравнений движения роторов ЭД СН методом последовательных интервалов. Основные допущения метода: выбег ЭД рассматривается как индивидуальный, моменты сопротивления механизмов СН моделируются степенными полиномами, вращающий момент и ток ЭД определяются по приближенным обобщенным аналитическим выражениям, не учитывается активное сопротивление ЭД.

3. *Упрощенный расчет режима группового выбега электродвигателей методом последовательных интервалов* [2]. Расчет заключается в определении групповой эквивалентной скорости вращения ЭД на основе механической постоянной времени каждого агрегата. После чего находится фиктивное время индивидуального выбега каждого ЭД до эквивалентной частоты вращения. Рассчитывается полное эквивалентное время индивидуального выбега каждого ЭД. Вычисляется частота вращения каждого ЭД к концу перерыва питания.

В работе [3] проводится анализ устойчивости двигателей СН тепловой электростанции на основе полученных в результате аппроксимации моментно-скоростных характеристик. Основным допущением метода является использование степенных зависимостей момента от скорости при расчете выбега механизма при открытом обратном клапане.

Для выявления слабых мест в системе электроснабжения потребителей в [4] вводится понятие «сенсорность», т.е. степень влияния возмущения на электроустановку. Это позволяет выявить наиболее неустойчивые элементы схемы, найти способ повысить их надежность работы для более стабильной работы системы.

В данной работе предлагается анализ устойчивости двигателей СН центральной электростанции (ЦЭС) ОАО «ММК» на основе уточненной методики расчета моментно-скоростных характеристик.

РАСЧЕТ РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК МЕХАНИЗМОВ СОБСТВЕННЫХ НУЖД

Для построения моментно-скоростных характеристик механизмов СН необходимо рассчитать рабочие характеристики насосов и тягодутьевых механизмов по методике, приведенной в [5]. При расчете учитываются следующие составляющие потерь напора: потери на удар и вихреобразование и потери на трение, описанные в [6]. Полученные значения потерь вычитаются из линейной рабочей характеристики механизма, в результате чего получается рабочая характеристика механизма с учетом потерь, аналогичная паспортной характеристике. В процессе расчета большое влияние оказывают конструктивные параметры центробежных машин, которые могут отличаться в связи с различным технологическим назначением производства электроэнергии и тепла.

Производительность центробежного механизма при заданной частоте вращения его рабочего колеса определяется не только его главной $H - Q$ характеристикой, но и свойствами трубопроводной сети, на которую он работает. Все основные центробежные насосы и вентиляторы, установленные на станции, работают на сети с некоторым противодавлением, за исключением дымососов, в трубопроводной сети которых присутствует естественная тяга, способствующая выдуванию продуктов сгорания в атмосферу. На основе расчета, приведенного в [5], определяется характеристика трубопроводной сети насосов, имеющая статическую и динамическую составляющие напора. Вследствие незначительной разницы скоростей движения жидкости в точках измерения давления в резервуарах, динамической составляющей чаще всего пренебрегают.

$$H_c = H_r + \frac{p_2 - p_1}{\rho g} + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} + \Delta H, \quad (1)$$

где H_r – разность геодезических высот между уровнями или точками измерения давления в резервуарах, м; p_1, p_2 – давление в резервуаре на стороне всасывания и давление в резервуаре на стороне нагнетания соответственно, Па; v_1, v_2 – скорости движения жидкости в точках измерения давления в резервуарах, м/с; ρ – плотность жидкости, кг/м³; g – ускорение свободного падения, м/с²; ΔH – потери напора в подводящем и напорном трубопроводах, м.

Для тягодутьевых машин определение характеристики сети рассмотрено в [7]. Отличительной особенностью расчета является наличие естественной тяги, что, таким образом, приводит к отсутствию срыва подачи механизма, т.е. отсутствию точек пересечения рабочей характеристики и характеристики трубопроводной сети.

$$H_{тр} = aQ^2 - H_t, \quad (2)$$

где a – коэффициент трубопровода; H_t – естественная тяга, м.

Таким образом, в процессе расчета рабочих характеристик механизмов собственных нужд учитываются как конструктивные параметры механизмов, так и характеристика трубопроводной сети, что позволяет более точно отразить режим работы центробежной машины.

РАСЧЕТ МОМЕНТНО-СКОРОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МЕХАНИЗМОВ

На основе полученных рабочих характеристик центробежных машин и характеристик трубопроводной сети рассчитываются моментно-скоростные характеристики механизмов СН по методике, приведенной в [5]. На основе методики получено семейство моментно-скоростных характеристик питательных насосов ЦЭС ОАО «ММК», представленное на рис. 1, из которого видно, что составляющими суммарного момента (кривая 5) являются: полезный момент (кривая 1), затрачиваемый на полезную работу насоса, момент на гидравлические потери (кривая 2) и момент на потери на дисковое трение (кривая 3), значения которого малы и достигают 0,013 о.е. При срыве подачи рассматриваются два возможных режима работы насоса: при открытом и закрытом обратном клапане. В случае, когда обратный клапан неисправен (открыт), насос переходит в режим противотока (кривая 4), где расчет проводится на основе универсальных кривых обратимых гидромашин, представленных в [8]. Если обратный клапан закрыт, то моментно-скоростная характеристика рассчитывается по квадратичной зависимости. Часто в приближенных расчетах применяется кубическая зависимость момента от скорости (кривая 6), которая учитывает противодействие со стороны трубопроводной сети. При номинальной скорости вращения значения относительных моментов, полученных по уточненной и упрощенной методикам, отличаются на 17%.

Основным отличием уточненной методики расчета моментно-скоростных характеристик от упрощенных расчетов является применение конструктивных параметров центробежной машины, а также точное действительное значение противодействия со стороны трубопроводной сети.

Полученная уточненная методика может применяться при расчетах переходных процессов методом численного интегрирования.

РАСЧЕТ ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

Исследование устойчивости сложных электрических систем в большинстве основаны на расчете переходных процессов путем численного интегрирования дифференциальных уравнений системы при различных исходных уравнениях. Расчет производится для оценки сохранения устойчивости при различных возмущениях, возникающих в сети.

Так как в качестве приводных механизмов СН на станции используются асинхронные двигатели, то рассмотрим расчет переходных режимов данных машин. Такие механизмы, как питательные, конденсатные, сетевые и циркуляционные насосы работают на систему с противодействием, что соответствует кубической зависимости момента от скорости, а тягодутьевые машины – с вентиляторным моментом сопротивления на

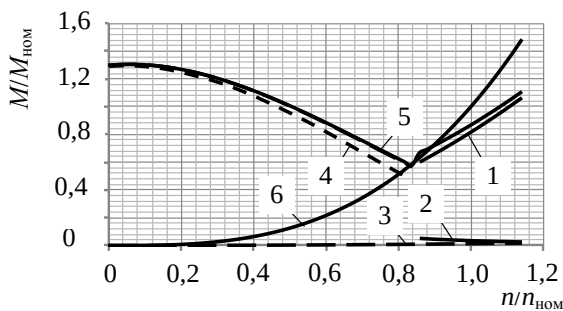


Рис. 1. Моментно-скоростные характеристики питательного насоса ПЭН-1

валу (квадратичная зависимость). Данные упрощения не позволяют учесть как конструктивные параметры машины, так и характеристику трубопроводной сети, что приводит к достаточно большой погрешности определения времени выбега механизма.

Кроме того, расчет переходных процессов в асинхронных двигателях в основном производится только с учетом изменения скольжения путем решения уравнения движения ротора. При этом не учитывается характер изменения тока статора, который при незначительной удаленности асинхронного двигателя от точки короткого замыкания может отрицательно влиять на динамическую устойчивость двигателя. Поэтому в работе [9] предлагается «для анализа переходных режимов асинхронных двигателей использовать способ их представления, основанный на использовании видоизмененных уравнений Парка-Горева».

Значение момента M_{Σ} определяется на основе уточненной методики, полученной ранее и приведенной в [5] по формуле:

$$M_{\Sigma} = M_{\Pi} + M_{д.т} + M_{г.п.}, \quad (3)$$

где M_{Π} - полезный момент, о.е.; $M_{д.т}$ - момент на дисковое трение, о.е.; $M_{г.п.}$ - момент на гидравлические потери, о.е.

При расчете механической мощности двигателя по (3) подставляется полученное значение суммарного момента:

$$P_{\text{мех}} = M_{\Sigma} \omega, \quad (4)$$

где ω - угловая скорость вращения ротора двигателя.

Таким образом, в расчете учитывается влияние подпитки двигателем точки КЗ, которая создает дополнительный тормозной момент, что приводит к более быстрому опрокидыванию двигателя, а также влияет на его динамическую устойчивость. Кроме того, в расчет задается статический момент, полученный на основе разработанной методики, где учитываются как конструктивные параметры механизма, так и характеристика трубопроводной сети. Это позволяет более корректно произвести оценку самозапуска двигателей, выбрать уставку срабатывания РЗиА.

АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ МЕХАНИЗМОВ СОБСТВЕННЫХ НУЖД ПРИ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЯХ В СЕТИ

Полученная в [5] уточненная методика расчета моментно-скоростных характеристик приводов насосов и тягудутьевых механизмов позволяет произвести анализ

устойчивости основных механизмов собственных нужд электростанции за счет внедрения алгоритма расчета в программный комплекс «КАТРАН».

Одним из основных источников внешних возмущений на нормальную работу приводных двигателей является короткое замыкание (КЗ) в системе электропитания, которое характеризуется как степенью удаленности от потребителей, так и длительностью действия. Например, чем больше длительность действия КЗ, тем тяжелее будут условия самозапуска. Успешность самозапуска и его длительность в значительной степени зависит от продолжительности перерыва питания. С уменьшением паузы электродвигатели меньше тормозятся, ограничиваются токи самозапуска и повышается напряжение на шинах в момент подключения источника питания.

Что касается самозапуска электродвигателей СН, то значительного повышения надежности работы станции можно достигнуть, если при кратковременных снижениях или даже полном исчезновении напряжения на шинах СН, вызванных короткими замыканиями, не отключать электродвигатели ответственных механизмов от сети. Тогда после восстановления нормального напряжения начинается их самозапуск с промежуточной частоты вращения, до которой успели затормозиться двигатели в аварийном режиме. Вследствие больших пусковых токов в трансформаторах возникает значительное падение напряжения, групповой самозапуск происходит при пониженных напряжениях на зажимах электродвигателей и может быть успешным или неуспешным. Успешным самозапуском следует считать такой, при котором остаточное напряжение на шинах СН обеспечивает ускорение электродвигателей до номинальной частоты вращения за время, допустимое по условиям нагрева двигателей и сохранения устойчивости технологического режима станции.

Чтобы определить степень влияния возмущения на электроустановки, необходимо знать сенсорность элементов схемы. Элементы, которые подверглись наибольшему возмущению, называются сенсорами. Степень их возмущения в целом влияет на общее состояние системы. Как правило, сенсорами являются электропотребители, находящиеся ближе остальных к источнику возмущения. Также на максимальное отклонение от нормального режима влияют качания генераторов. При проворотах ротора генераторов наблюдается утяжеление режима, приводящее к еще большему возмущению сенсоров.

Для выявления сенсорности элементов схемы электростанции выполнена серия расчетов электромеханических переходных процессов механизмов СН в схеме ЦЭС ОАО «ММК» (рис. 2). Так как все потребителями являются асинхронные двигатели, то введем понятие σ - степень отклонения параметров режима, выраженная в средневзвешенном значении максимального изменения скольжения:

$$\sigma = \frac{P_1 \Delta s_1 + P_2 \Delta s_2 + \dots + P_n \Delta s_n}{P_1 + P_2 + \dots + P_n}, \quad (5)$$

где P - мощность асинхронного двигателя; $\Delta s = s_{\text{max}} - s_{\text{min}}$ - разность максимального и минимального скольжений на исследуемом интервале времени.

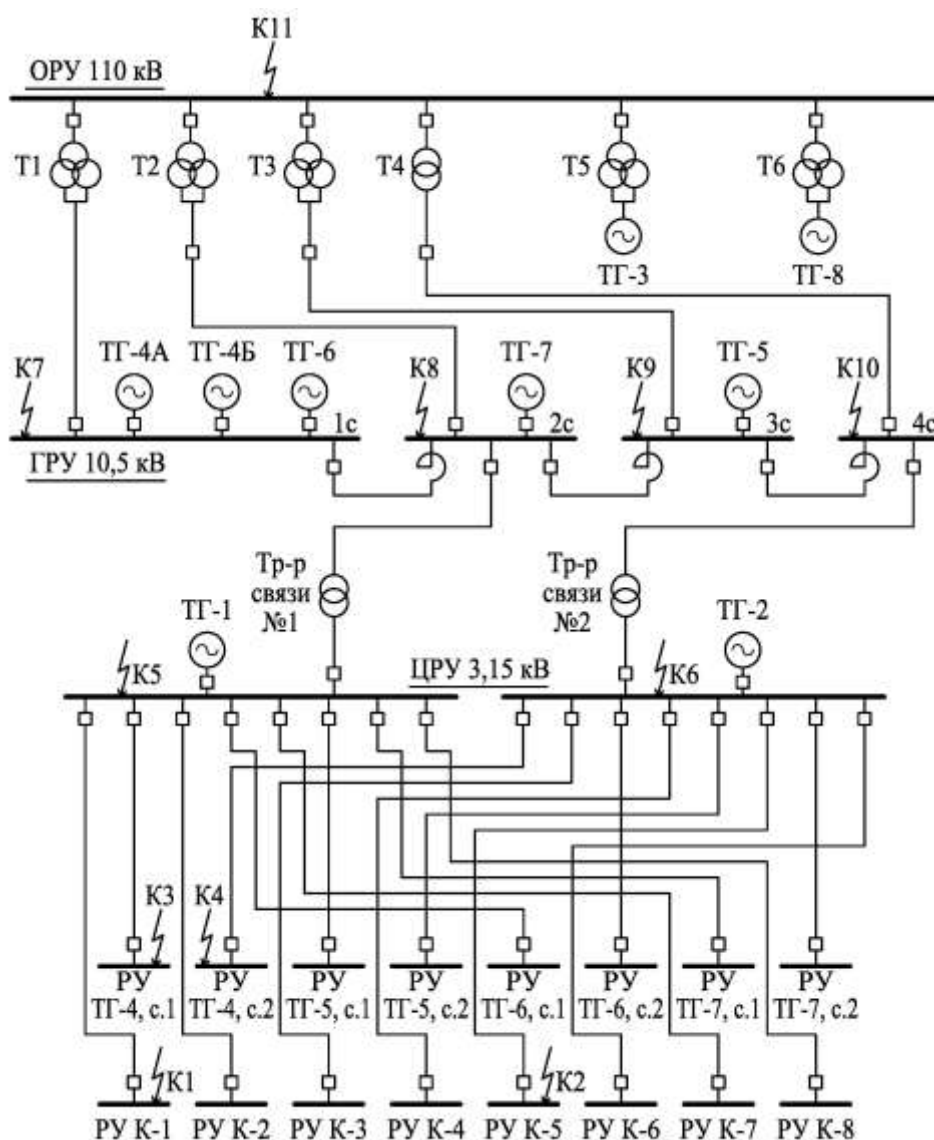


Рис. 2. Моделирование КЗ на секциях шин распределительных устройств ЦЭС

Полученные результаты расчетов приведены в табл. 1.

Как видно из полученных результатов, наибольшее отклонение скольжения асинхронных двигателей возникает при КЗ на ОРУ 110 кВ. При этом степень влияния возмущения не зависит от места КЗ, т.к. потребители оказываются равноудаленными во всех четырех случаях от точки КЗ. Другая картина складывается при моделировании КЗ на секциях шин ГРУ 10,5 кВ. При КЗ на второй и четвертой секциях значение σ получается больше, чем при КЗ на первой и третьей секциях шин. Это объясняется тем, что при секционировании шин подключены реакторы, которые уменьшают токи КЗ, влияющие на скорость торможения ротора асинхронного двигателя. Потребители СН питаются через трансформаторы связи со второй и четвертой секций шин ГРУ 10,5 кВ, что и обусловлено их чувствительностью на КЗ в схеме.

Небольшие возмущения наблюдаются при моделировании КЗ на сборках распределительных устройств котлов и турбогенераторов (точки КЗ К1-К4). Это обусловлено удаленностью КЗ по отношению к потребителям, не запитанным с РУ, на котором произошло КЗ.

При моделировании КЗ в точках К7 и К9 степень

возмущения σ оказалась меньше, чем при КЗ в точках К8 и К10, вследствие наличия реакторов между секциями шин ГРУ.

Таблица 1
Значения влияния КЗ на потребителей СН

Точки КЗ	Значение влияния возмущения σ
К1: РУ К-1, 1 секция	0,026
К2: РУ К-5, 1 секция	0,043
К3: РУ ТГ-4, 1 секция	0,021
К4: РУ ТГ-4, 2 секция	0,0209
К5: ЦРУ 3,15 кВ, 1 секция ССШ	0,22257
К6: ЦРУ 3,15 кВ, 3 секция ССШ	0,282
К7: ГРУ 10,5 кВ, 1 секция ССШ	0,00877
К8: ГРУ 10,5 кВ, 2 секция ССШ	0,24778
К9: ГРУ 10,5 кВ, 3 секция ССШ	0,00558
К10: ГРУ 10,5 кВ, 4 секция ССШ	0,342
К11: ОРУ 110 кВ, 1 секция	0,632

На основании полученных результатов выполнен анализ устойчивости механизмов СН. Для этого произведено моделирование КЗ длительностью 2,5 с в точке К8 (рис. 3). Так, объектом исследования является питательный насос ПЭН-6, получающий питание с первой секции РУ К-5, т.к. питательные насосы выполняют главную задачу в технологическом процессе – подачу питательной воды в топку котла. Полученные зависимости скольжения и напряжения от времени приведены на рис. 4, 6.

Для сравнения полученных зависимостей также приведены характеристики (рис. 5, 7), рассчитанные по степенным зависимостям момента от скорости, позволяющим упрощенно определить статический момент сопротивления на валу. При этом, как отмечалось ранее, не учитываются конструктивные параметры механизма и характеристика трубопроводной сети [10, 11], в отличие от полученной в [5] уточненной методики расчета моментно-скоростных характеристик.

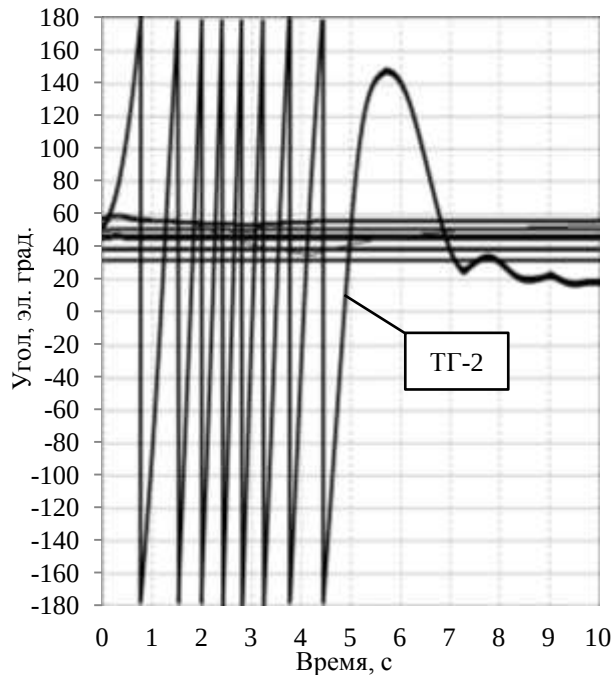


Рис. 3. Собственные углы генераторов при КЗ длительностью 2,5 с на 4-й секции ССШ ЦРУ 3,15 кВ

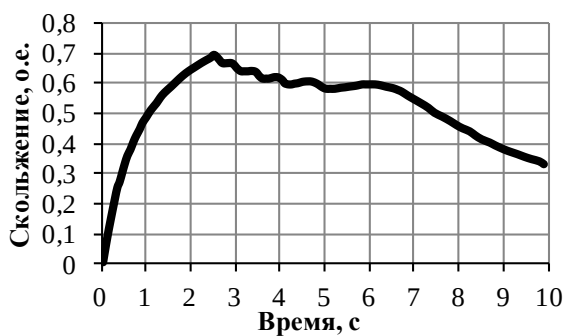


Рис. 4. Зависимость скольжения от времени АД ПЭН-6, полученная по уточненной методике

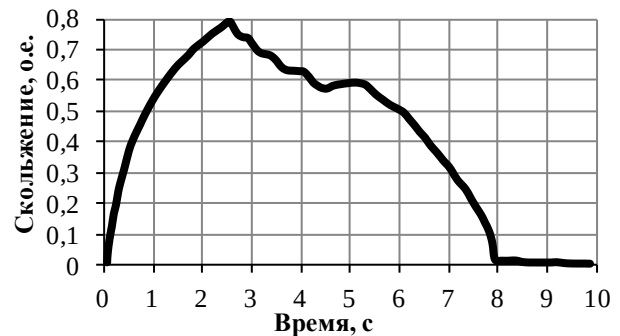


Рис. 5. Зависимость скольжения от времени АД ПЭН-6, полученная по упрощенной методике

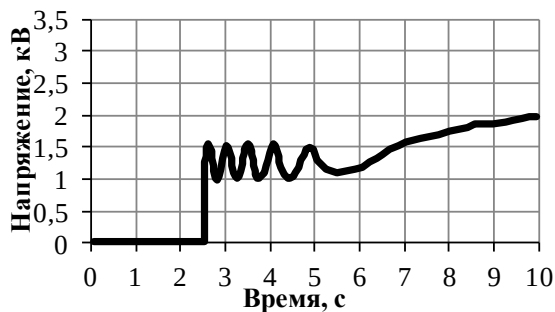


Рис. 6. Зависимость напряжения от времени АД ПЭН-6, полученная по уточненной методике

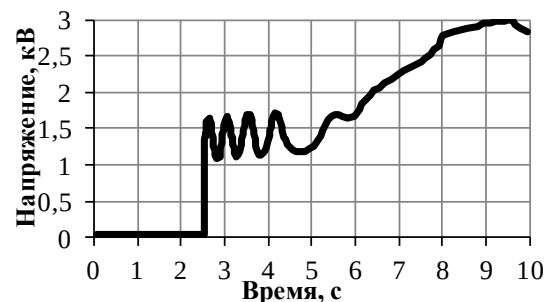


Рис. 7. Зависимость напряжения от времени АД ПЭН-6, полученная по упрощенной методике

Как видно из полученных зависимостей, время, затраченное на восстановление нормального режима работы после отключения КЗ, больше по сравнению с зависимостями, полученными по упрощенной методике. Это обусловлено тем, что при расчете суммарного момента учитываются потери, а также значение противодействия со стороны трубопроводной сети. Отличие максимальных отклонений скольжения, полученных при расчете по разным методикам, составляет 1,3%.

Так как в рамках задачи работы СН исследуется устойчивость основных механизмов СН электростанции, то выполнен расчет электромеханических переходных процессов с учетом этих механизмов. В качестве параметров оценки успешности самозапуска двигателей СН принято время самозапуска и максимальный заброс скольжения приводных двигателей циркуляционного насоса (ЦН-8А), сетевого насоса (СН-8), конденсатного насоса (КН-1Б), дымососа (ДС-5А) и дутьевого вентилятора (ДВ-5А). Результаты расчетов приведены в табл. 2.

В результате на время самозапуска двигателей СН оказывает влияние качания генераторов (см. рис. 3), а успешность самозапуска зависит от динамической устойчивости генераторов. Кроме того, на длительность самозапуска также влияет значение начального статического момента. Малый заброс скольжения двигателя КН-1Б обусловлен удаленностью точки КЗ от секции шин РУ К-1 380В, от которой запитан приводной двигатель конденсатного насоса.

АНАЛИЗ РЕЖИМА РАБОТЫ НАСОСА ПРИ НЕИСПРАВНОМ ОБРАТНОМ КЛАПАНЕ

Рассмотрим режим работы питательного насоса ПЭН-6 при открытом обратном клапане. При отключении двигателя от сети скорость вращения вала рабочего колеса насоса начнет снижаться, что приведет к уменьшению подачи, создаваемой напором. При дальнейшем снижении скорости вращения вала насос не будет создавать потока (отсутствие точек пересечения рабочей характеристики насоса с характеристикой сети), но при

этом вращение вала остается таким же, как при насосном режиме. Такой режим принято называть режимом противотока. Для питательных насосов данный режим аналогичен, когда давление в барабане котла больше, чем давление, создаваемое насосом, и вода, выталкиваясь из барабана, стремится раскрутить рабочее колесо насоса в обратную сторону, создавая противодействующий момент. Относительный момент в режиме противотока получен на основе универсальных относительных характеристик обратимых гидромашин.

Таким образом, при расчете переходных процессов при открытом обратном клапане насоса учитывается его работа в режиме противотока, позволяющая оценить успешность самозапуска асинхронного двигателя. Для этого было проведено моделирование КЗ на 1-й секции РУ К-5 3,15 кВ в программном комплексе «КАТРАН», после чего сняты зависимости скорости и тока от времени (см. рис. 7, 9). Также приведены для сравнения зависимости при исправном (закрытом) обратном клапане (рис. 8, 10). Стоит отметить, что в этом случае при срыве подачи противодействие со стороны трубопроводной сети отсутствует, и расчет ведется по квадратичной зависимости момента от скорости.

По полученным зависимостям видно, что в момент времени 0,3 с произошел срыв подачи, и скорость вращения рабочего колеса насоса за счет давления в барабане котла сначала достигла нуля, а затем стала отрицательной до некоторого максимального значения, обусловленного давлением со стороны трубопроводной сети. При закрытом обратном клапане скорость вращения также уменьшилась, но до значения 650 об/мин, из-за отсутствия противодействия со стороны сети.

При отключении КЗ в момент времени 2,5 с наблюдается самозапуск асинхронного двигателя, который является успешным. Максимальный ток самозапуска по отношению к номинальному составляет 3,67, что меньше номинальной кратности пускового тока двигателя, равного 5,3. Время самозапуска при открытом обратном клапане равно 2,8 с, что на 18% больше, чем при закрытом обратном клапане.

Таблица 2

Значения влияния КЗ на потребителей СН

Механизм СН	Время самозапуска, с	Заброс скольжения
ЦН-8А	6,2	0,56
СН-8	6,3	0,54
КН-1Б	6,9	0,048
ДС-5А	6,1	0,56
ДВ-5А	7,0	0,3

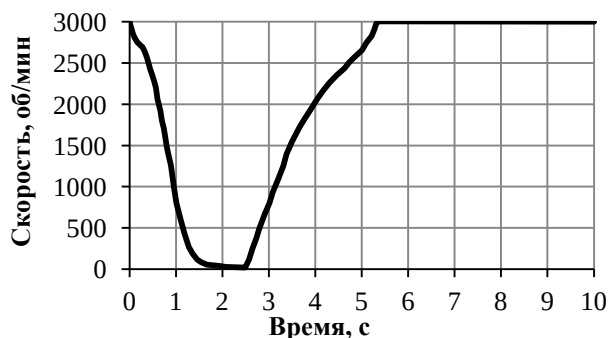


Рис. 8. Зависимость скорости вращения от времени двигателя ПЭН-6 при открытом обратном клапане

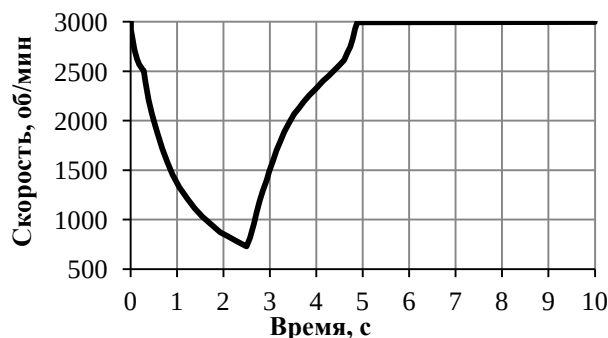


Рис. 9. Зависимость скорости вращения от времени двигателя ПЭН-6 при закрытом обратном клапане

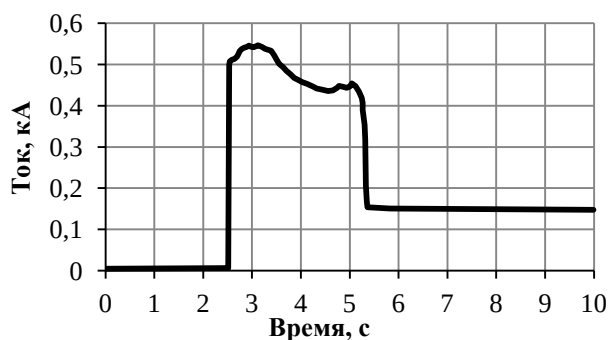


Рис. 10. Зависимость тока от времени двигателя ПЭН-6 при открытом обратном клапане

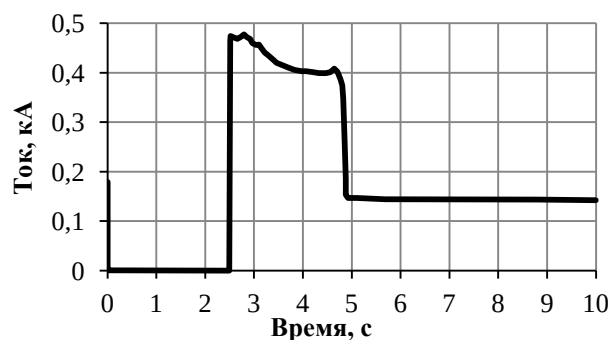


Рис. 11. Зависимость тока от времени двигателя ПЭН-6 при закрытом обратном клапане

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе ранее полученной методики расчета моментно-скоростной характеристики проведен анализ устойчивости механизмов СН теплофикационной электростанции, получены зависимости скольжения от времени, по которым можно определить время выбега асинхронного двигателя и судить об успешности самозапуска механизма. Использование уточненных уравнений позволяет снизить погрешность определения времени выбега приводного механизма. Разработанная методика была интегрирована в программное обеспечение «КАТРАН», где был проведен анализ успешности самозапуска двигателей СН при аварийных ситуациях в сети, выявлены сенсорные элементы схемы, а также исследован процесс выбега асинхронного двигателя при открытом и закрытом обратном клапане насоса.

В результате выявления сенсорных элементов схемы установлено, что механизмы принимают наибольшее возмущение при КЗ на секциях шин 110 кВ (значения степени отклонения параметров режима σ достигает максимального значения, равного 0,632), при этом нарушается динамическая устойчивость генератора ТГ-2. Результаты расчетов позволяют более точно отстроить уставки релейной и технологической защит, установленных на станции, для более надежной работы основного и вспомогательного технологического оборудования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Георгиади В.Х., Курбаналиев У.К., Соколов В.Л. Анализ методов расчета режимов самозапуска электродвигателей собственных нужд электростанции // Электрические станции. 1987. №5. С.31-34.
2. Георгиади В.Х. Упрощенный расчет режима группового выбега электродвигателей // Промышленная энергетика.

1985. №5. С.42-45.

3. Малафеев А.В., Долганова А.С., Газизова О.В. Анализ устойчивости двигателей собственных нужд электростанций ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» // Главный энергетик. 2012. №10. С.40-46.
4. Анализ неоднородностей электроэнергетических систем / О.Н. Войтов, Н.И. Воропай, А.З. Гамм и др. Новосибирск: Наука. Сибирская издательская фирма РАН, 1999. 256 с.: ил.
5. Малафеев А.В., Трemasов М.А. Разработка уточненной методики расчета моментно-скоростной характеристики питательного насоса тепловой электростанции в задаче анализа устойчивости собственных нужд // Электротехнические системы и комплексы. 2014. №3. С.58-63.
6. Pfleiderer C. Strömungsmaschinen. Springer 1952, p. 249.
7. Малафеев А.В., Трemasов М.А. Аналитическое определение моментно-скоростных характеристик дутьевого вентилятора теплофикационной электростанции // Энергетики и металлургии настоящему и будущему России: материалы 17-й Всерос. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и специалистов. Магнитогорск, 2016. С. 144-147.
8. Аршеневский Н.Н. Обратимые гидромашины гидроаккумулирующих электростанций. М.: Энергия, 1977. 240 с.: ил.
9. Малафеев А.В., Буланова О.В., Ротанова Ю.Н. Способ представления асинхронных двигателей при расчете переходных режимов короткого замыкания с целью анализа влияния тока подпитки на динамическую устойчивость // Вести высших учебных заведений Черноземья. 2008. №13. С.43-45.
10. Юлдашева А.И., Малафеев А.В. Учет показателей надежности при планировании режима промышленной системы электроснабжения с собственными электростанциями // Электротехнические системы и комплексы. 2015. № 3 (28). С. 36-40.
11. Малафеев А.В., Буланова О.В., Ахметханов А.М. Исследование статической устойчивости синхронных двигателей в условиях системы электроснабжения ОАО «ММК» при параллельной работе с энергосистемой // Электротехнические системы и комплексы. 2010. № 1. С. 32-35.

Поступила в редакцию 15 июня 2016 г.

INFORMATION IN ENGLISH

ANALYSIS OF AUXILIARY MOTOR STABILITY AT HEAT POWER PLANTS TAKING INTO ACCOUNT CHARACTERISTICS OF DRIVE MECHANISMS

Aleksey V. Malafeev

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

Maksim A. Tremasov

Engineer, Electrical Engineering Department, "Magnitogorsk Giprometz" JSC, Magnitogorsk, Russia.

The paper analyzes the stability of driving mechanisms of auxiliary induction motors of thermal power plant. The calculation takes into account operating (pressure) characteristics of pumps and draft equipment, as well as the characteristics of the pipeline networks needed to determine the mechanisms of torque-speed characteristics. The resulting method of calculation was integrated into the software "KATRAN", where the calculation of transients is based on the method of successive intervals taking into account the adjusted analysis depending on the time of the machine operating speed. Modeling emergency operation makes it possible to determine the success of the self-start of auxiliary generators and motors to meet the needs of the plant. On the basis of the simulated emergency operation we found sensory elements in the scheme assessing the stability of auxiliary generators and motors. The developed method can be used to select the parameters of operation of relay protection and technological systems of auxiliary needs of thermal power for more reliable operation of the main and auxiliary process equipment.

Keywords: Station auxiliaries, feed pumps, operating characteristics, characteristics of the pipe network, torque-speed characteristics, dynamic stability, self-starting motor, sensory.

REFERENCES

- Georgiadi V.Kh., Kurbangaliev U.K., Sokolov V.L. Analysis of Methods of Calculation of Self-starting Modes for Motors of Auxiliary Power Needs. *Elektricheskie stantsii* [Electric power plants], 1987, no. 5, pp. 31-34. (In Russian)
- Georgiadi V.Kh. Simplified Calculation of Motor Rundown Mode. *Promyshlennaya energetika* [Industrial power engineering], 1985, no 5, pp. 42-45. (In Russian)
- Malafeev A.V., Dolganova A.S., Gazizova O.V. Stability Analysis of Motors of Auxiliary Power Plants at JSC "MMK". *Glavnyy energetik* [Chief Power Engineer], 2012, no. 10, pp. 40-46. (In Russian)
- Voytov O.N., Voropay N.I., Gamm A.Z. et al. Analysis of Irregularities in Electric Power Systems. Novosibirsk, Nauka. Sibirskaya izdatelskaya firma RAN Publ., 1999. 256 p.
- Malafeev A.V., Tremasov M.A. Development of Updated Methodology for Calculating Torque-Speed Characteristics of Thermal Power Plant Feed Pump in The Problem of Auxiliary Power Stability Analysis. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2014, no. 3, pp. 58-63. (In Russian)
- Pfleiderer C. *Strömungsmaschinen*. Springer 1952, p. 249.
- Malafeev A.V., Tremasov M.A. Analytical Determination of Torque-speed Characteristics of Blower Fan of Thermal Power Plant. *Energetiki i metallurgi nastoyashchemu i budushchemu Rossii: materialy 17-y Vseros. nauch.-prakt. konf. studentov, aspirantov i spetsialistov* [Proc. of 17th scientific conference "Power Engineers and Metallurgists to the Present and the Future of Russia"], 2016, pp. 144-147. (In Russian)
- Arshenevskiy N.N. *Obratimye gidromashiny gidroakkumuliruyushchikh elektrostantsiy* [Reversible Hydraulic Pump Storage Power Plants]. Moscow, Energiya Publ., 1977. 240 p.
- Malafeev A.V., Bulanova O.V., Rotanova Yu.N. Method of Presentation of Asynchronous Motors in Calculation of Transient Modes of Short Circuit in Order to Analyze Current Make-up Effect on Dynamic Stability. *Vesti vysshikh uchebnykh zavedeniy Chernozemya* [News of Black Earth Belt Higher Education Institutions], 2008, no.13, pp.43-45. (In Russian)
- Yuldasheva A.I., Malafeev A.V. Accounting the reliability index at planning the mode of industrial power supply system with own electric power stations. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2015, no. 3, pp. 36-40. (In Russian)
- Malafeev A.V., Bulanova O.V., Akhmetkhanov A.M. Research of static stability of synchronous motor in electric power supply system of MMK OJSC. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2010, no. 1, pp. 32-35. (In Russian)

Малафеев А.В., Трemasов М.А. Анализ устойчивости двигателей собственных нужд тепловых электростанций с учетом характеристик приводных механизмов // *Электротехнические системы и комплексы*. 2016. №4(33). С.6-13. doi: 10.18503/2311-8318-2016-4(33)-6-13

Malafeev A.V., Tremasov M.A. Analysis of Auxiliary Motor Stability at Heat Power Plants Taking Into Account Characteristics of Drive Mechanisms. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2016, no.4(33), pp.6-13. (In Russian). doi: 10.18503/2311-8318-2016-4(33)-6-13

Мугалимов Р.Г.¹, Мугалимова А.Р.²¹ООО «МГТУ – Энергосбережение +»²ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И.Носова»

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА КЛАССА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ И ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ С ИХ ПРИМЕНЕНИЕМ

Предметом исследования является энергоэффективность электротехнических комплексов, содержащих асинхронные двигатели. Обсуждены пути и средства повышения коэффициента полезного действия электротехнических комплексов. Дано обоснование и предложены зависимости для количественной оценки коэффициента полезного действия электротехнического комплекса в функции от коэффициентов полезного действия, мощности, загрузки асинхронного двигателя. Рассмотрены различные варианты энергоэффективных традиционных асинхронных двигателей с классом энергоэффективности IE1, IE2 и асинхронных двигателей с индивидуальной компенсацией реактивной мощности. Исследовано их влияние на коэффициент полезного действия электротехнического комплекса. На примере электропривода нефтяной качалки показано, что коэффициент полезного действия электротехнического комплекса с применением асинхронного двигателя с индивидуальной компенсацией реактивной мощности, обладающего коэффициентом мощности, равным единице, и классом энергоэффективности IE1, эквивалентен коэффициенту полезного действия электротехнического комплекса с применением традиционного асинхронного двигателя, обладающего классом энергоэффективности IE2. Приведены результаты расчетов коэффициентов полезного действия вариантов электроприводов. Полученные зависимости и результаты анализа рекомендуются производителям и потребителям асинхронных двигателей.

Ключевые слова: электротехнический комплекс, асинхронный двигатель, коэффициент полезного действия, коэффициент мощности, энергоэффективность, уравнение, расчет, анализ.

ВВЕДЕНИЕ

Повышение энергоэффективности электротехнических комплексов и систем является приоритетной хозяйственно-экономической задачей. Решению этой задачи уделяется серьезное внимание и вкладываются значительные ресурсы государством, производителями и потребителями электротехнического оборудования.

В настоящее время практически на всех предприятиях реального сектора экономики для вращения технологических машин и механизмов применяются трехфазные асинхронные электрические двигатели отечественных и зарубежных производителей. В Российской Федерации парк традиционных асинхронных двигателей (ТАД) по экспертным оценкам равен 250–280 млн единиц, а их установленная мощность превышает 2,8–3,2 млрд. кВт. Ежегодно электроприводы на основе АД потребляют не менее 60% вырабатываемой электрической энергии. Для российской промышленности это составляет около 0,55–0,65 триллионов кВт·ч, при этом потери энергии составляют от 14 до 19%, то есть не менее 77–104 млрд кВт·ч.

Традиционные асинхронные двигатели обладают известными достоинствами, такими как простота конструкции, высокая надежность, сравнительно невысокие эксплуатационные расходы. Вместе с тем электроприводы на основе ТАД имеют два существенных недостатка [1, 2]:

1) невозможность плавного пуска и регулирования частоты вращения ротора при питании от промышленной электросети, т.е. без применения современной силовой электроники, например преобразователей частоты (ПЧ), тиристорных регуляторов напряжения (ТРН) и устройств плавного пуска;

2) низкая энергоэффективность, оцениваемая клас-

сом IE1 по Международному стандарту IEC 60034-30.

Первый недостаток ТАД в настоящее время успешно преодолевается применением современной силовой электроники – ПЧ, ТРН и устройств плавного пуска.

Второй недостаток еще не преодолен. Он обусловлен сравнительно невысокими значениями номинальных электрического КПД (η_n), определяемого величинами 75–90% и коэффициента мощности ($\cos\varphi_n$), находящегося в диапазоне 0,7–0,92. Энергетический КПД ТАД (η_{Σ}), равный произведению вышеуказанных коэффициентов $\eta_{\Sigma} = \eta_n \cdot \cos\varphi_n$, не превышает 52–83%.

В электротехнических комплексах (ЭТК), содержащих ТАД низкого класса энергоэффективности IE1, теряется от 17 до 48% потребляемой электрической энергии [3–8]. Собственно в электродвигателях теряется от 10 до 25 % энергии. Потерянная энергия в механическую энергию электропривода не преобразуется, а превращается в тепловую энергию и рассеивается в окружающей среде. Это снижает КПД ЭТК, а следовательно, конкурентную способность продукции товаропроизводителей из-за повышения себестоимости производства [7–12].

На практике известны и применяются три достаточно эффективных пути снижения потерь электрической энергии в ЭТК и системах:

1. Повышение коэффициента мощности ЭТК путем компенсации электрической реактивной мощности (тока) индуктивного характера реактивной мощностью (током), емкостного характера – применения компенсаторов реактивной мощности (КРМ).

2. Создание электрооборудования, в том числе асинхронных двигателей, с повышенным электрическим КПД, имеющих высокий класс энергоэффективности IE2, IE3, при сохранении на прежнем уровне или небольшого снижения коэффициента мощности.

3. Повышение коэффициента мощности до $\cos\varphi = 1$ конкретного электропотребителя, в том числе АД, при

одновременном повышении или сохранении на прежнем уровне его электрического КПД.

Для повышения энергоэффективности ЭТК на практике имеет место применение комбинаций из названных путей.

Первый путь достигается применением дополнительного электрооборудования – специальных компенсаторов реактивной мощности, генерирующих реактивную мощность емкостного характера. КРМ подключаются параллельно к каждому электропотребителю или к их группе, потребляющих из электросети реактивную мощность индуктивного характера. Этот путь достаточно ресурсозатратный. Кроме того, технико-экономический эффект от подключения КРМ достигается на участке электросети от узла подключения до узла генерации энергии. Эффект хорошо проявляется в высоковольтных (10 кВ и выше) и менее эффективно в низковольтных (0,4–1,0 кВ) ЭТК. Следует отметить, что доля последних в электрохозяйстве предприятий Российской Федерации составляет не менее 70–80%.

Второй путь – повышение электрического КПД электропотребителя, например создание АД высокого класса энергоэффективности (IE2, IE3, Premium), достигается совершенствованием его электромагнитной системы путем увеличения массы и повышения качества применяемых активных материалов (электротехнической стали, меди, алюминия, электроизоляционных материалов), а также снижением механических потерь при применении энергоэффективных подшипников. Этот путь преимущественно используется европейскими электротехническими фирмами. Он достаточно эффективный, позволяет повысить КПД электродвигателей на 2–4,5 %. Однако это ведет к некоторому снижению $\cos\varphi$ и значительному удорожанию АД, так как масса электротехнической стали увеличивается до 30%, меди до 25%, алюминия до 15%.

Третий путь реализуется преимущественно за счет компенсации реактивной мощности индуктивного характера непосредственно в электромагнитной системе электропотребителя, например в асинхронном двигателе с индивидуальной компенсацией реактивной мощности [1, 2, 13, 14]. Этот путь позволяет уменьшить потери активной мощности от реактивного тока как непосредственно в электропотребителе, так и во всей силовой электрической цепи ЭТК, а именно от узла подключения АД до узла генерации электрической энергии. Теоретические, экспериментальные исследования и опыт применения энергоэффективных индивидуально компенсированных асинхронных двигателей (ЭАД) в реальных электротехнических комплексах показали хорошую энергоэффективность при незначительных ресурсовложениях.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В связи с изложенным, возникает проблема по научно-обоснованной количественной оценке энергоэффективности ЭТК, содержащих АД с различным классом энергоэффективности.

В работе поставлены две главные задачи:

– получить зависимость КПД электротехнического комплекса, содержащего асинхронный двигатель, в функции от главных технических параметров послед-

него и параметров силовой цепи ЭТК;

– исследовать и сравнить энергоэффективность электротехнических комплексов, содержащих различные варианты традиционных асинхронных двигателей с классом энергоэффективности IE1, IE2 и асинхронных двигателей с индивидуальной компенсацией реактивной мощности класса IE1.

Первая задача решается в следующей постановке. Получить зависимость величины КПД электротехнического комплекса ($\eta_{\text{ЭТК}}$), содержащего АД, в функции от его КПД (η), коэффициента мощности ($\cos\varphi$), коэффициента загрузки (k_3) и параметров силовой цепи ЭТК, применимую в инженерной практике.

Эта задача решается при следующих исходных данных, условиях, допущениях и ограничениях:

– задаются номинальные данные АД: тип двигателя, мощность ($P_{2н}$), напряжение ($U_{1н}$), ток ($I_{1н}$), коэффициент полезного действия (η_n), коэффициент мощности ($\cos\varphi_n$);

– коэффициент загрузки (k_3) двигателя изменяется в диапазоне $k_3=0,25-1,25$ с шагом 0,25;

– для принятых k_3 задаются соответствующие значения η и $\cos\varphi$;

– учитываются потери активной мощности в силовой цепи ЭТК $\Delta P_{\text{сц}}$ (в силовом трансформаторе, шинно-проводах, кабельных линиях, защитно-коммутирующей и управляющей аппаратуре) уравнением вида $\Delta P_{\text{сц}} = k_{\text{сц}} \cdot P_{2н}$;

– для электроприводов, содержащих преобразователи частоты, тиристорные регуляторы напряжения и другую силовую электронику, учитываются потери активной мощности в полупроводниковых преобразователях $\Delta P_{\text{пп}}$ уравнением вида $\Delta P_{\text{пп}} = k_{\text{пп}} \cdot P_{2н}$;

– учитываются потери активной мощности в магнитной ΔP_m и механической $\Delta P_{\text{мех}}$ системах двигателя уравнениями вида: $\Delta P_m = k_m \cdot P_{2н}$; $\Delta P_{\text{мех}} = k_{\text{мех}} \cdot P_{2н}$;

– учитываются дополнительные потери активной мощности ΔP_d в двигателе от токов высокой частоты уравнением вида $\Delta P_d = k_d \cdot P_{2н}$.

Магнитные, механические и дополнительные активные потери мощности принимаются неизменными, т.е. независимыми от коэффициента загрузки, и учитываются произведением $\Delta P_p = k_p \cdot P_{2н}$, где $k_p = k_m + k_{\text{мех}} + k_d$ – коэффициенты, учитывающие соответствующие доли потерь активной мощности от номинальной мощности двигателя.

Потери активной мощности от токов, протекающих по обмоткам асинхронного двигателя и по силовой цепи ЭТК, являются изменяющимися и зависимыми от коэффициента загрузки k_3 . Эти электрические потери мощности ΔP_3 учитываются суммой $\Delta P_3 = \Delta P_{31} + \Delta P_{32}$, где $\Delta P_{31} = m \cdot I_1^2 r_1$ – потери активной мощности в обмотке статора; $\Delta P_{32} = m \cdot I_2'^2 r_2'$ – потери активной мощности в обмотке ротора; m – число фаз АД; r_1 , r_2' – активные сопротивления обмоток статора и ротора, приведенного к обмотке статора; I_1 , I_2' – токи в обмотке статора и ротора, приведенного к обмотке статора.

Потери активной мощности в силовой электронике – преобразователях частоты, тиристорных регуляторах напряжения и др., учитываются через их коэффициенты полезного действия ($\eta_{\text{пп}}$) для номинального режима работы АД произведением $\Delta P_{\text{пп}} = k_{\text{пп}} \cdot P_{2н}$, где

$$k_{\text{пп}} = \left(\frac{1}{\eta_{\text{пп}}} - 1 \right).$$

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ

Решение первой задачи основано на использовании понятия КПД и энергетической диаграммы ЭТК.

Коэффициент полезного действия ЭТК, в относительных единицах, определяется известным отношением

$$\eta_{\text{этк}} = \frac{P_2}{P_{\text{этк}}} = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P_{\text{сц}} + \Delta P_{\text{пп}} + \Delta P_{\text{э}} + \Delta P_{\text{п}}}, \quad (1)$$

где P_2 – полезная мощность АД; $P_{\text{этк}}$ – потребляемая активная мощность ЭТК.

Отношение (1), с учетом ранее принятых обозначений и коэффициента загрузки, имеет вид:

$$\eta_{\text{этк}} = \frac{k_3 P_{2\text{н}}}{P_{2\text{н}} (k_3 + k_{\text{пп}} + k_{\text{п}}) + m I_1^2 r_{\text{эсц}} + m (I_1^2 r_1 + I_2'^2 r_2')}. \quad (2)$$

В (2) ток в фазе обмотки статора АД и силовой цепи ЭТК определяется известным выражением

$$I_1 = \frac{k_3 P_{2\text{н}}}{m U_1 \cdot \eta \cdot \cos \varphi}, \quad (3)$$

где k_3 , η , $\cos \varphi$ – коэффициент загрузки, КПД и $\cos \varphi$, соответствующие коэффициенту загрузки.

Приведенный к обмотке статора ток в фазе обмотки ротора может быть выражен через фазный ток статора для заданного коэффициента загрузки и ток холостого хода

$$I_2' = \sqrt{(I_1 \cos \varphi - I_{1\text{хх}} \cos \varphi_{\text{хх}})^2 + (I_1 \sin \varphi - I_{1\text{хх}} \sin \varphi_{\text{хх}})^2}, \quad (4)$$

где $I_{\text{хх}}$ – фазный ток статора при холостом ходе двигателя; $\varphi_{\text{хх}}$ – сдвиг фаз между напряжением и током при холостом ходе.

Непосредственное использование (2) на практике затруднительно, так как часто бывают неизвестными сопротивления обмоток статора, ротора и сдвиг фаз $\varphi_{\text{хх}}$.

Для получения зависимости КПД ЭТК от его параметров, пригодной для инженерных расчетов, преобразуем (2) к виду

$$\eta_{\text{этк}} = \frac{k_3 \cdot P_{2\text{н}}}{P_{2\text{н}} \left[K_3 + K_{\text{п}} + \left(\frac{1}{\eta_{\text{пп}}} - 1 \right) \right] + m I_1^2 R_3 + m I_1'^2 r_{\text{эсц}}}, \quad (5)$$

где R_3 – эквивалентное сопротивление, пропорциональное потерям активной мощности в обмотках АД.

Непосредственное использование (5) возможно при известных величинах I_1 , R_3 и $r_{\text{эсц}}$. Однако R_3 и $r_{\text{эсц}}$ на практике часто бывают неизвестными. Поэтому для инженерных расчетов (5) преобразуем к виду, удобному для практического применения. Для этого электрические потери активной мощности АД $\Delta P_{\text{э}}$, зависящие от его токов, выразим разницей полных и постоянных потерь при номинальном токе, т. е. для $k_3 = 1,0$.

$$\Delta p_{\text{эп}} = \Delta p_{\text{н}} - \Delta p_{\text{п}}. \quad (6)$$

где $\Delta p_{\text{п}}$ – постоянные потери активной мощности АД; $\Delta p_{\text{н}}$ – полные потери активной мощности АД при номинальной нагрузке,

$$\Delta p_{\text{н}} = P_{2\text{н}} \left(\frac{1}{\eta_{\text{н}}} - 1 \right).$$

Тогда (6) преобразуется к виду

$$\Delta p_{\text{эп}} = P_{2\text{н}} \left[\left(\frac{1}{\eta_{\text{н}}} - 1 \right) - k_{\text{п}} \right]. \quad (7)$$

С другой стороны, электрические потери активной мощности в АД можно выразить равенством

$$m I_1^2 R_3 = m \left(\frac{k_3 P_{2\text{н}}}{m U_{1\text{н}} \eta \cos \varphi} \right)^2 R_3. \quad (8)$$

Из анализа (8) следует, что, при неизменных m , $P_{2\text{н}}$, $U_{1\text{н}}$ электрические потери активной мощности прямо пропорциональны квадрату коэффициента загрузки двигателя и обратно пропорциональны квадрату его энергетического КПД η , равному произведению $\eta_{\text{б}} = \eta \cdot \cos \varphi$.

Исходное уравнение (1) с учетом (6-8) и математических преобразований принимает вид

$$\eta_{\text{этк}} = \frac{k_3}{A + B \cdot C}, \quad (9)$$

где

$$A = k_3 + k_{\text{п}} + k_{\text{пп}};$$

$$B = k_3^2 \left(\frac{\eta_{\text{н}} \cos \varphi_{\text{н}}}{\eta \cos \varphi} \right)^2;$$

$$C = \frac{1}{\eta_{\text{н}}} - 1 - k_{\text{п}} + k_{\text{сц}}.$$

Из анализа (9) следует, что КПД ЭТК зависит не только от КПД АД, но также от его коэффициента мощности и коэффициента загрузки. Кроме того, КПД ЭТК зависит от коэффициентов параметров силовой цепи $k_{\text{сц}}$, а также от энергетических показателей силовой электроники (ПЧ, ТРН и др.), определяемых коэффициентом $k_{\text{пп}}$.

Решение второй поставленной задачи рассмотрим на конкретном примере – электроприводе нефтяной качалки. Выполним расчеты и исследования КПД ЭТК по (9) и сравним энергоэффективности ЭТК, содержащих традиционные асинхронные двигатели с классом энергоэффективности IE1, IE2 и энергосберегающие асинхронные двигатели с индивидуальной компенсацией реактивной мощности (ЭАД) класса энергоэффективности IE1.

Пример

Рассмотрим три варианта выполнения электропривода нефтяной качалки.

Вариант 1 – электропривод выполнен на основе

ТАД, типа АИР180М8, мощностью $P_{2H} = 18,5$ кВт, номинальным напряжением $U_{1H} = 220/380$ В, номинальной частотой вращения вала ротора $n_H = 725$ об/мин, класс энергоэффективности двигателя IE1, $\eta_H = 0,88$, $\cos\varphi_H = 0,87$.

Вариант 2 – электропривод выполнен на основе ТАД, типа АИР180М8, мощностью $P_{2H} = 18,5$ кВт, номинальным напряжением $U_{1H} = 220/380$ В, номинальной частотой вращения вала ротора $n_H = 725$ об/мин, класс энергоэффективности двигателя IE2, $\eta_H = 0,91$, $\cos\varphi_H = 0,87$.

Вариант 3 – электропривод выполнен на основе ЭАД, типа АИР180М8, мощностью $P_{2H} = 18,5$ кВт, номинальным напряжением $U_{1H} = 220/380$ В, номинальной частотой вращения вала ротора $n_H = 725$ об/мин, класс энергоэффективности двигателя IE1, $\eta_H = 0,88$, $\cos\varphi_H = 1,0$, изготовленного путем модернизации из ТАД IE1.

По (9) для различных коэффициентов загрузки АД рассчитаны: электрические потери в двигателе, электрические потери в силовой цепи электропривода и коэффициент полезного действия ЭТК. Расчеты выполнены для значений коэффициентов: $k_H = 0,05$; $k_{\text{мш}} = 0,03$; $k_{\text{сц}} = 0,14$. Для каждого коэффициента загрузки АД задаются значения электрического КПД и коэффициента мощности. Результаты расчетов КПД ЭТК для различных вариантов электроприводов представлены графиками на рис. 1.

На рис. 2 представлены графики потерь мощности в силовой цепи ЭТК от применения ТАД класса энергоэффективности IE1, IE2 и ЭАД класса энергоэффективности IE1.

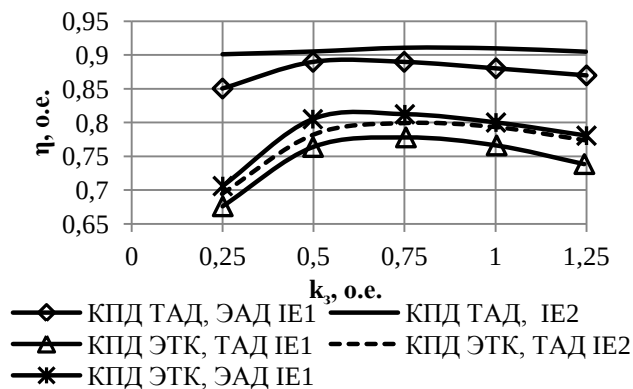


Рис. 1. Зависимости КПД двигателей и ЭТК от коэффициентов загрузки для вариантов электропривода нефтяной качалки

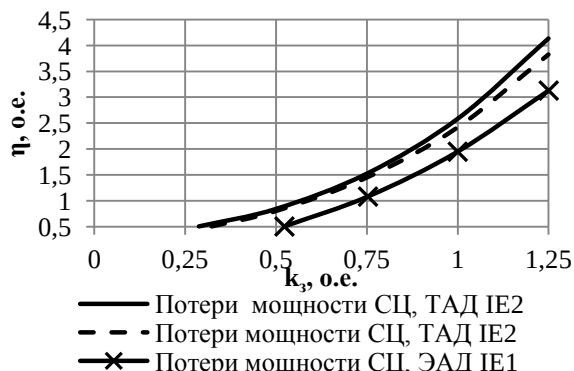


Рис. 2. Потери мощности в ЭТК от применения ТАД класса энергоэффективности IE1, IE2 и ЭАД класса энергоэффективности IE1

Анализ рис. 1 и 2 показывает, что КПД ЭТК на основе применения асинхронного двигателя с индивидуальной компенсацией реактивной мощности класса энергоэффективности IE1 выше, чем КПД ЭТК на основе применения традиционных асинхронных двигателей с классом энергоэффективности IE1, IE2. Потери мощности в силовой цепи ЭТК при применении асинхронного двигателя с индивидуальной компенсацией реактивной мощности меньше потерь мощности в силовой цепи ЭТК при применении традиционных асинхронных двигателей с классом энергоэффективности IE1, IE2.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Получены зависимости, позволяющие количественно оценивать коэффициенты полезного действия электротехнических комплексов с различными вариантами асинхронных двигателей.

2. Коэффициент полезного действия электротехнического комплекса зависит не только от КПД асинхронного двигателя, но и от его коэффициента мощности, коэффициента загрузки и параметров силовой цепи.

3. Асинхронный двигатель с индивидуальной компенсацией реактивной мощности класса энергоэффективности IE1 в электротехническом комплексе эквивалентен по энергоэффективности традиционным асинхронным двигателям с классом энергоэффективности IE2, созданным с увеличенной массой активных материалов.

4. Электромашиностроителям и электроремонтным предприятиям рекомендуется для повышения энергоэффективности асинхронных двигателей и электротехнических комплексов с их применением создавать двигатели с индивидуальной компенсацией реактивной мощности, не увеличивая массы электротехнической стали, меди и алюминия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мугалимов Р.Г. Асинхронные двигатели с индивидуальной компенсацией реактивной мощности и электроприводы на их основе: монография. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2011. 250 с.
2. Мугалимов Р.Г., Мугалимова А.Р. Асинхронные двигатели с индивидуальной компенсацией реактивной мощности, их технико-экономические преимущества и перспективы применения в промышленных электроприводах // Известия РАН. Энергетика. 2013. №5. С.30-43.
3. Khrumshin T.R., Kornilov G.P., Murzikov A.A., Karandaev A.S., Khrumshin V.R. Mathematical model of the static reactive power compensator // Proceedings of 2014 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE). Saratov: Bukva, 2014. Vol. 2. P. 418-425. doi: 10.1109/APEDE.2014.6958287
4. Radionov A.A., Evdokimov S.A., Karandaev A.S., Khrumshin V.R. Information and Measurement System for Control of Technical State of Asynchronous Electric Motors with Group Supply from Frequency Converter // Proceedings of 12th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE-2014). Novosibirsk. 2014, Vol.1. P. 280-285. doi: 10.1109/APEIE.2014.7040897.
5. Khrumshin T.R., Kornilov G.P., Murzikov A.A., Karandaev A.S., Khrumshin V.R. Vector control system of the static reactive power compensator // Proceedings of 2014 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE-2014). Saratov: Bukva, 2014. Vol. 2. P. 418-425. doi: 10.1109/APEDE.2014.6958287

- neering (APEDE). Saratov: Bukva, 2014. Vol.2. P. 426-433. doi: 10.1109/APEDE.2014.6958288
6. Храмин В.Р., Головин В.В., Храмин Р.Я. Энерго- ресурсосбережение средствами электротехнических систем широкополосного стана горячей прокатки // Труды VIII Междунар. (XIX Всерос.) конф. по автоматизированному электроприводу АЭП-2014. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2014. Т.2. С. 329 – 334.
 7. Частотно-регулируемый электропривод в теплоэнергетическом хозяйстве города: монография / Ю.А. Крылов, А.С. Карандаев, В.Р. Храмин, Р.Р. Храмина. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та, 2014. 201 с.
 8. Karandaev A.S., Khrumshin V.R., Khrumshina E.A. Automatic Control Principles of Thermal Station Output Parameters on the Basis of Controlled Electric Drives. Applied Mechanics and Materials. 2015. Vol.698. P.808-814. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.698.808
 9. Головин В.В., Карандаев А.С., Храмин В.Р. Энергосберегающие тиристорные электроприводы с автоматическим изменением координаты, регулируемой по цепи возбуждения // Изв. вузов. Электромеханика. 2006. №4. С.35-39.
 10. Головин В.В., Карандаев А.С., Храмин В.Р. Оценка эффективности применения тиристорного электропривода с автоматическим изменением координаты, регулируемой по цепи возбуждения // Изв. вузов. Электромеханика. 2006. №4. С.40-45.
 11. Экспериментальные исследования тиристорных электроприводов с двухзонным регулированием скорости с улучшенными энергетическими характеристиками / Карандаев А.С., Храмин В.Р., Лукин А.А., Шурыгина Г.В., Головин В.В. // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2010. № 13. С. 67-72.
 12. Храмин В.Р. Разработка электротехнических систем непрерывной группы стана горячей прокатки при расширении сортамента полос: дисс. ... д-ра техн. наук. Магнитогорск, 2013, 393 с.
 13. Мугалимов Р.Г., Закирова Р.А., Мугалимова А.Р. Энергоэффективные асинхронные двигатели, технико-экономические преимущества и оптимизация себестоимости их создания // Электротехнические системы и комплексы. 2016. №2(31). С.30-34.
 14. Регулируемый электропривод как средство энергосбережения в гидравлических системах насосных агрегатов / В.Р. Храмин, О.И. Карандаева, Ю.И. Мамлеева, О.И. Петухова, Е.А. Храмина // Электротехнические системы и комплексы. 2012. № 20. С. 354-360.

Поступила в редакцию 28 июня 2016 г.

INFORMATION IN ENGLISH

COMPARATIVE ESTIMATION OF ENERGY EFFICIENCY OF ASYNCHRONOUS MOTORS AND ELECTRICAL ENGINEERING COMPLEXES WITH THEIR APPLICATION

Rif G. Mugalimov

D.Sc.(Eng.), Professor, director, "NMSTU-Energoberezhzenie+" LLC, Magnitogorsk, Russia.

Alia R. Mugalimova

Ph.D.(Eng.), Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

The scope of the research includes energy performance of electrical engineering complexes equipped with asynchronous motors. The paper discusses ways and methods for increasing the efficiency of electrical engineering complexes. It offers dependencies required for quantitative estimation of the efficiency degree of an electrical engineering complex as a function of the efficiency factors, power output and loads of an asynchronous motor. It considers different variants of energy efficient asynchronous motors with IE1 and IE2 energy efficiency class and those with individual compensation of reactive power. Their influence on the efficiency degree of the electrical engineering complex has been investigated. Using the electric drive of an oil pumping unit as an example, it is shown that the efficiency degree of the electrical engineering complex equipped with an asynchronous motor with individual compensation of reactive power with power factor equal to one and IE1 energy efficiency is equivalent to that of the electrical engineering complex equipped with a conventional asynchronous motor of IE2 energy efficiency class. The paper provides results of efficiency factor calculation for various variants of electric drives. The obtained dependencies and estimation outcomes may be useful for manufacturers and operators of asynchronous motors.

Keywords: electrical engineering complex, asynchronous motor, efficiency degree, power factor, energy efficiency, equation, calculation, analysis.

REFERENCES

1. Mugalimov R.G. *Asinkhronnye dvigateli s individualnoy kompensatsiey reaktivnoy moschnosti i elektroprivody na ikh osnove* [Asynchronous Motors with Independent Reactive Power Compensation and Corresponding Electric Drives. Magnitogorsk, Publishing center of Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2011. 250 p.
2. Mugalimov R.G., Mugalimova A.R. Asynchronous Motors with Individual Compensation of Reactive Power, their Engineering and Economic Benefits and Prospects for Application in Industrial Electric Drives. *Izvestiya RAN. Energetika* [Bulletin of the Russian Academy of Science. Power engineering], 2013, no.5, pp.30-43. (In Russian)
3. Khrumshin T.R., Kornilov G.P., Murzikov A.A., Karandaev A.S., Khrumshin V.R. Mathematical model of the static reactive power compensator. Proceedings of 2014 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE). Saratov: Bukva, 2014. Vol. 2. P. 418-425. doi: 10.1109/APEDE.2014.6958287
4. Radionov A.A., Evdokimov S.A., Karandaev A.S., Khrumshin V.R. Information and Measurement System for Control of Technical State of Asynchronous Electric Motors with Group Supply from Frequency Converter. Proceedings of 12th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE-2014). Novosibirsk. 2014, Vol.1. P. 280-285. doi: 10.1109/APEIE.2014.7040897.
5. Khrumshin T.R., Kornilov G.P., Murzikov A.A., Karandaev A.S., Khrumshin V.R. Vector control system of the static re-

- active power compensator. Proceedings of 2014 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE). Saratov: Bukva, 2014. Vol.2. P. 426-433. doi: 10.1109/APEDE.2014.6958288
6. Khramshin V.R., Golovin V.V., Khramshin R.Ya. Energy and Resource Saving Using Electrical Engineering Systems of Wide Strip Hot Rolling Mill. *Trudy VIII Mezhdunarodnoy (XIX Vserossiyskoy) konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu AEP-2014* [Proceedings of VIII International (XIX All-Russian) conference on automatic electric drive AEP-2014]. Saransk, Publishing center of Mordovia University, 2014, vol.2, pp.329 – 334. (In Russian)
 7. Krylov Yu.A., Karandaev A.S., Khramshin V.R., Khramshin R.R. *Chastotno-reguliruemyy elektroprivod v teploenergeticheskom khozyaystve goroda* [Variable Frequency Electric Drive in Heat and Power Facilities of the City]. Magnitogorsk, Publishing center of Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2014. 201 p.
 8. Karandaev A.S., Khramshin V.R., Khramshina E.A. Automatic Control Principles of Thermal Station Output Parameters on the Basis of Controlled Electric Drives. *Applied Mechanics and Materials*. 2015. Vol.698. P.808-814. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.698.808
 9. Golovin V.V., Karandaev A.S., Hramshin V.R. Energy-saving Thyristor Electric Drives with Automatic Coordinate Variation, which is Controlled by Circuit Condenser. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Electromechanics], 2006, no.4, pp. 35-39. (In Russian)
 10. Golovin V.V., Karandaev A.S., Hramshin V.R. Performance Evaluation of Applying Thyristor Electric Drive with Automatic Coordinate Variation, which is Controlled by Circuit Condenser. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Electromechanics], 2006, no.4, pp. 40-45. (In Russian)
 11. Karandaev A.S., Khramshin V.R., Lukin A.A., Shurygina G.V., Golovin V.V. Experimental Research of Thyristor Electric Drives with Two-zone Speed Control with Improved Energetic Characteristics. *Vestnik YuURGU. Seriya energetika* [Bulletin of South-Ural state university. Series "Power engineering"], 2010, no.13, pp.67-72.
 12. Khramshin V.R. *Razrabotka elektrotekhnicheskikh sistem nepreryvnoi gruppy stana goryachei prokatki pri rasshirenii sortamenta polos*. Doct. Diss. [Development of Electrotechnical Systems for Continuous Train of Hot Rolling Mill in the Process of Product Range Expansion Doct. Diss.]. Magnitogorsk, 2013, 393 p.
 13. Mugalimov R.G., Zakirova R.A., Mugalimova A.R. Energy Efficient Induction Motors, their Technical and Economic Advantages and Optimization of their Production Cost. *Elektrotekhnicheskie sistmy i komplekсы* [Electrotechnical systems and complexes]. 2016, no.2(31), pp.30-34.
 14. Khramshin V.R., Karandaeva O.I., Mamleeva Yu.I., Petukhova O.I., Khramshina E.A. Controlled electric drive as a meaning of power saving in hydraulic systems of pumping unit. *Elektrotekhnicheskie sistmy i komplekсы* [Electrotechnical systems and complexes]. 2012, no. 20, pp. 354-360.
-
- Мугалимов Р.Г., Мугалимова А.Р. Сравнительная оценка класса энергоэффективности асинхронных двигателей и электротехнических комплексов с их применением // Электротехнические системы и комплексы. 2016. №4(33). С.14-19. doi: 10.18503/2311-8318-2016-4(33)-14-19
- Mugalimov R.G., Mugalimova A.R. Comparative Estimation of Energy Efficiency of Asynchronous Motors and Electrical Engineering Complexes with their Application. *Elektrotekhnicheskie sistmy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2016, no.4(33), pp.14-19. doi: 10.18503/2311-8318-2016-4(33)-14-19 (In Russian)
-

Устимов К.В.¹, Агапитов Е.Б.¹, Михайловский В.Н.¹, Семенов Е.А.², Осколков С.В.¹

¹ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»

²ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат»

ПОИСК ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПО УВЕЛИЧЕНИЮ ВЫРАБОТКИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА НИЗКОПOTЕНЦИАЛЬНОМ ПАРЕ ОХЛАДИТЕЛЕЙ КОНВЕРТЕРНЫХ ГАЗОВ

В работе рассмотрена система пароснабжения металлургического предприятия на примере ОАО «ММК», описаны её элементы и проанализирована работа. Поставлена задача по оценке возможности увеличения выработки электроэнергии за счет повышения доли использования теплоты уходящих газов кислородных конвертеров. Проведен анализ работы турбогенераторов на низкопотенциальном паре. Выявлены причины неэффективной работы системы, предложены мероприятия по увеличению доли использования пара, стабилизации работы и увеличению выработки электроэнергии в системе утилизации низкопотенциального пара.

Ключевые слова: низкопотенциальный пар, паровые аккумуляторы, утилизация теплоты, конвертерный газ, система пароснабжения.

ВВЕДЕНИЕ

Важную роль в стратегии управления энергоресурсами играет синхронность работы нескольких производств и согласование объемов запрашиваемых и имеющихся в наличии энергоресурсов [1]. Яркой иллюстрацией этой проблемы является необходимость согласования совместной работы конвертерного производства и системы использования теплоты уходящих газов конвертеров для выработки пара и электроэнергии [2-5]. В конвертерном отделении ОАО «ММК» работают 3 конвертера по 375 т с котлами-охладителями конвертерных газов типа ОКГ-400-2М. Вырабатываемый за счет утилизации тепла конвертерного газа пар поступает в общий коллектор, откуда распределяется на 7 паровых аккумуляторов, предназначенных для сглаживания пульсаций давления и расхода пара и стабилизации его параметров для повышения эффективности дальнейшего использования в распределительных сетях (рис. 1).

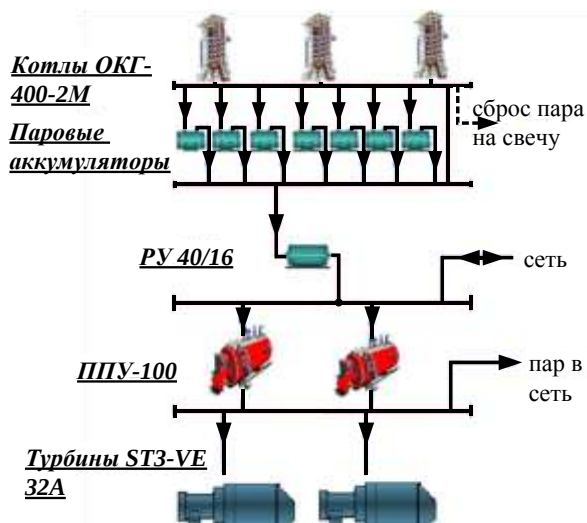


Рис. 1. Существующая схема утилизации пара ОКГ

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В период кислородной продувки конвертеров при пиковой производительности котлов ОКГ-400-2 в аккумуляторах накапливаются избытки пара, которые выдаются потребителям в периоды между кислородными продувками (при отсутствии выработки пара ОКГ). Редукционная установка РУ 4/1,6 состоит из двух ниток и обеспечивает снижение давления пара, поступающего от котлов ОКГ ККЦ и аккумуляторов, до 1,6 МПа в распределительной сети.

После редукционных установок РУ 4/1,6 пар поступает в коллектор, из которого подается в турбинный участок паросилового цеха, в котором установлены 2 турбины ST3 – VE32A фирмы Siemens, предварительно подогреваясь до требуемых параметров в пароперегревательной установке ППУ – 100, остальная часть поступает в паровые сети предприятия [6, 7].

Турбины ST3 – VE32A фирмы Siemens представляют собой конденсационные турбины с одним регулируемым отбором, рассчитанные на выработку 7460 кВт электроэнергии каждая при номинальных параметрах пара: $P_{ном} = 1,2$ МПа; $T_{ном} = 285^{\circ}\text{C}$; $D_{ном} = 60$ т/ч.

Анализ проблем работы системы показал, что задача стабилизации параметров пара после паровых аккумуляторов является ключевой для экономии энергоресурсов, увеличения выработки электроэнергии и улучшения энергоэффективности всей системы пароснабжения предприятия. Эту задачу невозможно решить без разработки необходимой логики управления группами аккумуляторов, связанной с характеристикой работы конвертерного отделения и спецификой конструктивных особенностей существующей схемы пароснабжения.

В силу различных технологических причин (в том числе из-за соображений повышения надежности и сроков безремонтной работы газоотводящего тракта конвертера) давление пара в системе было понижено с 4,0 до 2,2 – 2,7 МПа путем перенастройки параметров сбросных свечей. Кроме того, из-за недопустимо высокого давления в зарядной линии паровых аккумулято-

ров, возникающего при одновременной работе всех конвертеров, была установлена перемычка между зарядной и разрядной линиями паровых аккумуляторов. Эти изменения привели к нестабильной работе пароаккумуляторов и снижению их аккумулирующей способности на 60 – 70 %, так как часть пара ОКГ стала проходить в обход паровых аккумуляторов [8, 9].

Все вышеперечисленные причины привели к тому, что после РУ 4/1,6 пар поступает к турбинам с постоянным давлением, но с нестабильным расходом. Компенсировать недостаток пара приходится за счет отборов из общекотельной сети, а именно паром, вырабатываемым энергетическими котлами электростанций. Таким образом, неудовлетворительная работа системы утилизации пара котлов ОКГ негативно сказывается на выработке электроэнергии не только турбинами СТЗ-VE32А, но и станционными турбогенераторами. Характерный график работы турбин представлен на **рис. 2**.

Работа ступеней турбины в нерасчетных режимах приводит к ухудшению внутреннего относительного КПД. К еще большему понижению экономичности приводит изменение термического коэффициента полезного действия при понижении начальных параметров цикла.

При полном открытии всех регулирующих клапанов изменение расхода пара вызывает изменение начального давления. Данная зависимость подсчитывается по формуле

$$D_1 = D_0 \sqrt{\frac{p_{01}^2 - p_k^2}{p_0^2 - p_k^2}}, \quad (1)$$

где D_1 – новый расход пара; D_0 , p_0 , p_k – расход, начальное и конечное давления пара при расчетном режиме; p_{01} – новое начальное давление.

В конденсационных турбинах величиной p_k^2 можно пренебречь и записать формулу в упрощенном виде

$$D_1 = D_0 \frac{p_{01}}{p_0}. \quad (2)$$

По данным статистики, расход пара на турбины в процессе их работы может понижаться до 20 т/ч вместо расчетных 60 т/ч. При данном расходе значение начального давления составит

$$p_{01} = D_1 \frac{p_0}{D_0} = 20 \cdot \frac{1,2}{60} = 0,4 \text{ МПа}. \quad (3)$$

Мощность турбины при измененном начальном давлении без учета изменений внутреннего относительного КПД и расходов пара в регенеративные отборы запишется

$$N_1 = N_0 \cdot \frac{D_1}{D_0} \cdot \frac{H_1}{H_0}, \quad (4)$$

где N_0 , D_0 , H_0 – мощность, расход пара и располагаемый теплоперепад турбины при расчетном режиме; N_1 , D_1 , H_1 – мощность, расход пара и располагаемый теплоперепад турбины при изменившемся начальном давлении [10].

$$N_1 = 7460 \cdot \frac{20}{60} \cdot \frac{364,1}{386,7} = 2341 \text{ кВт}.$$

Как видно из формулы (4), изменение мощности турбины происходит за счет изменений как теплового перепада, так и расхода пара и снижается до 30 % от номинальной мощности.

Стоит отметить, что теоретически рассчитанная мощность в 2341 кВт является минимальной, до которой разгружаются турбины, и совпадает с опытными данными работы турбины (см. **рис. 2**).

В целом выработка электроэнергии на турбинах СТЗ-VE32А характеризуется крайней неравномерностью (см. **рис. 2**), что негативно сказывается как на экономичности турбоустановки, так и на надежности работы турбин. Кроме того, увеличивается износ отдельных узлов оборудования.

Анализ показал, что одним из путей решения проблемы стабилизации параметров пара ОКГ и, как следствие, увеличения выработки электроэнергии на турбинах может быть модернизация схемы пароснабжения с установкой современной паровой арматуры с улучшенными динамическими характеристиками.

Для оценки зарядной способности аккумулятора, снабженного современным быстродействующим клапаном, были проведены промышленные эксперименты с отключенным от сети аккумулятором, работающим на сброс в атмосферу с давлением сброса 1,2 МПа.

Для проведения исследований был проведен монтаж приборов учета и регистрации расходов и параметров пара на зарядку и разрядку аккумулятора; расходов и температуры подпиточной и дренируемой воды; уровня конденсата в баке ПА – в соответствии со схемой проведения экспериментов. Данные со всех датчиков поступают и регистрируются прибором Интеграф-1000. Схема обвязки экспериментального аккумулятора представлена на **рис. 3**.

После установки необходимого оборудования был проведен промышленный эксперимент по зарядке – разрядке аккумулятора от паровой сети при автоматическом поддержании давления пара после аккумулятора на уровне $P=1,2$ МПа. Результаты эксперимента приведены на **рис. 4**. Расход менялся более плавно, чем в традиционной схеме, Амплитуда пульсаций давления разрядного пара не превысила 0,2 МПа. Расход разрядного пара от экспериментального пароаккумулятора в среднем составил 8,3 т/ч. Разрядка продолжалась даже в те моменты, когда выработки пара котлами ОКГ не было. Кроме того, было отмечено снижение давления зарядного пара во всех пароаккумуляторах. Экспериментальные работы показали, что при модернизации всей схемы создаются условия для снижения объемов сбросов пара на свечи, решается проблема стабилизации параметров пара ОКГ.

Анализ данных показал, что средний расход пара от 6 работающих на общую разрядную линию аккумуляторов в момент проведения экспериментов составил 39,7 т/ч. Принимая равными условия их работы, каждый из 6-ти пароаккумуляторов в стандартной схеме разряжался в среднем с расходом 6,7 т/ч с нестабильными характеристиками расхода (**рис. 5**). При этом экспериментальный пароаккумулятор обеспечил стабилизированный средний расход 8,3 т/ч.

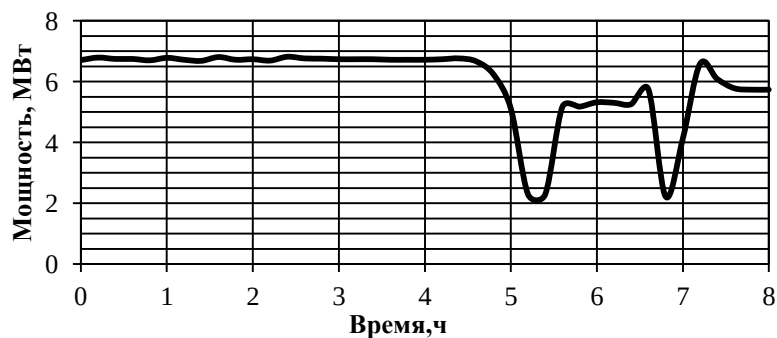


Рис. 2. Выработка электроэнергии на турбине ST3-VE32A

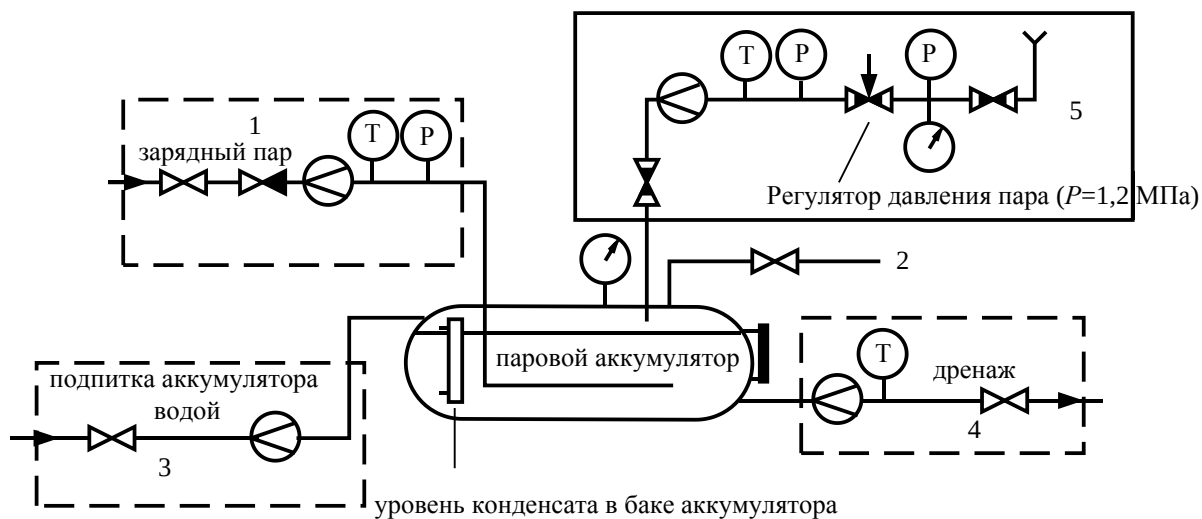


Рис. 3. Схема обвязки парового аккумулятора
1-КИП зарядной линии; 2-КИП разрядной линии; 3-КИП подпитки;
4-КИП дренажа; 5- временная схема управления разрядкой

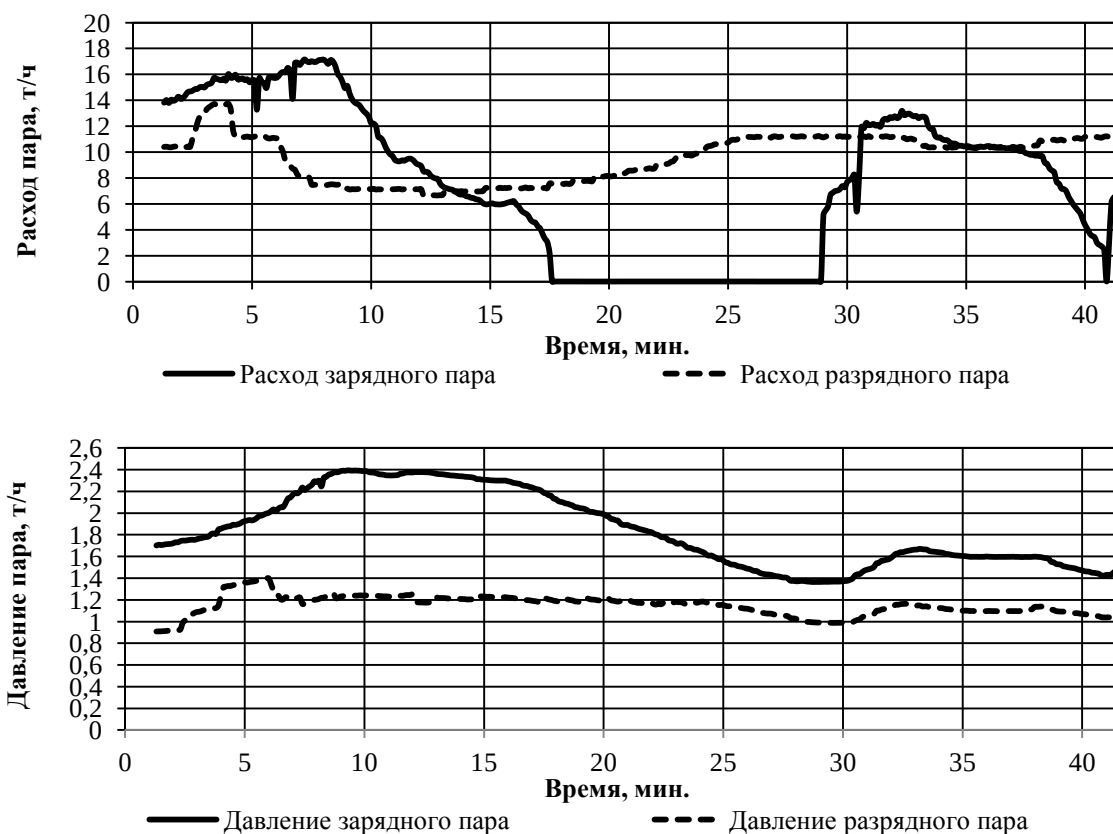


Рис. 4. Изменение параметров пароаккумулятора во время проведения серии экспериментов

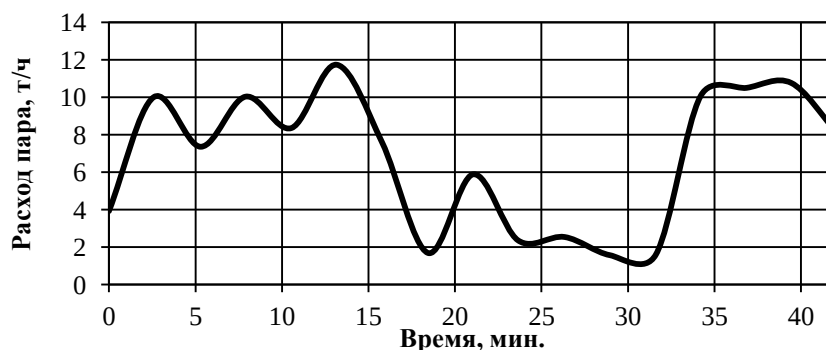


Рис. 5. Расход пара от пароаккумулятора, работавшего по стандартной схеме

На основании проведенных исследований было предложено несколько вариантов реконструкции системы пароснабжения:

- модернизация системы пароснабжения по предложенной схеме с обвязкой всех паровых аккумуляторов по одинаковому принципу;

- разделение пароаккумуляторов на 2 ступени по давлению.

Модернизация системы пароснабжения с обвязкой всех 7 пароаккумуляторов по той же схеме, что и при проведении экспериментов, позволит стабилизировать расход и давление отпускаемого пара. При этом ожидаемый средний суммарный расход пара составит $8,3 \cdot 7 = 58,1$ т/ч.

При реализации схемы с разделением пароаккумуляторов предлагается выделить 2 из 7 в группу повышенного давления. Таким образом, 5 пароаккумуляторов будут отпускать пар с давлением 1,2 МПа, а оставшиеся 2 – с давлением 1,5 МПа. Оборудование при этом устанавливается то же, что и при проведении серии экспериментов, различна будет лишь настройка регулятора давления пара после пароаккумуляторов. При этом появляется возможность покрытия технологических нужд повышенного давления. Возможность работы системы в данном режиме была подтверждена в ходе серии экспериментов с разрядкой с $P=1,5$ МПа. На турбины при данной схеме будет поступать $8,3 \cdot 5 = 41,5$ т/ч пара с постоянным давлением.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В обоих рассмотренных случаях модернизация системы пароснабжения приведет к увеличению доли использования, стабилизации давления и расхода низкопотенциального пара котлов ОКГ, снижению величины сбросов пара в системе. Максимальное использование пара ОКГ, вместо пара из общезаводской сети, позволит увеличить выработку электроэнергии на турбинах ST3 – VE32A, сгладить график изменения их нагрузки и снизить влияние на работу электростанций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Теплоэнергетика металлургических заводов / Ю.И. Розенгарт, З.А. Мурадова, Б.З. Теверовский и др. М.: Металлургия, 1985. 303 с.
2. Баптизмандский В.И., Меджибожский М.Я., Охотский В.Б. Конвертерные процессы производства стали. Теория, технология, конструкции агрегатов. Киев; Донецк: Вища школа, 1984. 343 с.
3. Цветков В.В. Организация пароснабжения промышленных предприятий. М.: Энергия, 1980. 206 с.
4. Сазанов Б.В., Ситас В.И. Теплоэнергетические системы промышленных предприятий: учеб. пособие для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1990. 304 с.
5. Kapil A., Bulatov I., Kim J. K., Smith R. Exploitation of low-grade heat in site utility systems. In Chemical Engineering Transactions[Chem. Eng. Trans., vol. 21, pp. 367-372. doi: 10.3303/CET102101762
6. Вахромеев И.Е., Казаринов Л.С., Шнайдер Д.А. Метод упреждающего управления технологической паровой распределенной системой // Вестник ЮУрГУ. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2010. №2(178). С.86-91.
7. Шнайдер Д. А. Оперативное управление потоками энергетических ресурсов в производственных сетях с учетом динамики их аккумулирования // Вестник ЮУрГУ. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2008. №17(117). С.45-49.
8. Устимов К.В., Агапитов Е.Б., Осолков С.В. Повышение эффективности утилизации пара ОКГ переменных параметров с использованием паровых аккумуляторов на ОАО «ММК» // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: сб. статей по результатам XX междунар. науч.-технич. конф. студентов и аспирантов. М.: МЭИ, 2014. С.235.
9. Устимов К.В., Агапитов Е.Б. Оценка эффективности работы паровых аккумуляторов в системе утилизации низкопотенциального пара в условиях ОАО «ММК» // Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: сборник статей по результатам: Всерос. науч.-практич. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием. Екатеринбург: УрФУ, 2013. С.214-215.
10. Капелович Б.Э. Эксплуатация паротурбинных установок. М.: Энергия, 1975. 288 с.

Поступила в редакцию 27 апреля 2016 г.

INFORMATION IN ENGLISH

SEARCH FOR TECHNICAL SOLUTIONS TO INCREASE POWER GENERATION USING LOW-POTENTIAL STEAM OF CONVERTER GAS COOLERS

Konstantin V. Ustimov

Post-graduate student, the department of Heat and Electrical System Engineering, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: ustimov.k.v@yandex.ru

Evgeniy B. Agapitov

D.Sc. (Eng.), Professor, Head of the Department, Department of Heat and Electrical System Engineering, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Vladimir N. Mikhaylovskiy

Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Department of Heat and Electrical System Engineering, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Evgeniy A. Semenov

Manager, Power department, OJSC "MMK", Magnitogorsk, Russia.

Sergey V. Oskolkov

Assistant Professor, the Department of Heat and Electrical System Engineering, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

The article considers the steam supply system of a metallurgical plant using Magnitogorsk Iron and Steel Works as an example. Elements of this system were described and analyzed. The main task is to evaluate the possibility of increasing power output by raising the share of heat usage from converter gases. Operating characteristics of low-potential steam turbines were analyzed. The causes of the system inefficiency were identified. The suggested measures can be used to increase the proportion of low-potential steam usage, stabilize the operation and to increase power generation in the system of low-grade steam utilization.

Keywords: Low-potential steam, steam accumulators, heat utilization, converter gas, steam supply system.

REFERENCES

1. Rozengard Yu.I., Muradova Z.A., Teverovskiy B.Z., et al. *Teploenergetika metallurgicheskikh zavodov* [Heat Power Engineering of Metallurgical Enterprises]. Moscow, Metallurgy Publ., 1985. 303 p.
2. Baptizmanskiy V.I., Medzhibozhskiy M.Ya., Okhotskiy V.B. *Konvertirnyye protsessy proizvodstva stali. Teoriya, tekhnologiya, konstruktivnyy agregat* [Converter Processes of Steel Making. Theory, Engineering, Equipment Design]. Kiev, Donetsk, High School Publ., 1984. 343 p.
3. Tsvetkov V.V. *Organizatsiya parosnabzheniya promyshlennykh predpriyatiy* [Steam Supply at Industrial Enterprises.] Moscow, Energy Publ., 1980. 206 p.
4. Sazanov B.V., Sitas V.I. *Teploenergeticheskie sistemy goryshchennykh predpriyatiy: uchebnoye posobie dlya vuzov* [Heat and Power Systems for Industrial Enterprises. Textbook for Universities]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1990. 304 p.
5. Kapil A., Bulatov I., Kim J. K., Smith R. Exploitation of low-grade heat in site utility systems. In *Chemical Engineering Transactions* Chem. Eng. Trans., vol. 21, pp. 367-372. doi: 10.3303/CET102101762
6. Vakhromeev I.E., Kazarinov L.S., Shnaider D.A. Method of Feed-forward Control of Manufacturing Steam Distribution System. *Vestnik YuUrGU. Seriya: Komp'yuternye tekhnologii, upravlenie, radioelektronika* [Bulletin of South Ural State University. Series Computer technology, control, radio electronics], 2010, no.2(178), pp.86-91. (In Russian)
7. Shnaider D.A. Operational Control of Power Flows in Manufacturing Networks Taking into Account their Accumulation. *Vestnik YuUrGU. Seriya: Komp'yuternye tekhnologii, upravlenie, radioelektronika* [Bulletin of South Ural State University. Series Computer technology, control, radio electronics], 2008, no.17(117), pp.45-49. (In Russian)
8. Ustimov K.V., Agapitov E.B., Oskolkov S.V. Improvement of Steam Utilization Efficiency of OKG with Variable Parameters Using Steam Accumulation System at the OJSC "MMK". *Radioelektronika, elektrotehnika i energetika: sbshchennik statey po rezul'tatam XX mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii studentov i aspirantov* [Radio electronics and power engineering: collection of scientific articles of the Twentieth international scientific conference of students and post-graduate students], Moscow: MEI, 2014, pp.235. (In Russian)
9. Ustimov K.V., Agapitov E.B. Assessment of Heat Accumulation System Operation in the System of Low Parameter Steam Utilization at the OJSC "MMK". *Energo- i resursosberezhenie. Energoobespechenie. Netraditsionnye i vobnovlyemye istochniki energii: sbornik statey po rezul'tatam: Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh s mezhdunarodnym uchastiem* [Energy and resource saving. Power Supply. Nonconventional and renewable energy sources: collection of scientific articles of the All-Russian scientific conference of students, post-graduate students and young scientists], Yekaterinburg, UrFU, 2013. pp.214-215. (In Russian)
10. Kapelovich B.E. *Ekspluatatsiya paroturbinnnykh ustanovok* [Operation and Maintenance of Steam Turbine Plants.]. Moscow, Energy, 1975. 288 p.

Устимов К.В., Агапитов Е.Б., Михайловский В.Н., Семенов Е.А., Осолков С.В. Поиск технических решений по увеличению выработки электроэнергии на низкопотенциальном паре охладителей конвертерных газов // *Электротехнические системы и комплексы*. 2016. №4(33). С.20-24. doi: 10.18503/2311-8318-2016-4(33)-20-24

Ustimov K.V., Agapitov E.B., Mikhaylovskiy V.N., Semenov E.A., Oskolkov S.V. Search for Technical Solutions to Increase Power Generation Using Low-potential Steam of Converter Gas Coolers. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2016, no.4(33), pp.20-24. (In Russian). doi: 10.18503/2311-8318-2016-4(33)-20-24

¹ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»²ООО «НПК»

РАСЧЕТ И АНАЛИЗ СОСТАВЛЯЮЩИХ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ПРИМЕРЕ ОАО «ММК»

В данной статье рассмотрена созданная в среде MATLAB SIMULINK математическая модель для определения потерь электроэнергии. Разработанная модель позволяет производить расчет нагрузочных потерь в воздушных и кабельных линиях, в трансформаторах, потерь холостого хода, также изучать влияние режимов и различных параметров сети на величину потерь. С ее помощью проводились расчеты нагрузочных потерь, потерь холостого хода для трансформаторов и линий различных классов напряжения на участках ОАО «ММК».

Ключевые слова: нагрузочные потери электроэнергии, потери холостого хода, методы определения потерь, математическая модель расчета потерь электроэнергии

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в связи с ростом электропотребления, концентрацией производства электроэнергии остро встает вопрос учета, планирования и сокращения потерь электроэнергии и мощности. Целью расчётов и анализа потерь электрической энергии (ПЭЭ) является их снижение с помощью экономически оправданных мероприятий. С точки зрения оптимальности режима потери могут рассматриваться как один из критериев [1-3].

Известные методы и алгоритмы расчёта потерь можно разделить на детерминированные и вероятностно-статистические [4-6]. До 1960-х годов наибольшее распространение получил метод расчета ПЭЭ по числу часов максимальных потерь [7]. И только в начале 60-х годов 20-го века находят применение вероятностные методы расчета, в течение последующих почти 30 лет эти методы активно развивались.

Нормативные методы расчета нагрузочных потерь основаны на использовании всего объема имеющейся информации о схемах и нагрузках сетей. При недостаточном объеме информации они обеспечивают наименьшую допустимую точность для сетей рассматриваемого напряжения. По мере увеличения оснащенности сетей средствами измерения и оперативного контроля режимов возможен переход на любой более точный метод [8].

При расчете нагрузочных потерь электроэнергии в качестве нормативных используют: метод оценки потерь на основе зависимостей потерь от обобщенной информации о схемах и нагрузках сети - в сетях 0,38 кВ [9]; метод средних нагрузок — в сетях 6-20 кВ [10, 11]; в сетях 35 - 220 кВ при отсутствии реверсивных потоков энергии по межсетевым связям — метод расчетных суток, а при наличии реверсивных потоков энергии — метод средних нагрузок [10]; метод оперативных расчетов — в сетях 330-750 кВ.

В [6] наиболее подробно рассмотрены детерминированные методы расчета ПЭЭ, а в работе Ю.С. Железко [4] – вероятностные методы. Оценочные методы используют в сетях 0,4 кВ [9]. Метод средних нагрузок применяют в сетях 6-20 кВ и в разомкнутых электрических сетях 110 кВ. Метод графического интегриро-

вания используют для расчета ПЭЭ в дальних линиях электропередачи и в сетях напряжением 110 кВ [4,6]. В сетях напряжением 220 кВ применяют метод оперативных расчетов, в замкнутых электрических сетях применяют метод контрольных суток. В [12] наиболее подробно рассмотрен расчет ПЭЭ от транзита. В [13] рассмотрен долевого вклад сторонних потребителей в потери холостого хода.

В настоящей работе расчет потерь выполняется в соответствии с Приказом Министерства энергетики РФ от 30 декабря 2008 г. № 326 [14]. Для разработанной имитационной модели наиболее рациональным является метод средних нагрузок, который позволяет рассчитать потери в каждом элементе сети.

СОЗДАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТЕРЬ В СРЕДЕ MATLAB SIMULINK

Пакет имитационного моделирования MATLAB Simulink позволяет исследовать процессы и параметры, которые зачастую недоступны в реальных объектах. Расчет потерь идет после расчета установившегося режима энергосистемы. Для расчета потерь в блок *constant* необходимо ввести данные по средней и максимальной мощностях, для расчета коэффициента формы, а также число часов в базовом периоде. В блоке *f(u)* производится расчет нагрузочных потерь, которые выводятся на экран пользователя. Ток, необходимый для расчета потерь, и сопротивления линий и трансформаторов берутся исходя из текущей схемы энерго-района. Модель производит расчеты нагрузочных потерь в воздушных и кабельных линиях, в трансформаторах, потерь холостого хода. Математическая модель позволяет изучать влияние режимов и различных параметров сети на величину потерь.

Для расчета потерь электрической энергии необходимо определить параметры схемы замещения электрической сети и рассчитать установившийся режим системы электроснабжения.

Схема замещения сети составлялась на основе схем замещения основных элементов сети – трансформаторов, кабельных и воздушных линий электропередач и т.д. Расчеты параметров схемы замещения выполнены по нижепредставленным формулам:

а) трансформаторы:

$$R_T = \frac{\Delta p_k \cdot U_{\text{ном}}^2 \cdot 10^3}{n \cdot S_{\text{т.ном}}^2}, \quad (1)$$

где Δp_k – потери активной мощности в опыте короткого замыкания, кВт; $U_{\text{ном}}$ – номинальное напряжение обмотки ВН трансформатора, кВ; n – количество параллельно работающих трансформаторов; $S_{\text{т.ном}}$ – номинальная мощность трансформатора, кВ·А;

$$X_T = \frac{u_k \cdot U_{\text{ном}}^2 \cdot 10}{n \cdot S_{\text{т.ном}}}, \quad (2)$$

где u_k – напряжение короткого замыкания, %.

Значения Δp_k , $U_{\text{ном}}$, $S_{\text{т.ном}}$, u_k определены из справочников. Для трансформаторов с расщепленной обмоткой низшего напряжения сопротивление определяется по формулам (1) и (2) в предположении, что обмотки низшего напряжения включены параллельно;

б) кабельные и воздушные линии:

$$R_L = r_0 \cdot l; \quad (3)$$

$$L_L = \frac{x_0 \cdot l}{2\pi f}, \quad (4)$$

где l – длина кабельной или воздушной линии, км; f – частота, Гц; x_0 , r_0 – удельные значения активного и индуктивного сопротивлений (зависят от типа, напряжения, сечения линии);

в) электрическая нагрузка:

$$I = \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}}}, \quad (5)$$

где P – активная нагрузка, МВт; Q – реактивная нагрузка, МВАр.

Разработанная модель при расчетах использует фазные напряжения и мощности, поэтому при выводе на экран исследуемых значений используются соответ-

ствующие коэффициенты.

На **рисунке** представлена математическая модель для расчета потерь одной из узловых подстанций 220/110/10 кВ.

Отображение потерь выводится на экран пользователя в специальном блоке «потери» на каждой из подстанций.

Результаты расчетов нагрузочных потерь, потерь холостого хода для трансформаторов и линий различных классов напряжения представлены в **табл. 1**.

Для более подробного и наглядного анализа потери выделены по элементам (**табл. 2**).

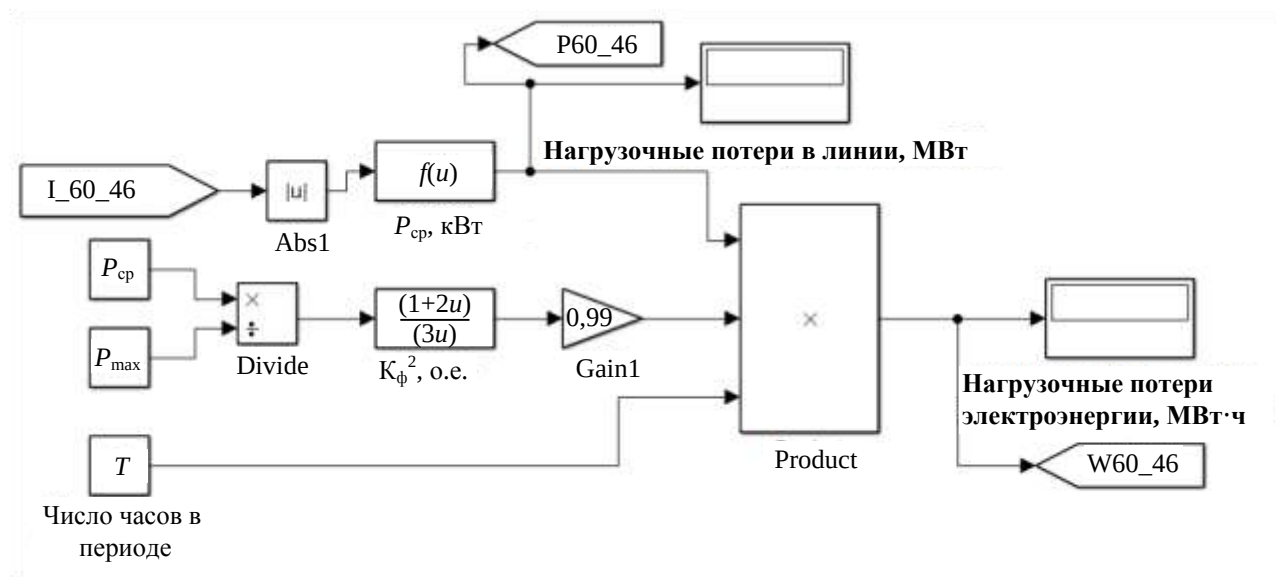
ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная математическая модель позволяет производить расчет нагрузочных потерь в воздушных и кабельных линиях, в трансформаторах, потерь холостого хода, возможно изучение влияния режимов и различных параметров сети на величину потерь.

В питающих линиях 110 кВ и внутрицеховых сетях потери составляют 41% от общего числа потерь. Следовательно, основной упор на уменьшение потерь будет делаться именно в данных участках исследуемого энергорайона. Из-за того, что на комбинате большое количество трансформаторов работает с малым коэффициентом загрузки, величина потерь холостого хода имеет весомую значимость в суммарных потерях. Как видно из **табл. 2**, потери холостого хода в силовых трансформаторах составляют 24 %.

Большими нагрузочными потерями обладают линии 110 кВ, порядка 19 %, что вызвано большими длинами и слабой загруженностью. При расчетах не учитывались линии, которые находятся на балансе производственных цехов. Этим объясняется относительно малая величина потерь в линиях 10 кВ.

Большой процент нагрузочных потерь (75 % от суммарных потерь) связан с потоками реактивной мощности от генератора к потребителям по элементам электрической сети.



Математическая модель расчета потерь

Таблица 1

Потери активной мощности на различных участках исследуемого района

Энергетический объект	Величина потерь, МВт	Процент от суммарных потерь, %
Автотрансформаторы 550/220 кВ и линии передачи по 220 кВ	4,78	26,99
Автотрансформаторы 220/110 кВ	0,8	4,52
Трансформаторы 110/35/10 кВ	2,73	15,4
Линии электропередачи 110 кВ	3,1	17,5
Трансформаторы 110/10 кВ и линии 35; 10 кВ	4,3	24,28
Суммарные потери	15,71	100

Таблица 2

Структура потерь исследуемого энергорайона

Составляющая потеря		Величина потерь, МВт	Процент от суммарных потерь, %
Трансформаторы 550/220 кВ	Потери холостого хода	0,36	
	Нагрузочные потери	0,56	
	Суммарные	0,92	5,86
Трансформаторы 220/110 кВ	Потери холостого хода	0,44	
	Нагрузочные потери	0,36	
	Суммарные	0,8	5,09
Трансформаторы 110/35/10 кВ	Потери холостого хода	0,8	
	Нагрузочные потери	2,1	
	Суммарные	2,9	18,46
Трансформаторы 110/10 кВ	Потери холостого хода	2,32	
	Нагрузочные потери	1,11	
	Суммарные	3,43	21,83
Линии 220 кВ		0,86	5,47
Линии 110 кВ		3,1	19,73
Линии 35 кВ		1,43	9,1
Линия 10 кВ		2,27	14,45
Суммарные потери в сети	Потери холостого хода	3,92	24,9
	Нагрузочные потери	11,79	75,05
	Суммарные	15,71	100

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Napis N.F., Sulaima M.F., Arif R.M., Yusof R.A., Kadir A.F.A., Baharom M.F. A power distribution network restoration via feeder reconfiguration by using EPSO for losses reduction // Journal of Theoretical and Applied Information Technology. 2015, vol. 79, no. 2, pp. 346-350.
- Rajabi-Ghahnavieh A., Fotuhi-Firuzabad M., Othman M. Optimal unified power flow controller application to enhance total transfer capability // IET Gener. Transm. Distrib. 2015. vol. 9, iss. 4, pp. 358-368.
- Wedeward K., Adkins C., Schaffer S., Smith M., Patel A. Inventory of load models in electric power systems via parameter estimation // Engineering Letters. 2015, vol. 23, iss. 1, p. 20-28.
- Железко Ю.С. Выбор мероприятий по снижению потерь электроэнергии в электрических сетях. Руководство для практических расчетов. М.: Энергоатомиздат, 1989. 176 с.
- Казанцев В.Н. Потери электроэнергии в электрических сетях. М.: Энергоатомиздат, 1983. 368 с.
- Потери мощности и энергии в электрических сетях / Г.Е. Поспелов, Н.М. Сыч, под ред. Г.Е. Поспелова. М.: Энергоиздат, 1981. 216 с.
- Потребич А.А. Методы расчета потерь энергии в питающих электрических сетях энергосистем // Электричество. 1995. №8. С.8-12.
- Российская Федерация. Методика расчета нормативных (технологических) потерь электроэнергии в электрических сетях [Электронный ресурс]. Приложение №1 к инструкции, зарег. в Минюсте РФ №13314 по состоянию на 12.02.2009г. СПС «Консультант плюс»
- Российская Федерация. Об утверждении методики расчета нормативных (технологических) потерь электроэнергии в электрических сетях [Электронный ресурс]. Приказ Минпромэнерго РФ от 03.02.2005 №21. СПС «Консультант плюс».
- Пейзель В.М., Степанов А.С. Расчет технических потерь энергии в распределительных электрических сетях с использованием информации АСКУЭ и АСДУ // Электричество. 2002. №3. С.10-15.
- Цырук С.А., Кошарная Ю.В., Евграфов С.А. и др. Влияние нагрузки субабонентов на уровень потерь электроэнергии в сетях электроснабжающих организаций // Промышленная энергетика. 2010. №8. С.9-15.
- Железко Ю.С., Артемьев А.В., Савченко О.В. Расчет, анализ и нормирование потерь электроэнергии в электрических сетях: Руководство для практических расчетов. М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2003. 280 с.
- Алгоритм расчета долевого вклада в потери холостого хода активной мощности сторонних потребителей промышленного предприятия на примере ОАО «ММК» / А.В. Малафеев, Е.Б. Ягольников, Г.Ю. Савинова, А.А. Антоненко // Главный энергетик. 2012. №4. С.50-54.
- Российская Федерация. Об организации в Министерстве энергетики Российской Федерации работы по утверждению нормативов технологических потерь электроэнергии при ее передаче по электрическим сетям [Электронный ресурс]. Приказ Министерства энергетики РФ от 30.12.2008 № 326. СПС «Консультант плюс».

Поступила в редакцию 18 июня 2016 г.

INFORMATION IN ENGLISH

CALCULATION AND ANALYSIS OF COMPONENTS OF POWER LOSS USING ON JSC "MMK" AS AN EXAMPLE

Evgeniya B. Yagol'nikova

Assistant Professor, the Department of Power Supply of Industrial Enterprises, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: yagolnikovaevgenia@inbox.ru.

Nikita A. Rudakov

Metrology engineer, "NPK" LLC, Magnitogorsk, Russia.

Maksim A. Shoshin

Metrology engineer, "NPK" LLC, Magnitogorsk, Russia.

The paper is concerned with the mathematical model developed in MATLAB SIMULINK, which is used to calculate electric power losses. The developed model allows the calculation of load losses in the overhead and cable lines, transformers, standby losses, it also makes it possible to study the impact of various modes and network parameters on the loss amount. The model was used to calculate load losses, standby losses of transformers and lines of different voltage classes in different departments of the OJSC "MMK".

Keywords: Load power loss, standby losses, methods for determination of losses, mathematical model for calculating electric power losses.

REFERENCES

1. Napis N.F., Sulaima M.F., Arif R.M., Yusof R.A., Kadir A.F.A., Baharom M.F. A power distribution network restoration via feeder reconfiguration by using EPSO for losses reduction. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*. 2015, vol. 79, no. 2, pp. 346-350.
2. Rajabi-Ghahnavieh A., Fotuhi-Firuzabad M., Othman M. Optimal unified power flow controller application to enhance total transfer capability. *IET Gener. Transm. Distrib.* 2015, vol. 9, iss. 4, pp.358-368.
3. Wedeward K., Adkins C., Schaffer S., Smith M., Patel A. Inventory of load models in electric power systems via parameter estimation. *Engineering Letters*. 2015, vol. 23, iss.1, p.20-28.
4. Zhelezko Y.S. *Vybor meropriyatiy po snizheniyu poter elektroenergii v elektricheskikh setyakh* [Choice of Measures to Reduce Energy Losses in Electric Networks]. Moscow, Energoatomisdat Publ., 1989. 176 p.
5. Kazantsev V.N. *Poteri elektroenergii v elektricheskikh setyakh* [Energy Losses in Electric Networks]. Moscow, Energoatomisdat Publ., 1983. 368 p.
6. Pospelov G.E., Sych N.M. *Poteri moschnosti i energii v elektricheskikh setyakh* [Power and Energy Losses in Electric Networks]. Moscow, Energoizdat Publ., 1981. 216 p.
7. Potrebich A.A. Methods for Calculating Energy Losses in Electric Networks of Power Supply. *Elektrichestvo* [Electricity], 1995, no. 8, pp.8-12. (In Russian)
8. The Russian Federation. *Metodika rascheta normativnykh (tekhnologicheskikh) poter' elektroenergii v elektricheskikh setyakh* [Method of calculation of normative (technological) losses of electric power in electric networks]. Appendix no.1 to the instructions eV. Russian Ministry of Justice no.13314 from 12.02.2009. ATP "Consultant Plus"
9. The Russian Federation. *Ob utverzhdenii metodiki rascheta normativnykh (tekhnologicheskikh) poter' elektroenergii v elektricheskikh setyakh* [Approval of the methodology for calculating regulatory (technological) power losses in electric networks]. Order of the Ministry of Energy of the Russian Federation from 03.02.2005 no. 21. ATP "Consultant Plus".
10. Peyzel' V.M., Stepanov A.S. Calculation of Technical Energy Losses in Distribution Electric Networks using AMR and ADCS information. *Elektrichestvo* [Electricity], 2002, no.3, pp.10-15. (In Russian)
11. Tsyruk S.A., Kosharnaya Yu.V., Evgrafov S.A. et al. Load Effect on the Level of Sub-consumers of Electricity Losses in Networks of Electricity Supplying Companies. *Promyshlennaya energetika* [Industrial Power Engineering], 2010, no. 8, pp. 9-15. (In Russian)
12. Zhelezko Yu.S., Artem'ev A.V., Savchenko O.V. *Raschet, analiz i normirovanie poter elektroenergii v elektricheskikh setyakh* [Calculation, Analysis and Regulation of Electricity Losses in Electrical Networks]. Moscow, Publishing House of the NTs ENAS, 2003. 280 p.
13. Malafeev A.V., Yagol'nikova E.B., Savinova G.Yu., Antonenko A.A. Algorithm for Calculating the Contribution to Standby Losses of Active Power of Consumers Outside of the Industrial Enterprise using the OJSC "MMK" as an Example. *Glavnyy energetik* [Chief Power Engineer], 2012, no.4, pp.50-54. (In Russian)
14. The Russian Federation. *Ob organizatsii v Ministerstve energetiki Rossiyskoy Federatsii raboty po utverzhdeniyu normativov tekhnologicheskikh poter' elektroenergii pri ee peredachi po elektricheskim setyam* [The Ministry of Energy of the Russian Federation project concerning the standards of power losses during its transmission through electric grids]. Order of the Ministry of Energy of Russia from 30.12.2008 number 326. ATP "Consultant Plus".

Ягольникова Е.Б., Рудаков Н.А., Шошин М.А. Расчет и анализ составляющих потерь электроэнергии на примере ОАО «ММК» // Электротехнические системы и комплексы. 2016. №4(33). С.25-28. doi: 10.18503/2311-8318-2016-4(33)-25-28

Yagol'nikova E.B., Rudakov N.A., Shoshin M.A. Calculation and Analysis of Components of Power Loss Using JSC "MMK" as an Example. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2016, no.4(33), pp.25-28. (In Russian). doi: 10.18503/2311-8318-2016-4(33)-25-28

Варганов Д.Е.¹, Варганова А.В.², Баранкова И.И.²

¹ООО «ЮГРАЭНЕРГО»

²ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»

ПРИМЕНЕНИЕ ЭКОНОМИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ГАЗОПОРШНЕВЫХ УСТАНОВОК С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ЭНЕРГОУЗЛОВ С ИСТОЧНИКАМИ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИИ

В работе рассмотрен вопрос разработки и построения моделей газопоршневых установок, работающих на природном газе, с использованием структурно-функционального прикладного метода экономико-математического моделирования и представляющих собой зависимость затрат на природный газ от мощности, вырабатываемой на клеммах источника электрической энергии. При моделировании установок учтен фактор изменения цен на первичный энергоноситель для периода с 2014 по 2020 гг. в виде коэффициента инфляции. Модели построены для трех периодов: по состоянию цен на 2014, 2018 и 2020 г. и адаптированы для оптимизации эксплуатационных режимов энергоузлов с источниками малой генерации. Алгоритм оптимизации разработан с применением частного случая принципа Беллмана (метода динамического программирования) и реализован в оригинальном программном продукте «КАТРАН».

Ключевые слова: газопоршневая установка, оптимальный эксплуатационный режим, когенерационная энергетическая установка, энергоузел, система электроснабжения, выработка электроэнергии, источник распределенной генерации.

ВВЕДЕНИЕ

Крупные промышленные предприятия характеризуются сложной системой электроснабжения с различными генерирующими источниками: турбогенераторами, парогазовыми, газотурбинными и газопоршневыми установками. Для управления такими системами более эффективно применяются различные способы; например, с целью сокращения потерь мощности в распределительных сетях устанавливаются компенсирующие устройства [1]. В работе [2] учитывается влияние электромагнитной совместимости электроприемников с резкопеременной нагрузкой.

Применение методов оптимизации с целью повышения эффективности работы электроэнергетических систем и систем электроснабжения является одним из способов решения данной задачи. В статьях [3, 4] рассматриваются вопросы применения алгоритма оптимизации, разработанного с использованием математического ожидания двойственных оценок и позволяющего оценивать балансовую надежность электроэнергетических систем. В [5, 6] приведена методика определения рациональных нагрузок генераторов электроэнергетических систем с применением метода декомпозиции узловых цен. Исследуются также и проблемы внутристанционной оптимизации нагрузок генерирующих установок ГРЭС на примере Березовской ГРЭС [7] с использованием эквивалентных энергетических характеристик рассматриваемых электростанций.

Автором работы [8] приведены оптимизационные модели тепловых электростанций, входящих в электроэнергетическую систему, в качестве критерия оптимизации выбрано «...равенство относительных приростов расхода топлива на выработку активной мощности...». Внедрение разработанных моделей позволяет экономить до 2000 т у.т./г. В [9] рассмотрен подход оптимизации источников электроэнергии электроэнергетических систем, позволяющий управлять рациональным

потреблением энергетических ресурсов.

Для оптимизации режимов электрических сетей применяются методы, основанные, например, на эволюционном алгоритме [10]. Другие подходы приведены в [11-14]. Рассматриваются вопросы оптимального управления в системах Smart Grid [15] и сетях сельскохозяйственных предприятий [16].

Описанные подходы в основном ориентированы на повышение эффективности функционирования источников электроэнергии систем и слабо отражают все принципиально важные отличия систем электроснабжения промышленных предприятий, а именно наличие электроприемников с резкопеременной нагрузкой, короткие линии напряжением от 6 до 220 кВ, наличие собственных электростанций с разнородными генераторами. Данные особенности учтены при применении подхода, описанного в [17]. Алгоритм оптимизации основан на методе динамического программирования и методе последовательного эквивалентирования [18].

Основными исходными данными для оптимизации являются модели генераторов, представляющие собой зависимость себестоимости массового расхода топлива от мощности на его клеммах.

Однако разработанные модели ориентированы на турбогенераторы, которые в основном были установлены на электростанциях в середине прошлого века и характеризуются повышенной степенью износа. Для сохранения собственных мощностей на площадках предприятий устанавливают быстровводимые в эксплуатацию газопоршневые, парогазовые и газотурбинные установки, работающие на природном газе или на вторичных (например, коксовом или доменном). С целью оптимизации режимов работы систем электроснабжения с такими установками необходимо осуществить их моделирование.

ЭКОНОМИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ГАЗОПОРШНЕВЫХ УСТАНОВОК

Технико-экономические модели (ТЭМ) установок распределенной генерации представляют собой зави-

симость мощности на клеммах генератора от себестоимости вырабатываемой электрической энергии. Расчет таких моделей начинается с изучения конструкции и технических характеристик генераторов. ТЭМ данных источников электроэнергии можно записать в виде математического выражения

$$S_i(P_i) = \frac{\beta \cdot B_i}{3600 \cdot P_i}, \quad (1)$$

где S_i – себестоимость электроэнергии, руб./МВт·ч; β – тариф на используемый энергетический ресурс, руб./тыс. м³, природный газ (ПГ) 2706,51 руб./тыс. м³; B_i – удельный расход топлива, тыс. м³/МВт·ч; P_i – активная мощность генератора, МВт.

В паспортных данных газопоршневых установок приведены величины удельного расхода топлива на производство одного 1 кВт в кДж, данную величину необходимо привести к единицам измерения используемого топлива, с целью упрощения дальнейших расчетов и исключения ошибок при приведении к одинаковым единицам измерения массового расхода различных видов топлива с разной калорийностью. На рассматриваемых установках это природный газ: 1 тыс. м³ природного газа = 1/34000000 кДж.

Для исследуемого объекта когенераторные электростанции имеют единичную электрическую мощность 10 МВт с установкой на них автономных газопоршневых установок *Wartsila*, вырабатывающих также пар низкого давления и горячую воду. Общий коэффициент использования топлива достигает 90%. Станции обладают высокой рабочей эффективностью – КПД составляет ~40-45 %. Когенерационные электростанции *Wartsila* приспособлены для работы на различных газообразных видах топлива и жидких топливных компонентах, включая биотопливо. Электростанции имеют достаточно низкие выбросы в своем классе. Основные номинальные параметры рассматриваемой газопоршневой установки (модель 20V34SG) согласно [19]: мощность электрическая - 9730 кВт; КПД электрический - 46,3 %; удельный расход топлива - 7779 кДж/кВт·ч. Для газопоршневой установки мощностью 10 МВт производства корпорации *Wartsila* (Финляндия) удельный расход топлива является величиной постоянной и составляет 7779 кДж/кВт·ч. Таким образом, согласно (1)

$$S_i(P_i) = \frac{7779000 \cdot 2706,51}{34000000 \cdot 1 \cdot 3600};$$

$$S_i(P_i) = \frac{0,172}{1} = 0,172 \text{ руб./МВт} \cdot \text{ч.}$$

На основании паспортных данных максимальная мощность, которую может вырабатывать данная установка, составляет 10 МВт, а согласно заданию потребителя минимальная мощность – 6 МВт.

Кроме того, так как исследования проводятся и для перспективных схем, то при расчете моделей для 2018 и 2020 гг. необходимо учесть величину инфляции.

Согласно данным, приведенным на сайте [20], среднегодовой уровень инфляции за последние пять лет составит примерно 8 %, таким образом, величину стоимостных показателей энергоресурсов необходимо

увеличить на 32 %, а на 2020 г. – на 48 % относительно цен 2014 г. Таким образом, расчетные модели газопоршневых установок будут иметь вид, представленный в **таблице**.

Программно-вычислительный комплекс преобразует данные модели к виду, представленному на **рис. 1**.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ В УСЛОВИЯХ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С ИСТОЧНИКАМИ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИИ

Рассматривалась система электроснабжения с внешними источниками и газопоршневыми установками, схема сети которой разработана в ПВК «КАТ-РАН» (**рис. 2**).

В результате оптимизационных расчетов, выполненных с использованием оригинального алгоритма, описанного в [18, 21] и реализованного в ПВК «КАТ-РАН» [22], построены оптимальные карты мощностей газопоршневых установок фирмы *Wartsila*, представленные на **рис. 3-4** и отражающие экономически целесообразные загрузки установок (P_r) от мощности, приобретаемой из системы ($\Sigma P_{\text{сист}}$).

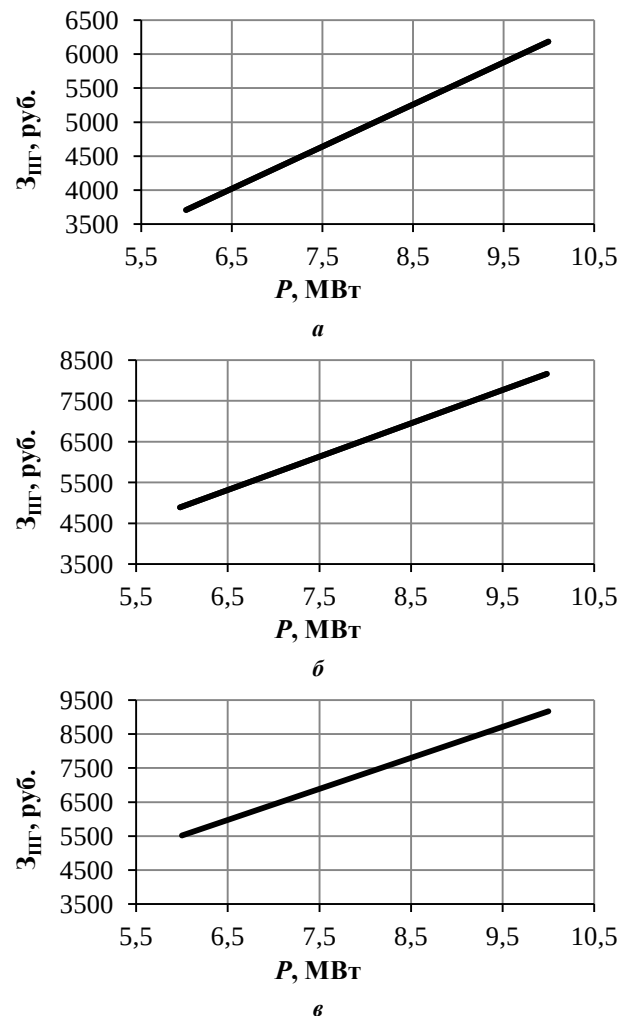


Рис. 1. Техничко-экономические модели газопоршневой установки 10 МВт производства корпорации *Wartsila* с учетом цен 2014 г. (а), 2018 г. (б) и 2020 г. (в)

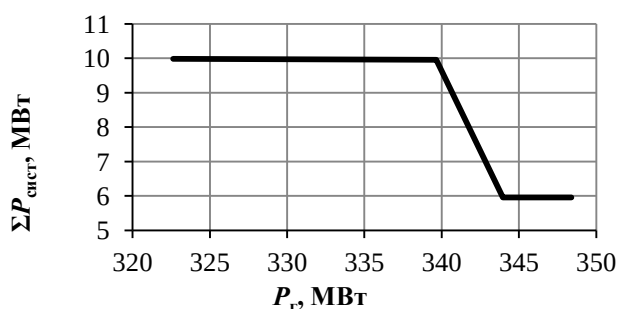


Рис. 4. Зависимость мощности на клеммах установки Г 2 от мощности, принимаемой из системы

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные зависимости являются наглядными исходными данными для разработанного алгоритма оптимизации, позволяют в полной мере отразить все технические ограничения по работе установок, одновременно включая в себя экономическую составляющую, связанную с расчетом себестоимости электроэнергии. Кроме того, рассчитанные модели учитывают прогнозные изменения стоимости энергоносителей с использованием среднегодового коэффициента инфляции за последние 5 лет.

Рассчитанные оптимальные диаграммы мощностей источников распределенной генерации единичной мощностью 10 кВт производства Wartsila с использованием ПВК «КАТРАН», представляющие собой зависимость мощности на клеммах генератора от мощности, принимаемой из системы, позволяют для существующей и перспективных рассматриваемых схем определять рекомендуемые мощности установок распределенной генерации, полученные по критерию минимума суммарных затрат на первичный энергоноситель, в данном случае природный газ.

В результате оценки эффективности внедрения результатов работы улучшение показателей в среднем возрастает на 1,46% [23-26].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Компенсирующие устройства в системах промышленного электроснабжения / Г.П. Корнилов, А.С. Карандаев, А.А. Николаев, А.Н. Шеметов и др. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2012. 235 с.
2. Корнилов Г.П., Шеметов А.Н., Осипов А.В. Современные проблемы электромагнитной совместимости в системах электроснабжения с резкопеременными и нелинейными нагрузками // Изв. вузов. Электромеханика. 2006. №4. С. 89-93.
3. Крупнев Д.С., Пержабинский С.М. Алгоритм оптимизации надёжности электроэнергетических систем с использованием математического ожидания двойственных оценок // Управление большими системами: сборник трудов. 2015. № 54. С. 166-178.
4. Крупнев Д.С., Пержабинский С.М. Алгоритм оптимизации балансовой надёжности электроэнергетических систем // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2014. № 2. С. 96-106.
5. Васьковская Т.А. Новая декомпозиция узловых цен на вклады ценообразующих заявок при оптимизации режимов электрических систем // Электричество. 2015. №7. С. 21-31.
6. Vaskovskaya T.A. Possibility of controlling nonregulated prices in the electricity market by means of varying the parameters of a power system // Thermal Engineering. 2014,

- no.13, pp.977-980.
7. Щербич В.И., Щербич Е.А., Радченко В.А. Программы оптимизации распределения нагрузок между энергоблоками и расчета эквивалентной энергетической характеристики Березовской ГРЭС // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. Энергетика. 2013. № 2. С. 57-69.
8. Питолин В.Е. Применение имитационной модели для оптимизации параметров тепловой электростанции в составе энергосистемы // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С: Фундаментальные науки. 2013. №4. С. 40-45.
9. Bakunov R.R., Mechonoshin A.S. Structure optimization of power resources management systems // Инновационные процессы в исследовательской и образовательной деятельности. 2013. №1. С. 20-22.
10. Борисов Г.А., Кукин В.Д. Эволюционный алгоритм оптимизации распределительной электрической сети // Ученые записки петрозаводского государственного университета. Серия: естественные и технические науки. 2012. №2. С. 67-70.
11. Фурсанов М.И. Введение в оптимизацию разомкнутых электрических сетей по дискретным параметрам // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. Энергетика. 2012. № 3. С. 13-22.
12. Meta-heuristics optimization algorithms in engineering, business, economics, and finance / Voropai N.I., Gamm A.Z., Glazunova A.M., Etingov P.V., Kolosok I.N., Korkina E.S., Kurbatsky V.G., Sidorov D.N., Spiryaev V.A., Tomin N.V., Zaika R.A., Bat-Undraal B. 2012. 615 p.
13. Voropai N.I., Zorkaltsev V.I. Optimization models and methods developed at the energy systems institute // International journal of energy optimization and engineering. 2013, no.4, pp. 1-15.
14. Marinović M., Makajić-Nikolić D., Stanojević M. Optimization in day-ahead planning of energy trading // Journal of applied engineering science. 2013, no.4, pp. 201-208.
15. Sokolnikova T.V. Energy storage modeling and optimization for Smart Grid // Res electricae magdeburgenses. 2012, pp. 91-99.
16. Математическое моделирование задач оптимизации автоматизированного управления деятельностью энергетических служб сельскохозяйственных предприятий / В.Я. Хорольский, В.Г. Жданов, Е.А. Логачева. Ставрополь: ООО «Ветеран», 2014. 116 с.
17. Varganova A.V., Panova E.A., Kurilova N.A., Nasibullin A.T. Mathematical modeling of synchronous generators in out-of-balance conditions in the task of electric power supply systems optimization 2015 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS), Tomsk, Russia, 2015. Available at: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?tp=&arnumber=7414907&url=http3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fstamp%2Fstamp.jsp%3Ftp%3D%26arnumber%3D7414907>.
18. Оптимизация установившихся режимов промышленных систем электроснабжения с разнородными генерирующими источниками при решении задач среднесрочного планирования / А.В. Малафеев, А.В. Кочкина, В.А. Игumenцев, Д.Е. Варганов, А.Д. Ковалев. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2013. 112 с.
19. Wartsila.com: Официальный сайт Wärtsilä Oyj Abp' [Электронный ресурс]. Финляндия. Режим доступа: <http://www.wartsila.com>, свободный.
20. Уровень-инфляции.рф [Электронный ресурс]. Российская Федерация. Режим доступа: уровень-инфляции.рф, свободный.
21. Кочкина А.В. Применение метода динамического программирования для решения задач оптимального распределения активных мощностей между разнородными ге-

- нерирующими источниками собственных электростанций предприятий черной металлургии // Наука и производство Урала. 2012. № 8. С. 204-209.
22. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ «Программа для ЭВМ «Комплекс автоматизированного режимного анализа КАТРАН 7.0» RU 2013616847 / В.А. Игуменцев., А.В. Малафеев, О.В. Газизова, Ю.Н. Кондрашова, А.В. Кочкина, Е.А. Панова. №2013616847, Бюл. № 3.
 23. Построение технико-экономических моделей турбогенераторов и котлоагрегатов собственных электростанций промышленных предприятий / А.В. Кочкина, А.В. Малафеев, Н.А. Курилова, Р.П. Нетупский // Электротехнические системы и комплексы. 2013. № 21. С. 247-252.
 24. Панова Е.А., Савельева К.С., Кочкина А.В. Оценка допустимости режимов работы синхронных генераторов собственных электростанций промышленных предприятий при поэтапном ремонте электрооборудования питающих сетей в нормальном и оптимальном режимах // Электротехнические системы и комплексы. 2013. № 21. С. 214-220.
 25. Методика оптимизации эксплуатационных режимов промышленных систем электроснабжения / А.В. Кочкина, А.В. Малафеев, Д.Е. Варганов, Н.А. Курилова, И.А. Дубина // Электротехнические системы и комплексы. 2014. № 3 (24). С. 49-53.
 26. Варганов Д.Е., Варганова А.В. Расчет себестоимости свежего пара на крупных тепловых промышленных электростанциях // Электротехнические системы и комплексы. 2016. № 1 (30). С. 24-28.

Поступила в редакцию 19 июня 2016 г.

INFORMATION IN ENGLISH

APPLICATION OF ECONOMIC AND MATHEMATICAL MODELS OF GAS RECIPROCATING UNIT TO IMPROVE OPERATIONAL EFFICIENCY OF POWER CENTER WITH DISTRIBUTED GENERATION SOURCES

Dmitriy E. Varganov

Project engineer, LLC "YUGRAENERGO", Magnitogorsk, Russia.

Aleksandra V. Varganova

Assistant Professor, Industrial Power Supply Systems Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Inna I. Barankova

D.Sc. (Eng.), Associate Professor, Informatics and Information Security Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

The article considers the issues of gas reciprocating unit modeling using the structural and functional applied approach of economic and mathematical modeling. Generator simulator taking into account the changing price factor (rate of inflation) of energy supplies for the period from 2014 to 2020. Model development was made for three periods: 2014, 2018, 2020 yrs. and was adopted for optimization of power supply system conditions with distributed generation sources. The optimization algorithm is focused on the special case of Bellman approach (dynamic programming method) and made in the form of software program KATRAN.

Keywords: Gas reciprocating unit, optimal power supply system condition, combined heat production unit, power center, power-supply system, generation, distributed generation source.

REFERENCES

1. Kornilov G.P., Karandaev A.S., Nikolaev A.A., Shemetov A.N. et al. *Kompensiruyushchie ustroystva v sistemakh promyshlennogo elektrosnabzheniya* [Reactive Power Compensators in Industrial Power Supply Systems]. Nosov Magnitogorsk State Technical University Publ., 2012. 235 p.
2. Kornilov G.P., Shemetov A.N., Osipov A.V. Modern Problems in Electromagnetic Tolerance of Power Systems with Abruptly Variable and Nonlinear Load. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika* [Scientific and Technical Journal. Russian Electromechanics], 2006, no. 4, pp. 89-93. (In Russian)
3. Krupenev D.S., Applying Average Dual Estimations in Algorithm for Optimal Reliability of Electric Power System. *Upravlenie bol'shimi sistemami* [Large-Scale Systems Control], 2015, no. 54, pp. 166-178. (In Russian)
4. Krupenev D.S., Perzhabinskii S.M. Adequacy Optimization Algorithm of Electric Power Systems. *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Energetika* [Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Energy], 2014, no. 2, pp. 96-106. (In Russian)
5. Vaskovskaya T.A. New Decomposition of Price on Deposits of Price Forming Request in Power System Optimization. *Elektrichestvo* [Electrical Technology Russia], 2015, no.7, pp. 21-31. (In Russian)
6. Vaskovskaya T.A. Possibility of controlling nonregulated prices in the electricity market by means of varying the parameters of a power system. *Thermal Engineering*. 2014, no.13, pp.977-980.
7. Shcherbich V., Shcherbich E., Radchenko V. Programs for Optimization of Load Distribution between Power Plants and Calculation of Equivalent Energy Characteristics of Beryozovskaya GRES. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy i energeticheskikh ob"edineniy SNG. Energetika* [Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations], 2013, no.2, pp.57-69. (In Russian)
8. Pitolin V. Application of Imitating Model for Optimization of Parameters of Thermal Power Plant in the Structure of Electric power system. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo*

- universiteta. Seriya S: Fundamental'nye nauki [Herald of Polotsk state University. Series C: basic science], 2013, no.4, pp. 40-45. (In Russian)
9. Bakunov R.R., Mechonoshin A.S. Structure Optimization of Power Resources Management Systems. *Innovatsionnye protsessy v issledovatel'skoy i obrazovatel'noy deyatel'nosti* [Innovation processes in research and educational activities], 2013, no. 1, pp. 20-22.
 10. Borisov G.A., Kukin V.D. Evolutionary Algorithm for Optimization of Power Distribution Network. *Uchenye zapiski petrozavodskogo gosudarstvennogo uni-versiteta. Seriya: estestvennye i tekhnicheskie nauki* [Proceedings of Petrozavodsk state university], 2012, no. 2, pp. 67-70. (In Russian)
 11. Fursanov M. Introduction in Optimization of Open Electrical Circuits for Discrete Parameters. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy i energeticheskikh ob"edineniy SNG. Energetika* [Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations], 2012, no. 3, pp. 13-22. (In Russian)
 12. Meta-heuristics optimization algorithms in engineering, business, economics, and finance / Voropai N.I., Gamm A.Z., Glazunova A.M., Etingov P.V., Kolosok I.N., Korkina E.S., Kurbatsky V.G., Sidorov D.N., Spiryayev V.A., Tomin N.V., Zaika R.A., Bat-Undraal B. 2012. 615 p.
 13. Voropai N.I., Zorkaltsev V.I. Optimization models and methods developed at the energy systems institute. *International journal of energy optimization and engineering*. 2013, no.4, pp. 1-15.
 14. Marinović M., Makajić-Nikolić D., Stanojević M. Optimization in day-ahead planning of energy trading. *Journal of applied engineering science*. 2013, no.4, pp. 201-208.
 15. Sokolnikova T.V. Energy storage modeling and optimization for Smart Grid. *Res electricae magdeburgenses*. 2012, pp.91-99.
 16. Khorol'skiy V.Ya. , Zhdanov V.G. , Logacheva E.A. *Matematicheskoe modelirovanie zadach optimizatsii avtomatizirovannogo upravleniya deyatel'nost'yu energeticheskikh sluzhb sel'skokhozyaystvennykh predpriyatiy* [Mathematical modeling of optimization task of activity energy service commercial unit automated control]. Stavropol, LLC Veteran Publ., 2014. 116 p.
 17. Varganova A.V., Panova E.A., Kurilova N.A., Nasibullin A.T. Mathematical modeling of synchronous generators in out-of-balance conditions in the task of electric power supply systems optimization 2015 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS), Tomsk, Russia, 2015. Available at: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?tp=&arnumber=7414907&url=http3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fstamp%2Fstamp.jsp%3Ftp%3D%26arnumber%3D7414907>.
 18. Malafeev A.V., Kochkina A.V., Igumenshchev V.A., Varganov D.E., Kovalev A.D. *Optimizatsiya ustanovivshikhsya rezhimov promyshlennykh sistem elektrosnabzheniya s raznorodnymi generiruyu-shchimi istochnikami pri reshenii zadach srednesrochnogo planirovaniya* [Optimization of Steady-State of Power System With Diverse Generating Sources for Task Intermediate-Term Planning]. Magnitogorsk, Nosov Magnitogorsk State Technical University Publ., 2013. 112 p.
 19. Wartsila.com: *Wärtsilä Oyj Ab*. Finland. Available at: <http://www.wartsila.com>.
 20. Уровень-инфляции.рф. Russian Federation. Available at: [Уровень-инфляции.рф](http://уровень-инфляции.рф).
 21. Kochkina A.V. Application of Dynamic Programming to Solve Optimum Distribution of Power Between the Heterogeneity of Auxiliary Power Generation Source of Ferrous Metallurgy Enterprises. *Nauka i proizvodstvo Urala* [Science and Production of the Ural], 2012, no.8, pp. 204-209. (In Russian)
 22. Igumenshchev V.A., Malafeev A.V., Gazizova O.V., Kondrashova Yu.N., Kochkina A.V., Panova E.A. KATRAN 7.0. State Registration Certificate of Software Application. RU 2013616847, no.2013616847, 2013.
 23. Kochkina A.V., Malafeev A.V., Kurilova N.A., Netupskiy R.P. Turbo-generator and boiler techno-economic models obtaining of industrial power plant. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2013, no. 21, pp. 247-252. (In Russian)
 24. Panova E.A., Savel'eva K.S., Kochkina A.V. Evaluation of operation acceptability of the industrial enterprises domestic power plants synchronous generators in case of electric equipments' incremental repair of the subtransmission network under normal and optimum operation condition. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2013, no. 21, pp. 214-220. (In Russian)
 25. Kochkina A.V., Malafeev A.V., Varganov D.E., Kurilova N.A., Dubina I.A. Optimization methodology of industrial electrical power systems operating condition. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2014, no. 3 (24), pp. 49-53. (In Russian)
 26. Varganov D.E., Varganova A.V. Cost callculation of working steam in terms of industrial thermal power stations. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2016, no. 1 (30), pp. 24-28. (In Russian)

Варганов Д.Е., Варганова А.В., Баранкова И.И. Применение экономико-математических моделей газопоршневых установок с целью повышения эффективности работы энергоузлов с источниками распределенной генерации // *Электротехнические системы и комплексы*. 2016. №4(33). С.29-34. doi: 10.18503/2311-8318-2016-4(33)-29-34

Varganov D.E., Varganova A.V., Barankova I.I. Application of Economic and Mathematical Models of Gas Reciprocating Unit to Improve Operational Efficiency of Power Center with Distributed Generation Sources. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2016, no.4(33), pp.29-34. (In Russian). doi: 10.18503/2311-8318-2016-4(33)-29-34

Панова Е.А.¹, Альбрехт А.Я.²

¹ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»

²ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат»

УТОЧНЕННЫЕ УДЕЛЬНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ДВУХЦЕПНЫХ ЛЭП 110 кВ ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ

При устранении повреждений на воздушных линиях электропередачи важным является точное дистанционное определение места повреждения (ОМП), ведь именно от него будет зависеть время, затраченное выездной бригадой на осмотр линии и обнаружение причины её отключения. Наибольшую сложность представляет дистанционное обнаружение однофазных коротких замыканий, которые, в свою очередь, являются наиболее частыми видами повреждений в сетях с эффективно заземленной нейтралью. Для точного дистанционного ОМП по параметрам аварийного режима необходимо выполнение серии расчетов режима однофазного короткого замыкания, что требует использования математических моделей линий электропередачи (ЛЭП), учитывающих электростатическое и электромагнитное взаимодействие их проводящих элементов, а также конфигурацию опор. Наиболее простым способом является использование справочных значений удельных электрических параметров ЛЭП, которые рассчитаны с учетом ограничения использования сечений проводов по уровням напряжения. В системах электроснабжения промышленных предприятий нередки случаи, когда провода сечением 300 мм² используются в распределительных сетях 110 кВ, тогда как в справочной литературе их удельные параметры приведены только для уровня напряжения 220 кВ, т.е. определены при больших габаритах опоры. Также в справочной литературе отсутствуют удельные электрические параметры для схемы замещения нулевой последовательности, что необходимо для расчета режима однофазного короткого замыкания. Другим способом определения этих величин является использование руководящих указаний по расчету токов короткого замыкания для релейной защиты, но в данном документе отсутствуют выражения для определения удельных параметров двухцепной ЛЭП с одним грозозащитным тросом. Кроме того, выполнение данных расчетов «вручную» занимает значительное время, что недопустимо при авариях. Авторами предложены расчетные выражения для определения удельных сопротивлений и емкостной проводимости симметричных составляющих двухцепной ЛЭП с одним грозотросом, а также рассчитаны указанные величины для различных сечений проводников и среднегеометрического расстояния между фазами. Результаты работы могут быть использованы при составлении таблиц ОМП.

Ключевые слова: определение места повреждения, линия электропередачи, однофазное короткое замыкание, взаимная индуктивность, фазная емкость, удельное сопротивление, математическая модель, система электроснабжения, зеркальное изображение, симметричные составляющие.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из наиболее распространенных способов моделирования линий электропередачи различного класса напряжения является задание их удельным активным и индуктивным сопротивлением, а также удельной емкостной проводимостью. Такой подход используется в первую очередь для расчета параметров установившегося режима [1, 2]. Однако при решении задачи ОМП при однофазных коротких замыканиях он не дает необходимую точность. Во-первых, это связано с усреднением среднегеометрического расстояния между фазными проводами, т.е. отсутствием учета фактических геометрических характеристик опоры. Во-вторых, это обусловлено тем, что удельные сопротивления и проводимости проводов сечением 300 и 330 мм² рассчитаны только для среднегеометрического расстояния 8 м, что соответствует их использованию в сети напряжением 220 кВ. Учитывая, что провода данного сечения широко используются в сети 110 кВ, где среднегеометрическое расстояние между фазами составляет от 4 до 7 м, применение справочных данных даст завышенное значение сопротивления линии.

Также для ОМП широко используются аппаратные средства, описанные, например, в [3-5]. Их очевидным недостатком является высокая стоимость (от 70 до 500 тыс. руб. [3]).

Наиболее простым и точным является способ дис-

танционного определения места повреждения по параметрам аварийного режима (ПАР). Данный метод опирается на теорию расчета токов короткого замыкания, однако для решения задачи ОМП недопустимо использовать допущения, обычно применяемые при расчетах (например, пренебрежение поперечной емкостной проводимостью линий) [6].

Расчет ПАР основывается на математической модели системы электроснабжения, разработке которой посвящено большое число работ, однако они в основном направлены на решение обратной задачи, т.е. определение параметров схемы замещения по известным ПАР [7-9]. Данные алгоритмы реализуются в основном в устройствах ОМП.

Алгоритмы ОМП постоянно уточняются и совершенствуются. В первую очередь это касается уточнения схемы замещения, а также алгоритмов расчета [10-13].

В данной работе предлагаются расчетные выражения для определения удельных электрических параметров двухцепной ЛЭП с одним грозозащитным тросом, применимые в задаче ОМП при однофазных КЗ на линиях напряжением 110 кВ и выше. Предлагаемые выражения основаны на действующих руководящих указаниях [14], а также на работах авторов [15-22].

СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ ПРЯМОЙ И ОБРАТНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ

В соответствии с [14] параметры схемы замещения прямой последовательности определяются одинаково

для любой конфигурации опоры и, таким образом, будут зависеть только от марки провода, расстояния между фазами и высотой подвеса фазных проводов.

Удельное продольное сопротивление прямой последовательности определяется следующим образом:

$$\dot{Z}_{1(2)} = r_n + r_3 + j0,145 \cdot \lg \frac{D_3}{\rho_{3,п}}, \quad (1)$$

где r_n – активное сопротивление провода, Ом/км; r_3 – сопротивление, учитывающее потери активной мощности в земле от протекающего в ней тока (0,15 Ом/км); D_3 – эквивалентная глубина расположения обратного провода (935 м); $\rho_{3,п}$ – эквивалентный радиус провода, учитывающий наличие внутреннего магнитного поля провода, м.

В свою очередь эквивалентный радиус сталеалюминиевого провода

$$\rho_{3,п} = 0,95 \cdot \rho_n, \quad (2)$$

где ρ_n – фактический радиус провода, м.

Для определения поперечной емкости Руководящими указаниями [14] рекомендуется использовать метод зеркальных изображений. Согласно этому методу земля рассматривается как поверхность с нулевым потенциалом, поэтому можно ввести так называемые «зеркальные изображения» проводов, т.е. фиктивные провода, расположенные под землей на глубине, равной высоте их подвеса. Потенциалы проводников связаны с их зарядами через потенциальные коэффициенты, которые определяются

$$\begin{aligned} \alpha_{ii} &= 41,4 \cdot 10^6 \cdot \lg \frac{S_{ii}}{\rho_n}; \\ \alpha_{ij} &= 41,4 \cdot 10^6 \cdot \lg \frac{S_{ij}}{D_{ij}}, \end{aligned} \quad (3)$$

где индексы $i, j = A, B, C, T, T'$; S_{ii} – расстояние между проводом или тросом и его зеркальным изображением; S_{ij} – расстояние между проводом или тросом i и зеркальным изображением провода или троса j ; D_{ij} – расстояние между проводами или тросами.

В (3) индекс ii относится к собственным потенциальным коэффициентам (α_c), индекс ij – к взаимным ($\alpha_{вз}$).

Емкость прямой последовательности линии электропередачи, Ф/км.

$$C_{1(2)} = \frac{1}{\alpha_c - \alpha_{вз}} = \frac{0,0241 \cdot 10^{-6}}{\lg \frac{D_{cp} \cdot S_L}{\rho_n \cdot S_M}}, \quad (4)$$

где D_{cp} – среднегеометрическое расстояние между фазами; S_L – среднегеометрическое расстояние между проводом и его зеркальным изображением; S_M – среднегеометрическое расстояние между проводом одной фазы и зеркальным изображением другой.

$$\begin{cases} D_{cp} = \sqrt[3]{D_{AB} \cdot D_{BC} \cdot D_{AC}}; \\ S_L = \sqrt[3]{S_{AA} \cdot S_{BB} \cdot S_{CC}}; \\ S_M = \sqrt[3]{S_{AB} \cdot S_{AC} \cdot S_{BC}}. \end{cases} \quad (5)$$

Зная емкость прямой последовательности линии, нетрудно определить её удельную емкостную проводимость, См/км

$$b_{c1(2)} = 2\pi \cdot f \cdot C_{1(2)}. \quad (6)$$

СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ

Данная работа посвящена математическому моделированию двухцепных линий электропередачи с одним грозозащитным тросом. Опоры указанного типа широко используются в сетях 110 кВ систем электроснабжения промышленных предприятий. Однако для линий такой конфигурации в действующих Руководящих указаниях [14] отсутствуют расчетные выражения для определения удельных электрических параметров схемы замещения нулевой последовательности (продольного индуктивного сопротивления и поперечной емкостной проводимости).

Схема двухцепной ЛЭП, а также её схема замещения для токов нулевой последовательности приведена на рис. 1.

Так как для расчетов параметров аварийного режима предлагается использовать Т-образную схему замещения, то схема на рис. 1, б должна быть преобразована в эквивалентное продольное сопротивление:

$$\dot{Z}_0^{(T)} = \frac{\left(\dot{Z}_{0I}^{(T)}\right)^2 \dot{Z}_{0II}^{(T)} + \left(\dot{Z}_{0II}^{(T)}\right)^2 \dot{Z}_{0I}^{(T)} + 4\dot{Z}_{0I}^{(T)} \dot{Z}_{0II}^{(T)} \dot{Z}_{0I}^{(T)}}{2\left(\frac{\dot{Z}_{0I}^{(T)}}{2} + \frac{\dot{Z}_{0II}^{(T)}}{2} + 2\dot{Z}_{0I}^{(T)}\right)\left(\dot{Z}_{0I}^{(T)} + \dot{Z}_{0II}^{(T)}\right)}, \quad (7)$$

где собственное сопротивление первой цепи

$$\dot{Z}_{0I}^{(T)} = \dot{Z}_{0II}^{(T)} - \frac{\dot{Z}_{0IT}^2}{\dot{Z}_{0T}}; \quad (8)$$

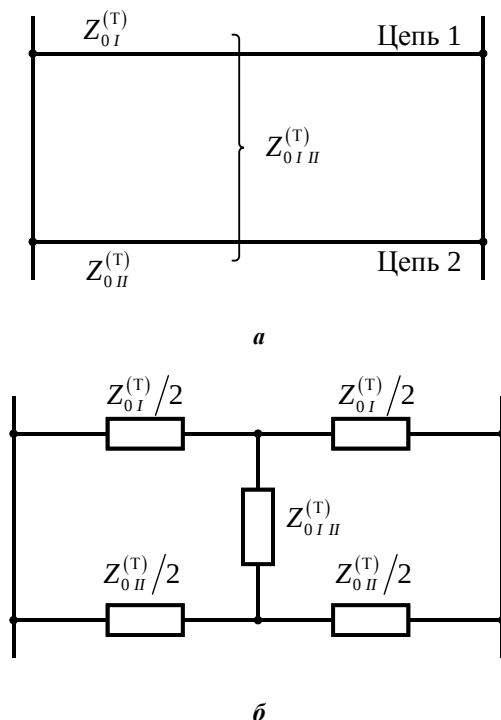


Рис. 1. К определению продольного сопротивления ЛЭП

сопротивление второй цепи определяется по (8) с индексами II вместо I;
взаимное сопротивление цепей

$$\dot{Z}_{0I II}^{(T)} = \dot{Z}_{0I II} - \frac{\dot{Z}_{0I T} \dot{Z}_{0 II T}}{\dot{Z}_{0 T}}. \quad (9)$$

В выражении (9) $\dot{Z}_{0I I}^{(T)}$ и $\dot{Z}_{0 II I}^{(T)}$ вычисляются по (1).
Сопротивление троса определяется

$$\dot{Z}_{0 T} = 1,5r_T + j0,435 \cdot \lg \frac{D_3}{\sqrt{\rho_{\Sigma T}}}, \quad (10)$$

где r_T – активное сопротивление троса, Ом/км; $\rho_{\Sigma T}$ – эквивалентный радиус троса, м.

Сопротивление взаимоиндукции между цепями

$$\dot{Z}_{0I II} = 1,5r_T + 0,15 + j0,435 \lg \frac{D_3}{D_{cp I II}}, \quad (11)$$

где $D_{cp I II} = \sqrt[9]{D_{Aa} D_{Ab} D_{Ac} D_{Ba} D_{Bb} D_{Bc} D_{Ca} D_{Cb} D_{Cc}}$.

Сопротивления цепей с учетом влияния грозозащитного троса

$$\dot{Z}_{0I T} = \dot{Z}_{0 II T} = 0,15 + j0,435 \lg \frac{D_3}{D_{пТ}}, \quad (12)$$

где $D_{пТ} = \sqrt[3]{D_{AT} D_{BT} D_{CT}}$.

Кроме продольного индуктивного сопротивления линии для расчетов с целью ОМП необходимо учесть емкостную поперечную проводимость ЛЭП. Согласно методу зеркальных изображений емкость нулевой последовательности можно вывести из системы уравнений, связывающих напряжения проводов относительно земли с их электрическими зарядами. Так как в схеме замещения нулевой последовательности кроме фазных проводов необходимо учесть влияние грозозащитного троса, то для него тоже составляется соответствующее уравнение, при учете, что напряжение троса равно нулю.

$$\begin{cases} \dot{U}_{0I} = \alpha_{II} q_{0I} + \alpha_{II II} q_{0II} + \alpha_{IT} q_T; \\ \dot{U}_{0II} = \alpha_{II I} q_{0I} + \alpha_{II II} q_{0II} + \alpha_{II T} q_T; \\ 0 = 3\alpha_{IT} q_{0I} + \alpha_{II T} q_{0II} + \alpha_{TT} q_T, \end{cases} \quad (a)$$

$$\begin{cases} \dot{U}_{0I} = \alpha_{II} q_{0I} + \alpha_{II II} q_{0II} + \alpha_{IT} q_T; \\ \dot{U}_{0II} = \alpha_{II I} q_{0I} + \alpha_{II II} q_{0II} + \alpha_{II T} q_T; \\ 0 = 3\alpha_{IT} q_{0I} + \alpha_{II T} q_{0II} + \alpha_{TT} q_T, \end{cases} \quad (б)$$

$$\begin{cases} \dot{U}_{0I} = \alpha_{II} q_{0I} + \alpha_{II II} q_{0II} + \alpha_{IT} q_T; \\ \dot{U}_{0II} = \alpha_{II I} q_{0I} + \alpha_{II II} q_{0II} + \alpha_{II T} q_T; \\ 0 = 3\alpha_{IT} q_{0I} + \alpha_{II T} q_{0II} + \alpha_{TT} q_T, \end{cases} \quad (в)$$

Выражая из (а) заряд троса и подставляя его в (а) и (б) можно найти потенциальные коэффициенты цепей $\alpha_{II I}^{(T)}$ и $\alpha_{II II}^{(T)}$, а также взаимные потенциальные коэффициенты $\alpha_{II I}^{(T)}$ и $\alpha_{II II}^{(T)}$

$$\alpha_{II I}^{(T)} = \alpha_{II I} - \Delta\alpha_{IT};$$

$$\alpha_{II II}^{(T)} = \alpha_{II II} - \Delta\alpha_{II T};$$

$$\alpha_{II I}^{(T)} = \alpha_{II I} - \Delta\alpha_{II T};$$

$$\alpha_{II II}^{(T)} = \alpha_{II II} - \Delta\alpha_{II T},$$

где $\alpha_{II I}$, $\alpha_{II II}$ – собственные потенциальные коэффициенты цепей без учета влияния троса; $\alpha_{II I}$, $\alpha_{II II}$ – взаим-

ный потенциальный коэффициент; $\Delta\alpha_{IT}$, $\Delta\alpha_{II T}$, $\Delta\alpha_{II I}$ – добавочные потенциальные коэффициенты, учитывающие влияние троса.

Собственный потенциальный коэффициент цепи

$$\alpha_{II I(II II)} = 41,4 \cdot 10^6 \lg \frac{D_{cp} S_L}{\rho_{п} S_M}.$$

Взаимный потенциальный коэффициент

$$\alpha_{II II(II I)} = 124 \cdot 10^6 \lg \frac{S_{cp II}}{D_{cp I II}},$$

где $S_{cp I II} = \sqrt[9]{S_{AA} S_{BB} S_{CC} S_{AB}^2 S_{AC}^2 S_{BC}^2}$.

Добавочные потенциальные коэффициенты цепей

$$\Delta\alpha = \left[124 \cdot 10^6 \left(\lg \frac{S_{пТ}}{D_{пТ}} \right)^2 \right] \left[\lg \frac{S_{ТТ}}{\rho_T} \right]^{-1},$$

где $S_{пТ} = \sqrt[3]{S_{AT} S_{BT} S_{CT}}$; $S_{ТТ}$ – расстояние между тросом и его зеркальным изображением, м.

Тогда емкости цепей:

$$C_{II I} = \frac{\alpha_{II II}^{(T)}}{\alpha_{II I}^{(T)} \alpha_{II II}^{(T)} - \alpha_{II I}^{(T)}};$$

$$C_{II II} = \frac{\alpha_{II I}^{(T)}}{\alpha_{II I}^{(T)} \alpha_{II II}^{(T)} - \alpha_{II I}^{(T)}}.$$

Удельная поперечная проводимость нулевой последовательности

$$b_0 = 2\pi f (C_{II I} + C_{II II}). \quad (13)$$

В результате линия электропередачи может быть представлена Т-образной схемой замещения, показанной на рис. 2.

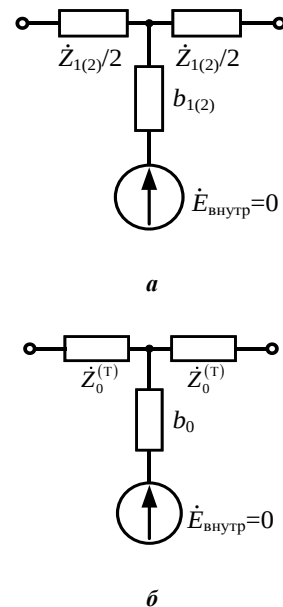


Рис. 2. Схема замещения прямой, обратной (а) и нулевой последовательности (б) ЛЭП

УДЕЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ЛЭП

Используя выражения (1), (6), (7) и (13), были рассчитаны удельные продольные сопротивления (Ом/км) и поперечная проводимость (См/км) двухцепных линий электропередачи напряжением 110 кВ с проводами сечением от 120 до 300 мм² при среднегеометрическом расстоянии между проводами 4, 5,6, 7,1 м. Данные величины соответствуют опорам типа ПБ110-8, У110-2 и ЦП-8 соответственно, которые широко используются в системах электроснабжения промышленных предприятий. Полученные сопротивления и проводимости сведены в табл. 1 и 2. Все значения определены при условии, что на линии используется грозозащитный трос радиусом 4,55 мм с активным сопротивлением 2,8-3,7 Ом/км.

Таблица 1
Удельные параметры прямой (обратной) последовательности

D_{cp} , м	Провод	$r_{1(2)}$, Ом/км	$x_{1(2)}$, Ом/км	$b_{1(2)} \cdot 10^{-6}$, См/км
4	АС-120	0,25	0,404	2,501
	АС-150	0,198	0,396	2,544
	АС-240	0,12	0,38	2,634
	АС-300	0,098	0,374	2,677
	М-185	0,1002	0,394	2,555
5,6	АС-120	0,25	0,424	2,347
	АС-150	0,198	0,416	2,384
	АС-240	0,12	0,402	2,463
	АС-300	0,098	0,394	2,5
	М-185	0,1002	0,4142	2,394
7,1	АС-120	0,249	0,438	2,239
	АС-150	0,198	0,43	2,274
	АС-240	0,12	0,416	2,345
	АС-300	0,098	0,41	2,379
	М-185	0,10015	0,428	2,282

Таблица 2
Удельные параметры нулевой последовательности

D_{cp} , м	Провод	r_0 , Ом/км	x_0 , Ом/км	$b_0 \cdot 10^{-6}$, См/км
4	АС-120	0,532	2,422	1,697
	АС-150	0,476	2,362	1,697
	АС-240	0,4	2,23	1,697
	АС-300	0,378	2,17	1,697
	М-185	0,38	2,346	1,697
5,6	АС-120	0,51	2,07	1,525
	АС-150	0,458	2,004	1,525
	АС-240	0,38	1,87	1,525
	АС-300	0,358	1,812	1,525
	М-185	0,36	1,986	1,525
7,1	АС-120	0,524	1,798	1,5
	АС-150	0,472	1,73	1,5
	АС-240	0,394	1,598	1,5
	АС-300	0,372	1,538	1,5
	М-185	0,374	1,714	1,5

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные в работе расчетные выражения позволяют определять удельное продольное сопротивление и поперечную емкость двухцепных ЛЭП с одним грозотросом. Так как в них учтено электромагнитное и электростатическое взаимодействие проводящих элементов линии, то их можно использовать при расчете несимметричного аварийного режима с целью дистанционного ОМП. На основе полученных расчетных выражений были составлены справочные таблицы со значениями удельных сопротивлений и проводимостей ЛЭП прямой, обратной и нулевой последовательностей при различном сечении фазных проводов и среднегеометрическом расстоянии между фазами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Расчет установившегося режима электрической сети в геоинформационной системе ГрафИн / С.Г. Слюсаренко, Л.Ю. Костюк, А.В. Скворцов, С.А. Субботин, Д.С. Сарычев // Вестник Томского гос. ун-та. 2002. №275. С. 64-69.
2. Паздерин А.В., Юферев С.В. Расчет установившегося режима электроэнергетической системы обобщенным методом Ньютона // Изв. вузов. Проблемы энергетики. 2008. №5-6. С.68-77.
3. Бодруг Н.С., Халиков В.В., Шатравка В.В. Анализ устройств определения мест повреждения 6-750 кВ отечественного производства // Символ науки. 2016. С.14-16.
4. Домрачев Г.Р. Устройство определения места повреждения при коротких замыканиях // Развитие технических наук в современном мире: сб. науч. тр. по итогам междунар. науч.-практ. конф. Воронеж, 2015. №2. С.41-43.
5. Шилин А.Н., Шилин А.А., Артюшенко Н.С. Источники погрешностей рефлектометров для определения места повреждения линий электропередач // Проблемы и перспективы развития отечественной светотехники, электротехники и энергетики: матер. XII Всерос. науч.-технич. конференции с междунар. участием в рамках III Всерос. светотехнич. форума с междунар. участием. Саранск, 2015. С.474-482.
6. Малый А.С., Шалыт Г.М., Айзенфельд А.И. Определение мест повреждения линий электропередачи по параметрам аварийного режима / под ред. Г.М. Шалыта. М.: Энергия, 1972. 216 с.
7. Ермаков К.И. Моделирование в задачах определения места повреждения на линиях электропередач // Вестник Чувашского университета. 2011. №3. С.67-70.
8. Лебедева А.А., Грибанов А.А. Определение места повреждения на воздушных линиях электропередач напряжением 220 кВ на основе двустороннего метода расчёта // Энергетика. Инновационные направления в энергетике. Салс-технологии в энергетике. 2015. Т.1. С.64-70.
9. Бычков Ю.В., Павлов А.О. Определение места повреждения в схемах с многосторонним питанием // Энергетика Татарстана. 2011. №2. С.33-38.
10. Ferreira V.H., Zanghi R., Fortez M.Z., Sotelo G.G., Silva R.B.M., Souza J.C.S., Guimarães C.H.C., Gomes S. Jr. A survey on intelligent system application to fault diagnosis in electric power system transmission lines. Electric Power System Research. 2016, no.136, pp.135-153.
11. Johns A., Jamali S. accurate fault location technique for power transmission lines. IEE Proc. C: Gener. Trans. Distrib, 1990, 136(7), pp.395-402.
12. Mazon A., Zamora I., Gracia J., Sagastabeitia K., Eguia P., Jurado F., et al. Fault location system on double circuit two-terminal transmission lines based on ANNs. Proceedings of 2001 IEEE Porto Power Tech Porto, vol.3, 2001, p.5.
13. Saha S., Aldeen M., Tan C. Fault detection in transmission networks of power systems. Int. J. Electr. Power Energy

- Syst., 2011, no.33(4), pp.887-900.
14. Руководящие указания по релейной защите. Вып. 11. Расчет токов короткого замыкания для релейной защиты и системной автоматики в сетях 110-750 кВ. М.: Энергия, 1979. 152 с.
 15. Панова Е.А. Повышение режимной надежности систем электроснабжения промышленных предприятий в условиях аварийной несимметрии: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03: защищена 25.05.12: утв. 10.06.13 / Панова Евгения Александровна. Магнитогорск, 2012. 205 с. Библиогр.: с. 137-157.
 16. Панова Е.А., Савельева К.С. Определение удельных электрических параметров воздушных линий электропередачи // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2014. №10. С.16-22.
 17. Малафеев А.В., Панова Е.А. Алгоритм расчета сложно-несимметричных режимов систем электроснабжения промышленных предприятий // Главный энергетик. 2011. №3. С.35-39.
 18. 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 // Изв. вузов. Электромеханика. 2011. №4. С.119-123.
 19. Анализ режимов несимметричных коротких замыканий в сложных системах электроснабжения с собственными электростанциями / А.В. Малафеев, О.В. Буланова, Е.А. Панова, М.В. Григорьева // Промышленная энергетика. 2010. №3. С.26-31.
 20. Оценка эффективности релейной защиты в сетях 110-220 кВ сложных систем электроснабжения промышленных предприятий с собственными электростанциями / В.А. Игуменцев, Б.И. Заславец, Н.А. Николаев, А.В. Малафеев, О.В. Буланова, Ю.Н. Кондрашова, Е.А. Панова. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2011. 141 с.
 21. Повышение чувствительности релейной защиты силовых трансформаторов системы промышленного электроснабжения в сложносимметричных аварийных режимах / Е.А. Панова, А.В. Малафеев, В.А. Болтачев, И.В. Иркинко // Электротехнические системы и комплексы. 2013. №21. С. 195-198.
 22. 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.

Поступила в редакцию 26 июня 2016 г.

INFORMATION IN ENGLISH

SPECIFIED PER-UNIT PARAMETERS OF DOUBLE-CIRCUIT 110 kV OVERHEAD LINES FOR DISTANT FAULT LOCATION

Evgeniya A. Panova

Ph.D (Eng.), Associate Professor, Industrial Electric Power Supply Department, Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: panova.ea@mail.ru

Aleksandr Ya. Al'brekht

Head of the Department, Relay Protection Department, Central Electrical Laboratory, Magnitogorsk Iron and Steel Works, Magnitogorsk, Russia.

When eliminating fault on overhead transmission line it is very important to locate it accurately. This will lead to a less time spent by mobile maintenance team on the line inspection and detection of a fault reason. The most difficult is a distant single phase short circuit location which are the most frequent fault in the effectively grounded network. For an accurate distant fault location basing on the emergency mode parameters it is necessary to execute a set of computations of single-phase short circuit mode. This needs the use of lines mathematical models taking into account electrostatic and electromagnetic coupling of conductors and tower configuration. the easiest way to model a line is to use referential per unit electrical parameters calculated with respect to the limitation of a wires use on different voltage levels. In industrial electric power supply system 300 mm² wires are often used in 110 kV distribution network whereas their parameters are specified for 220 kV, that is with bigger tower dimensions. Also there are no zero sequence parameters in reference books. The other way is to use relay protection guidelines for line parameters computation, but this documents doesn't contain equations for double-circuit overhead line with a single protection cable. Besides manual calculations take a lot of time which is inappropriate in accidental situation. The authors have elaborated the equations for symmetrical components of per unit resistance and capacitive susceptance calculation for double-circuit overhead line with a single protection cable. Also the authors have calculated the above mentioned parameters for

different wires cross sections and geometric mean distance between phases.

Keywords: Fault location, overhead line, single-phase short circuit, mutual induction, phase capacitance, per unit resistance, mathematical model, electric power supply system, electrical images, symmetrical components.

REFERENCES

1. Slyusarenko S.G., Kostyuk L.Yu., Skvortsov A.V., Subbotin S.A., Sarychev D.S. Electric circuit steady-state regime computation in GraphIn geoinformatic systems. *Vestnik Tomskogo gos. un-ta* [Tomsk State University Journal], 2002, no.275, pp.64-69. (In Russian)
2. Pazderin A.V., Yuferev S.V. The calculation of the steady-state mode of an electrical power system by generalized Newton method. *Izv. vuzov. Problemy energetiki* [Proceedings of the higher educational institutions. Energy sector problems], 2008, no.5-6, pp.68-77. (In Russian)
3. Bodrug N.S., Khalikov V.V., Shatravka V.V. The Analysis of Fault-location Devices for 6-750 kV. *Simvol nauki* [The Symbol of Science], 2016, pp.14-16. (In Russian)
4. Domrachev G.R. Short-circuit location device. *Razvitie tekhnicheskikh nauk v sovremennom mire. Sbornik nauchnykh trudov po itogam mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Proc. of Int. Scientific conf. "Technical science development today"], 2015, no.2, pp.41-43. (In Russian)

5. Shilin A.N., Shilin A.A., Artyushenko N.S. The reason of errors of the reflector for overhead lines fault location. *Problemy i perspektivy razvitiya otechestvennoy svetotekhniki, elektrotekhniki i energetiki. Materialy XII Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem v ramkakh III Vserossiyskogo svetotekhnicheskogo foruma s mezhdunarodnym uchastiem* [Proc. of XII Int. Conf. "Problems and Prospects of lighting engineering, electrotechnics and power engineering development"], 2015, pp.474-482. (In Russian)
6. Malyy A.S., Shalyt G.M., Ayzenfel'd A.I. *Opredelenie mest povrezhdeniya liniy elektroperedachi po parametram avariynogo rezhima* [Fault detection on emergency operating mode parameters], under the editorship of G.M. Shalyt, Moscow, Energiya Publ., 1972, 216 p.
7. Ermakov K.I. Modeling in the Issue of Overhead Lines Fault Location. *Vestnik Chuvashskogo universiteta* [Bulletin of Chuvash University], 2011, no.3, pp.67-70. (In Russian)
8. Lebedeva A.A., Gribov A.A. 220 kV Over-Head Lines Fault Detection with Two-Side Calculation Method. *Energetika. Innovatsionnye napravleniya v energetike. Cals-tekhnologii v energetike* [Power Engineering. Innovations in Power Engineering. Cals-Technologies in Power Engineering], 2015, vol.1, pp.64-70. (In Russian)
9. Bychkov Yu.V., Pavlov A.O. Fault Location in Multi-Way Feed Schemes. *Energetika Tatarstana* [Tatarstan Power engineering], 2011, no.2, pp.33-38. (In Russian)
10. Ferreira V.H., Zanghi R., Fortez M.Z., Sotelo G.G., Silva R.B.M., Souza J.C.S., Guimarães C.H.C., Gomes S. Jr. A survey on intelligent system application to fault diagnosis in electric power system transmission lines. *Electric Power System Research*, 2016, no.136, pp.135-153.
11. Johns A., Jamali S. accurate fault location technique for power transmission lines. *IEE Proc. C: Gener. Trans. Distrib*, 1990, 136(7), pp.395-402.
12. Mazon A., Zamora I., Gracia J., Sagastabeitia K., Eguia P., Jurado F., et al. Fault location system on double circuit two-terminal transmission lines based on ANNs. *Proceedings of 2001 IEEE Porto Power Tech Porto*, vol.3, 2001, p.5.
13. Saha S., Aldeen M., Tan C. Fault detection in transmission networks of power systems. *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, 2011, no.33(4), pp.887-900.
14. Guidelines on relay protection. Iss.11. Short-circuit current calculation for relay protection and system automatics in 110-750 kV network. Moscow, Energiya Publ., 1979. 152 p. (In Russian)
15. Panova E.A. *Povyshenie rezhimnoy nadezhnosti sistem elektrosnabzheniya promyshlennykh predpriyatiy v usloviyakh avariynoy nesimmetrii*. [Performance reliability enhancement in industrial electric power systems in terms of out-of-balance emergency operating conditions. PhD(Eng.) Diss.]. Magnitogorsk, 2015. 205 p.
16. Panova E.A., Savel'eva K.S. Evaluation of specific electric parameters of overhead transmission lines. *Elektrooborudovanie: ekspluatatsiya i remont* [Electrical equipment: exploitation and maintenance], 2014, no.10, pp.16-22. (In Russian)
17. Malafeev A.V., Panova E.A. The algorithm of complex out-of-balance operation mode computation in industrial electric power systems. *Glavnyy energetik* [Chief power engineer], 2010, no.3, pp.35-39. (In Russian)
18. Malafeev A.V., Panova E.A., Belyaev S.V., Emel'yanov A.A., Al'brekht A.Ya., Bikteeva O.Yu. Simulation of open-phase mode in the problem of computation and analysis of industrial electric power system operation. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika* [Transactions of higher education institutions. Electromechanics], 2011, no.4, pp.119-123. (In Russian)
19. Malafeev A.V., Bulanova O.V., Panova E.A., Grigor'eva M.V. The analysis of out-of-balance short circuit mode in complex electric power supply systems with domestic power plants. *Promyshlennaya energetika* [Industrial power engineering], 2010, no.3, pp.26-31. (In Russian)
20. Igumenshchev V.A., Zaslavets B.I., Nikolaev N.A., Malafeev A.V., Bulanova O.V., Kondrashova Yu.N., Panova E.A. *Otsenka effektivnosti releynoy zashchity v setyakh 110-220 kV slozhnykh sistem elektrosnabzheniya promyshlennykh predpriyatiy s sobstvennymi elektrostantsiyami* [Evaluation of the 110-220 kV network relay protection effectiveness in complex electric power systems with domestic power plants]. Magnitogorsk, Nosov Magnitogorsk State Technical University Publ., 2011. 141 p.
21. Panova E.A., Malafeev A.V., Boltachev V.A., Irkliencko I.V. Power transformer relay protection sensitivity improvement in terms of industrial electric power supply system emergency complex out-of-balance mode. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2013, no. 21, pp. 195-198. (In Russian)
22. Panova E.A., Savel'eva K.S., Kochkina A.V. Evaluation of operation acceptability of the industrial enterprises domestic power plants synchronous generators in case of electric equipments' incremental repair of the subtransmission network under normal and optimum operation condition. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2013, no. 21, pp. 214-220. (In Russian)

Панова Е.А., Альбрехт А.Я. Уточненные удельные электрические параметры двухцепных ЛЭП 110 кВ для дистанционного определения места повреждения // Электротехнические системы и комплексы. 2016. №4(33). С.35-40. doi: 10.18503/2311-8318-2016-4(33)-35-40

Panova E.A., Al'brekht A.Ya. Specified Per-unit Parameters of Double-circuit 110 kV Overhead Lines for Distant Fault Location. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2016, no.4(33), pp.35-40. (In Russian). doi: 10.18503/2311-8318-2016-4(33)-35-40

Шеметов А.Н.¹, Федорова С.В.², Кузнецов С.В.², Ляпин Р.Н.²¹ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»²НЧОУ ВО «Технический университет УГМК»

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ФОРМИРОВАНИЯ МОДЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГОХОЗЯЙСТВОМ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

В статье рассмотрены научные и методологические основы управления энергохозяйством горно-металлургических предприятий – от формирования математических моделей энергозатрат до оперативного управления режимами энергопотребления. Представлен отечественный и зарубежный опыт теоретического решения задач оптимизации технологического режима и энергосбережения. Выделены основные особенности энергопотребления горно-металлургических предприятий. Предложены оригинальные адаптивные модели управления энергоемкими потребителями электроэнергии, построенные на базе теории нечетких множеств.

Ключевые слова: энергохозяйство, энергопотребление, оперативное управление, оптимизация, горно-металлургический комплекс.

ВВЕДЕНИЕ

В современных нестабильных условиях рынка промышленной продукции и энергоносителей управление энергохозяйством крупных предприятий невозможно без соответствующего информационного обеспечения, позволяющего оперативно реагировать на изменения условий производства. Потребление энергетических ресурсов в большинстве сфер деятельности зависит от целого комплекса производственных и технологических факторов, поэтому для выработки и принятия технически верных и экономически обоснованных решений необходимо установление закономерностей формирования энергозатрат в виде математических моделей энергопотребления, учитывающих уровень и динамику энергопотребления [1-6]. Особенно актуальна эта задача для энергоемких горно-металлургических предприятий, режим работы которых характеризуется сложной системой взаимосвязанных, зачастую вероятностно заданных или нечетких факторов.

Соответственно модели и алгоритмы управления энергохозяйством должны учитывать вариативность изменения технологических и экономических режимов и предлагать «на выходе» максимально гибкие, адаптивные организационно-технические решения на всех административных уровнях управления: от оперативного регулирования параметров работы отдельных агрегатов до оптимизации общепроизводственной системы нормирования, прогнозирования и планирования энергозатрат.

МЕТОДЫ

С точки зрения системного подхода, энергохозяйство промышленного предприятия можно представить в виде разветвленной иерархической структуры, где каждый уровень выполняет свои задачи, отличающиеся степенью локализации и детализации:

На нижнем уровне имеется подробная информация по текущему состоянию каждого крупного потребителя энергии (электроприемника) с возможностью оперативного (*on-line*) вмешательства в технологический процесс,

но без учета средне- или долгосрочной перспективы функционирования предприятия. Поэтому здесь решаются локальные задачи оптимального управления по критерию максимального производства продукции заданного качества. Соответственно набор переменных процесса ограничен только числом каналов АСУТП.

Простейшие математические модели электропотребления описывают каждую технологическую операцию и электропривод на базе известных фундаментальных законов физики и затем агрегируются по принципу «снизу вверх» [7-8]. Такой подход используется по сей день при малой размерности электрического хозяйства и относительной простоте электрооборудования и технологических режимов, например для насосов и тому подобной «вентиляторной» нагрузке:

$$P = \frac{H \cdot Q}{100 \cdot \eta}, \quad (1)$$

где H – напор перекачиваемой среды, м; Q – производительность, м³/ч; η – полный КПД установки.

Если для каждого конкретного насоса, дымососа или вентилятора принять напор величиной постоянной, то его электропотребление можно считать прямо пропорциональным производительности, что справедливо и для всей насосной системы в целом (**рис. 1**).

Однако такой упрощенный подход не позволяет оценить некоторые характерные особенности работы потребителей [1, 9-10]. Например, для газозавоздуховок это сезонный фактор, связанный с некоторым снижением производительности в летнем сезоне (в результате проведения плановых ремонтов) и с повышением плотности холодного воздуха зимой (**рис. 2**).

Таким образом, для более сложных объектов возникает необходимость учета большого количества технологических связей, что приводит к переходу от детерминированной аналитической постановки задачи к вероятностно-статистической, при которой энергетические характеристики рассматриваются как многомерные регрессионные зависимости, отражающие совокупность параметров состояния машин и механизмов:

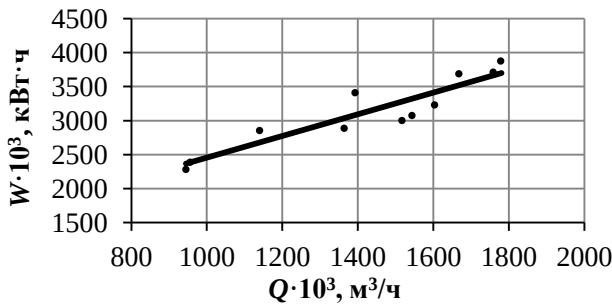


Рис. 1. Зависимость электропотребления газовоздухоудовок

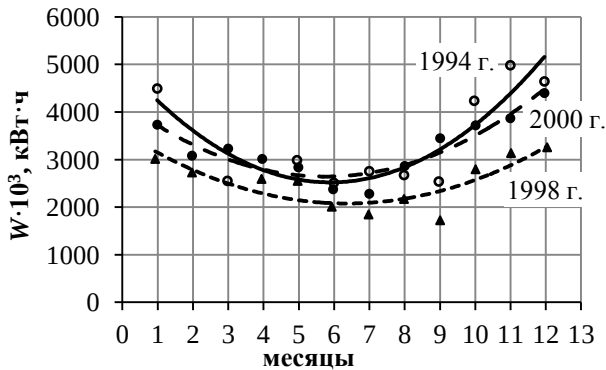


Рис. 2. Изменение электропотребления газовоздухоудовок в течение года

$$y_{iq} = \sum_{j=1}^k b_j x_{ij} + a_{ij} z_{ij} + e_i; \quad j = \overline{1, m}; \quad i = \overline{1, n}, \quad (2)$$

где $\vec{Y} = (Y_1, Y_2, \dots, Y_m)$ – вектор результативных энергетических показателей; $\vec{X} = (x_1, x_2, \dots, x_m)$ – векторы значимых производственных факторов.

Принципиально важно, что речь идет не о точном однозначном решении, а лишь о наличии математического ожидания и приемлемой для практики инженерной ошибки прогнозной модели электропотребления. При этом решение задачи моделирования производится комплексно, с учетом статистических критериев и технического анализа причинно-следственных связей между технологическими и энергетическими факторами.

На среднем уровне управления (цеха и переделы) осуществляется переход от поагрегатных и пооперационных расчетов к выделению некоторых существенных параметров, характеризующих расход электроэнергии данного промышленного объекта в целом. Например, для горно-обогатительных предприятий (аглофабрик) [9-10] учитываются следующие показатели:

- месячный объем производства, тыс. т;
- средний состав сырья (шихты) в течение месяца;
- средние показатели качества продукции (агломерата).

Выбор значимых факторов производится на основании матрицы парных коэффициентов корреляции технологических и энергетических показателей (табл. 1). Здесь следует отметить тесную связь расхода электроэнергии с производительностью $Q_{агл}$ ($r=0,41-0,68$) и показателями качества сырья $Тонк.к-т$ ($r=0,28-0,39$), отражающими обобщенные количественные и качественные характеристики процесса.

Исходя из этого для описания процессов электропотребления предложены математические модели следующего вида:

– однофакторная

$$W = 27,19 \cdot Q_{агл} + 3169000 \quad (R^2 = 0,864; \delta_{ср.кв} = 9,09\%); \quad (3)$$

– многофакторная

$$W = 36,16 \cdot Q_{агл} - 30080 \cdot Тонк.к - 4789 \cdot Возврат + 13170 \cdot Флюс - 1384000 \cdot Топливо + 9123000 \quad (R^2 = 0,91; \delta_{ср.кв} = 3,69\%). \quad (4)$$

Последняя имеет значительно более высокую точность и, в принципе, может быть использована для нормирования и прогнозирования энергозатрат. Однако проблемы с практическим применением могут быть обусловлены неопределенностью технико-экономических и технологических показателей в различных нестационарных производственных условиях, отличающихся от нормального установившегося хода технологического процесса. Экстраполяция классических регрессионных моделей за пределы конкретных интервалов варьирования факторов, как правило, невозможна, поскольку неизвестно действительны ли в новой области полученные ранее закономерности.

В теории автоматического управления для решения подобных задач широко используется математический аппарат нечеткой логики (*fuzzy-logic*), который позволяет описывать степень неопределенности данных в виде обобщенной функции принадлежности [11-12]. А поскольку в заведомо ненормальных режимах неопределенность данных выше, чем при нормальной работе, мерой нечеткости можно считать величину отклонения электропотребления от среднего значения (рис. 3).

Для построения нечеткой регрессионной модели электропотребления

$$\tilde{y} = \tilde{a}_0 + \tilde{a}_1 x_1 + \tilde{a}_2 x_2 + \dots + \tilde{a}_n x_n \quad (5)$$

необходимо сгенерировать функцию принадлежности в виде α – уровней множеств коэффициентов $\tilde{a}_i (i=\overline{0, n})$, удовлетворяющих условию минимума отклонения расчетных нечетких значений выходного параметра $\tilde{y}_i$ от его исходных (выборочных) нечетких значений:

$$\sum_{i=1}^N (y_i^{\alpha_j} - \tilde{y}_i^{\alpha_j})^2 \rightarrow \min, \quad j = \overline{1, p}, \quad (6)$$

где $\alpha: \{\alpha_0=0, \alpha_1, \dots, \alpha_j, \dots, \alpha_p=1\}$ — уровни значимости выбранной нечеткой функции принадлежности.

Форма представленных на рис. 3 кривых позволяет не использовать в расчетах сложных аналитических функций принадлежности, а обойтись всего тремя характерными уровнями значимости: $\alpha=0,5; 0,8; 1$.

Для каждого такого уровня уравнение регрессии (5) можно записать в виде системы:

$$\begin{cases} y^{\alpha_0} = a_0^{\alpha_0} + a_1^{\alpha_0} x_1 + a_2^{\alpha_0} x_2 + \dots + a_n^{\alpha_0} x_n, \\ y^{\alpha_1} = a_0^{\alpha_1} + a_1^{\alpha_1} x_1 + a_2^{\alpha_1} x_2 + \dots + a_n^{\alpha_1} x_n, \\ \dots \\ y^{\alpha_p} = a_0^{\alpha_p} + a_1^{\alpha_p} x_1 + a_2^{\alpha_p} x_2 + \dots + a_n^{\alpha_p} x_n, \end{cases} \quad (7)$$

где каждая строка аналогична классическим регрессионным моделям.

Для выбранных уровней задаем нечеткие значения функции отклика (расхода электроэнергии) таким образом, чтобы в нормальном (исследуемом) режиме разброс был наименьшим, а по мере отклонения от нормы – увеличивался:

$$\begin{aligned} \text{около } 6840 &= 0,5 \setminus 6200 + 0,8 \setminus 6520 + 1 \setminus 6840 + \\ &+ 0,8 \setminus 7160 + 0,5 \setminus 7480; \\ \text{около } 8640 &= 0,5 \setminus 8000 + 0,8 \setminus 8320 + \\ &+ 1 \setminus 8640 + 0,8 \setminus 8960 + 0,5 \setminus 9280; \\ \text{около } 11520 &= 0,5 \setminus 10960 + 0,8 \setminus 11240 + \\ &+ 1 \setminus 11520 + 0,8 \setminus 11800 + 0,5 \setminus 12080; \\ \text{около } 12960 &= 0,5 \setminus 12680 + 0,8 \setminus 12820 + \\ &+ 1 \setminus 12960 + 0,8 \setminus 13100 + 0,5 \setminus 13240 \\ &\text{и т.д.} \end{aligned}$$

РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате серии процедур регрессионного анализа на базе этих данных были рассчитаны параметры нечеткой модели электропотребления, представленные в табл. 2.

Преимущества полученной нечеткой модели наглядно проявляются при реализации процесса оперативного управления [13–16], особенно в условиях противоречивых критериев оптимальности — одновременно увеличить объем выпуска продукции, её качество и снизить затраты:

$$\sum_{k=1}^M \omega_{i,k} f_{i,k}(x) \rightarrow \max, \quad i = \overline{1, N}, \quad (8)$$

где весовые коэффициенты $\omega_{i,j}$ указывают степень важности каждого из критериев управления.

Для удобства оператора нечеткие функции и ограничения в оптимизационной задаче формируются словесно, в виде лингвистических конструкций, например: «Допустимо, чтобы H_1 было не меньше, чем c_1 и желательно, чтобы не меньше, чем c_2 ». Этой фразе можно поставить в соответствие нечеткое множество с функцией принадлежности:

$$\mu_1(H_1) = \begin{cases} 0, & \text{если } H_1 \leq c_1; \\ \frac{H_1 - c_1}{c_2 - c_1}, & \text{если } c_1 \leq H_1 \leq c_2; \\ 1, & \text{если } H_1 \geq c_2, \end{cases} \quad (9)$$

где $c_1 = \text{const}$ и $c_2 = \text{const}$.

Как показано выше, каждому нечеткому параметру ставится в соответствие своя функция принадлежности $\mu_k(H_k)$, которые в совокупности формируют для отдельных критериев управления (производительность, качество и затраты) обобщенную нечеткую функцию полезности:

$$v(H, \omega) = v(\mu_0(H_0), \dots, \mu_M(H_M), \omega_0, \dots, \omega_M). \quad (10)$$

Весовые коэффициенты ω_k в задаче (8) определяются методом экспертных оценок — путем попарного сравнения полученных промежуточных вариантов с помощью нечетких лингвистических характеристик термов вида: «эквивалентно», «несколько лучше (хуже)», «значительно лучше (хуже)», «строго лучше (хуже)».

Каждой такой метке соответствует функция принадлежности $\pi_e(r)$:

$$\begin{aligned} \pi_1(r) &= \begin{cases} 1 - 25r^2, & \text{если } |r| \leq 0,2; \\ 0, & \text{если } |r| \geq 0,2; \end{cases} \\ \pi_2(r) &= \begin{cases} 1 - 25(r - 0,3)^2, & \text{если } 0,1 \leq |r| \leq 0,5; \\ 0, & \text{если } |r| \leq 0,1 \text{ и } |r| \geq 0,5; \end{cases} \end{aligned} \quad (11)$$

и т.д.,

где $r = v(\mu(H_1), \omega) - v(\mu(H_2), \omega)$; H_1, H_2 — допустимые значения критериев управления.

Если производится L сравнений, то получим L функций принадлежности, а результирующее оптимально-компромиссное решение определяется на пересечении этих функций:

$$\omega^* = \max_{\omega} \pi(\omega) \quad (12)$$

относительно каждого из m критериев управления.

Алгоритм оперативного управления состоит из четырех шагов:

1. Формирование начальных нечетких управляющих сигналов $\omega_{i,j}^0$.
2. Решение локальных задач оптимизации (9), где нечеткие множества $\tilde{F}_{k,i}$ дискретизированы на несколько α -уровней, исходя из вида функции μ_F .
3. Поиск центрального оптимально-компромиссного решения (12) и определение координирующих сигналов $\tilde{\omega}_{i,j}$.
4. Предоставление результатов расчета эксперту-оператору (лицу, принимающему решение).

Если результат признан удовлетворительным, процедура заканчивается, и значения нечетких координирующих сигналов $\tilde{\omega}_{i,j}$ подаются на исполнительные механизмы. В противном случае оператор, через лингвистические терм-команды, задает новые желаемые значения критериев управления и осуществляет возврат к шагу №2.

Покажем пример решения задачи оперативного управления для нескольких агломерационных машин, являющихся фрагментом технологической схемы аглофабрики:

$$\begin{aligned} &\tilde{\omega}_{i,1} \tilde{f}_{i,1}(x, z) + \tilde{\omega}_{i,2} \tilde{f}_{i,2}(x, z) + \\ &+ \tilde{\omega}_{i,3} \tilde{f}_{i,3}(x, z) \rightarrow \max, \quad x \in X, \end{aligned} \quad (13)$$

где x — вектор управляемых переменных (технологический режим); z — вектор неуправляемых переменных (состав сырья).

Выходные параметры обозначим тремя нечеткими переменными:

$\tilde{f}_{i,1}$ – производительность i -й агломашины, т/ч или т/смен;

$\tilde{f}_{i,2}$ – обобщенный показатель качества агломерата i -й агломашины (по содержанию железа, %);

$\tilde{f}_{i,3}$ – электропотребление i -й агломашины, кВт·ч.

Для их описания используем регрессионные уравнения с нечеткими коэффициентами вида

$$Q_{\text{агл}}: \tilde{f}_{i,k}(x_{i,j}, z_{i,j}) = \langle \tilde{a}_{i,k}, x \rangle + \langle \tilde{b}_{i,k}, z \rangle$$

и лингвистические терм-множества

$$\tilde{f}_{i,j} := \{\text{мало, норма, много}\}.$$

В качестве целевой функции верхнего уровня прием укрупненные экономические показатели производства:

$$\Phi_0 = \sum_i c_{i,1} \cdot f_{i,1} - \sum_i c_{i,3} \cdot f_{i,3} \rightarrow \max,$$

где $c_{i,1}$ – отпускная цена готовой продукции (агломерата), руб./т; $c_{i,3}$ – цена электрической энергии, руб./кВт·ч.

Для аглофабрики, имеющей в своем составе n агломашин, последнее выражение преобразуется к эквивалентной задаче в пространстве нечетких координирующих сигналов:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^3 \tilde{f}_{i,j} \cdot \tilde{\omega}_{i,j} \rightarrow \max. \quad (14)$$

Для описания этой задачи на основании экспертных оценок технологического персонала составлена нечеткая переходная таблица, которая связывает лингвистические и числовые значения координирующих сигналов:

1. Производительность, т:	
«очень низкая»	150 – 350
«низкая»	350 – 550
«средняя»	550 – 650
«высокая»	650 – 850
«очень высокая»	850 – 1100
2. Качество агломерата, % Fe:	
«очень низкое»	51 – 53
«низкое»	53 – 55
«среднее»	55 – 56
«высокое»	56 – 58
«очень высокое»	58 – 60
3. Расход электроэнергии, кВт·ч:	
«очень низкий»	6000 – 9500
«низкий»	9500 – 12500
«средний»	12500 – 13000
«высокий»	13000 – 15000
«очень высокий»	15000 – 18000

После решения и анализа n локальных задач нечеткой оптимизации управляющий центр может выбрать соответствующую управляющую лингвистическую команду: «увеличить», «уменьшить» или «оставить», как это показано в табл. 3, тем самым изменяя приоритеты управления в зависимости от текущей ситуации на производстве.

Таблица 1

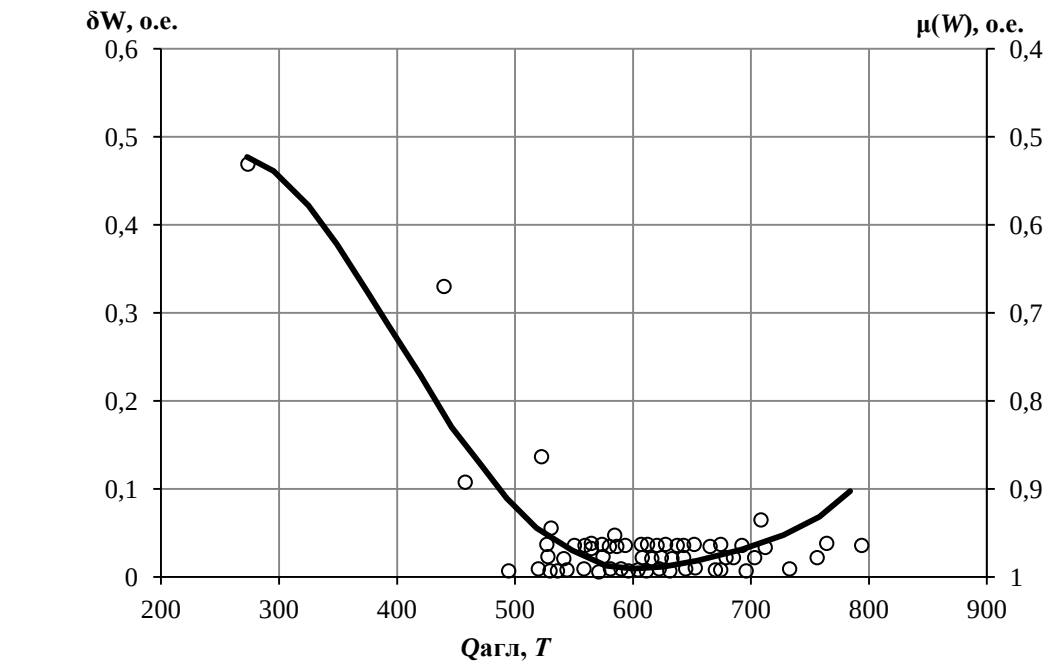
Матрица парных коэффициентов корреляции для энергетических и технологических показателей аглофабрики

	Qагл	Тонк.к	Возврат	Флюсы	Тв,топл	Fe	FeO	Осн-ть	Мелочь
Q агл	1								
Тонк. к-т	0,848	1							
Возврат	0,553	0,688	1						
Флюсы	0,523	0,439	0,155	1					
Тв,топл	0,164	0,207	0,217	0,381	1				
Fe	0,503	0,740	0,582	0,165	0,159	1			
FeO	-0,440	-0,228	-0,379	-0,621	-0,374	-4E-2	1		
Осн-ть	0,780	0,739	0,545	0,864	0,418	0,376	-0,669	1	
Мелочь	-0,710	-0,779	-0,675	-0,481	-0,535	-0,650	0,330	-0,705	1
W (кВт·ч)	0,679	0,386	0,149	-0,327	-0,292	0,249	0,276	0,043	-0,112

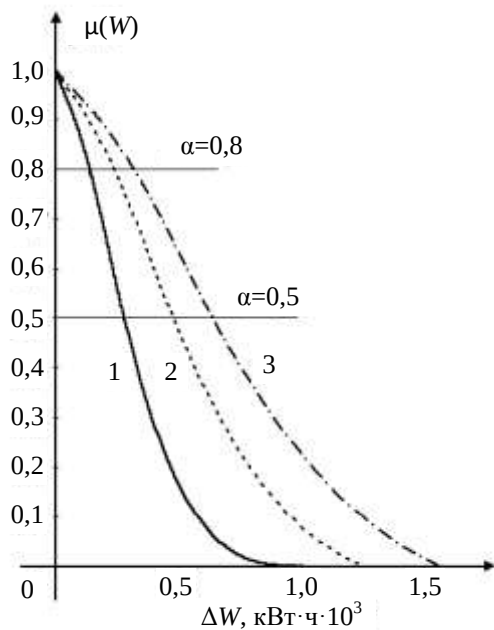
Таблица 2

Параметры нечеткой модели электропотребления для агломашины

Коэф-т	Переменная	Значения для уровней принадлежности α				
		- 0,5	- 0,8	1	0,8	0,5
a_0	–	-7756	-7050	-6343	-5637	-4931
a_1	H	1,045	1,015	0,9847	0,9543	0,924
a_2	$Q_{\text{агл}}$	2,598	2,474	2,349	2,225	2,101
a_3	$t_{\text{зак}}$	3,237	3,101	2,966	2,831	2,695
a_4	$V_{\text{л}}$	946,4	934,2	922,0	909,8	897,6
a_5	Тонк. к-т	42,04	41,86	41,69	41,51	41,33



a



b

Отклонение производительности от нормального хода процесса:

1 - $Q_{agl} \leq 450$ т/смен.

2 - $450 \leq Q_{agl} \leq 550$ т/смен.

3 - $\Delta Q_{agl} > 600$ т/смен.

Рис. 3. Функции принадлежности для нечетких значений электропотребления: а – экспериментальная зависимость дисперсии электропотребления от режима работы (производительности); б – расчетные функции принадлежности, аппроксимированные для трех уровней принадлежности $\alpha=0,5; 0,8; 1$

Таблица 3

Функции принадлежности нечетких координирующих сигналов

Терм-множества	Координирующий сигнал	Лингвистические команды	Диапазон изменения $\tilde{\omega}_{i,j}$, отн.ед.
«мало»	$\tilde{\omega}_{i,1}$	«увеличить»	0,393 – 0,408
«норма»		«оставить»	0,364 – 0,393
«много»		«уменьшить»	0,349 – 0,364
...	...	...	...
«мало»	$\tilde{\omega}_{i,3}$	«увеличить»	0,636 – 0,651
«норма»		«оставить»	0,607 – 0,636
«много»		«уменьшить»	0,592 – 0,607

Численные значения координирующих сигналов в переходной таблице представляют собой выраженные в относительных единицах компоненты оптимально-компромиссного режима $\tilde{\omega}_{ij}$, соответствующие задаче (13).

По данным базового 2002 года принимаем обобщенные экономические показатели: $c_{i,1}=98,3$ руб./т; $c_{i,3}=0,31$ руб./кВт·ч.

На нулевой итерации (в существующем режиме) выходные значения показателей нижнего уровня (производительность и электропотребление) составляли:

$$\begin{aligned}\tilde{f}_{i,1} &= 605,86 \text{ т/смен.} := \text{«средний»}; \\ \tilde{f}_{i,3} &= 12870 \text{ кВт} \cdot \text{ч/смен.} := \text{«средний»}; \\ Q_{a2l} &= \sum_{i=1}^n \tilde{f}_{i,1} = 2423,44 \text{ т/смен.}; \\ W &= \sum_{i=1}^n \tilde{f}_{i,3} = 51480 \text{ кВт} \cdot \text{ч/смен.}\end{aligned}$$

При этом значение целевой функции центра (экономический эффект): $\Phi_0=254071$ руб./смен.

Оператор, имея в своем распоряжении альтернативные лингвистические команды (см. табл. 3), корректирует ход технологического процесса, например в сторону увеличения производительности.

В результате предварительного решения задачи центра определяют численные значения координирующих сигналов:

$$\tilde{\omega}_{i,1} = 0,408; \quad \tilde{\omega}_{i,3} = 0,592,$$

и после повторного пересчета программа-советчик диспетчера выдает новые значения:

$$\begin{aligned}\tilde{f}_{i,1} &= 696,94 \text{ т/смен.} := \text{«высокий»}; \\ \tilde{f}_{i,3} &= 11268 \text{ кВт} \cdot \text{ч/смен.} := \text{«низкий»}; \\ Q_{a2l} &= \sum_{i=1}^n \tilde{f}_{i,1} = 2787,75 \text{ т/смен.}; \\ W &= \sum_{i=1}^n \tilde{f}_{i,3} = 45072 \text{ кВт} \cdot \text{ч/смен.}\end{aligned}$$

Соответственно оптимальное значение целевой функции центра $\Phi_1=260063,7$ руб./смен. Таким образом, сменная производительность аглофабрики увеличится на 364 т, электропотребление сократится на 6408 кВт·ч, а прибыль возрастет на 5992 руб. в смену.

Если эти показатели не устраивают оператора (например, из-за превышения лимитов на энергоресурсы), он корректирует управляющие команды и вновь направляет их на элементы нижнего уровня. В итоге, активный диалог человека и ЭВМ позволяет достигнуть наиболее реального компромиссного решения, не ограниченного жесткими логическими альтернативами обычных алгоритмов управления. Это облегчает работу и расширяет возможности диспетчера-оператора, который в своей деятельности может руководствоваться не только жесткими альтернативами, но и конкретной ситуацией на производстве, прибегая при этом к помощи своей интуиции и опыта.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе рассмотрены актуальные задачи анализа и управления режимами электропотребления в условиях энергоемкого горно-металлургического производства путем установления закономерностей электропотребления основных переделов, разработки научно-методических вопросов прогнозирования и оптимизации расхода электроэнергии, направленных на снижение энергозатрат и повышение оперативности и точности расчетов показателей электропотребления.

Основные результаты проведенных исследований:

1. Установлены характерные режимные особенности и ключевые факторы, определяющие электропотребление энергоемких агрегатов и цехов. Выбран адекватный аналитический и математический аппарат для описания различных уровней управления энергохозяйством крупного многономенклатурного производства.

2. Подробно рассмотрены достоинства и недостатки существующих методик теоретического (аналитического) описания процессов энергопотребления. Предложены варианты повышения их эффективности и адаптации к современным технико-экономическим задачам.

3. Для моделирования технологических процессов в меняющихся условиях производства с неполной исходной информацией предложено использовать математический аппарат теории нечетких множеств, позволяющий более корректно экстраполировать полученные модели при оптимизационных расчетах и оперативном управлении. Сформулированы основные критерии управления и предложена методика определения оптимально-компромиссного технологического режима.

3. Для реализации математических моделей на практике разработаны алгоритмы оперативного управления технологическим процессом, базирующейся на теории нечеткой многоцелевой оптимизации и принципе адаптивного управления производством посредством активного диалога технолога-оператора и ЭВМ.

Реализация результатов работы, проведенная на базе ОАО «ММК», позволила повысить эффективность управления производством и на 7-10% сократить удельный расход электроэнергии в аглодоменном и прокатном переделах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Энергосбережение и управление энергопотреблением. Теория и практика: монография / Г.В. Никифоров, В.К. Олейников, Б.И. Заславец, А.Н. Шеметов. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2013. 422 с.
2. Метод прогнозирования электропотребления промышленного предприятия / Л.С. Казаринов, Т.А. Барбасова и др. // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2014. Т.14. №1. С.5-13.
3. Alfares H.K., Nazeeruddin M. Electric load forecasting: literature survey and classification of methods. International Journal of Systems Science. 2002, vol. 33, no.1, pp. 23-34.
4. Filik U.B., Gereke O.N., Kurban M. Hourly Forecasting of Long Term Electric Energy Demand Using a Novel Modeling Approach. Fourth International Conference on Innovative Computing, Information and Control (ICICIC). 2009, pp.115-118.

5. Ghods L., Kalantar M. Different Methods of Long-Term Electric Load Demand Forecasting; A Comprehensive Review. Iranian Journal of Electrical & Electronic Engineering. 2011, vol.7, pp. 249-259.
6. Paoletti S., Casini M., Giannitrapani A., Facchini A., Garulli A., Vicino A. Load forecasting for active distribution networks. 2nd IEEE PES International Conference and Exhibition on Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Europe). 2011, pp.1-6.
7. Гофман И.В., Госпитальник Г.Л. Организация и планирование энергохозяйств промышленных предприятий. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1954. 439 с.
8. Авилов-Карнаухов Б.Н. Электроэнергетические расчеты для угольных шахт. М.: Недра, 1969. 103 с.
9. Белых Б.П., Свердель И.С., Олейников В.К. Энергетические характеристики и электропотребление на горнорудных предприятиях. М.: Недра, 1971. 248 с.
10. Шеметов А.Н., Олейников В.К., Махнев А.М. К вопросу определения удельных норм электропотребления в металлургическом производстве // Электротехнические системы и комплексы. 2003. №9. С. 142-149.
11. Wayne G.H., Possibility Theory and Fuzzy Sets: Theory of Applications to Energy and Environmental Policy Analysis. The J. Energy and Development. 1991, vol.17, no.1, pp.47-64.
12. Van Geert E., Glende I., Halberg N. et al. Methods for Planning under Uncertainty. Towards Flexibility in Power System Development. Electra. 1995, no.161, pp.143-163.
13. Алиев Р.А., Церковный А.Э., Мамедова Г.А. Управление производством при нечеткой исходной информации М.: Энергоатомиздат, 1991. 240 с.
14. Деменков Н.П. Нечеткое управление в технических системах. М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2005. 200 с.
15. Шеметов А.Н., Олейников В.К. Управление электропотреблением в агломерационном производстве при нечеткой исходной информации // Электрика. 2003. №5. С.24-27.
16. Шеметов А.Н., Муссиоров Е.К., Шулепов П.А. Проблемы повышения адекватности учета электроэнергии в условиях ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» // Электротехнические системы и комплексы. 2012. № 20. С. 199-203.

Поступила в редакцию 14 июня 2016 г.

INFORMATION IN ENGLISH

MODERN PROBLEMS AND PROSPECTS OF MODEL FORMING OF ENERGY MANAGEMENT AT ENTERPRISES OF MINING AND METALLURGICAL COMPLEX

Andrey N. Shemetov

Ph.D. (Eng.), Associate Professor, the Department of Power Supply of Industrial Enterprises, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: shemetov-a-n@yandex.ru.

Svetlana V. Fedorova

Ph.D. (Eng.), head of Department of Energy, Technical University of UMMC, Verkhnyaya Pyshma, Sverdlovsk region, Russia. E-mail: s.fedorova@ugmk.com.

Sergey V. Kuznetsov

Graduate student, Technical University of UMMC, Serov, Sverdlovsk region, Russia. E-mail: kordinator30@yandex.ru.

Roman N. Lyapin

Graduate student, Technical University of UMMC, Zmeinogorsk, Altai Krai, Russia. E-mail: lyapinrn@sib-pm.ru.

The article considers scientific and methodological basis of the energy management of mining and metallurgical enterprises from the formation of mathematical models of energy consumption to the operational management of power modes. It reviews domestic and foreign experience in theoretical optimization of technological modes and energy saving. Main features of the energy consumption of mining and metallurgical enterprises were outlined. Original adaptive models were offered to control energy-intensive consumers of electricity; the offered models are based on the theory of fuzzy sets.

Keywords: Power utilities, power consumption, dispatching control, optimization, mining and metallurgical complex.

REFERENCES

1. Nikiforov G.V., Oleynikov V.K., Zaslavets B.I., Shemetov A.N. *Energoberezhenie i upravlenie energopotrebleniem* [Energy Saving and Energy Management. Theory and Practical Training]. Magnitogorsk, Publishing center of Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2013. 422 p.
2. Kazarinov L.S., Barbasova T.A. et al. Prediction Procedure of Power Consumption at Industrial Enterprise. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo uni-versiteta. Seriya:*
3. Alfares H.K., Nazeeruddin M. Electric load forecasting: literature survey and classification of methods. *International Journal of Systems Science*. 2002, vol. 33, no.1, pp. 23-34.
4. Filik U.B., Gerek O.N., Kurban M. Hourly Forecasting of Long Term Electric Energy Demand Using a Novel Modeling Approach. *Fourth International Conference on Innovative Computing, Information and Control (ICICIC)*. 2009, pp.115-118.
5. Ghods L., Kalantar M. Different Methods of Long-Term Electric Load Demand Forecasting; A Comprehensive Review. *Iranian Journal of Electrical & Electronic Engineering*. 2011, vol.7, pp. 249-259.
6. Paoletti S., Casini M., Giannitrapani A., Facchini A., Garulli A., Vicino A. Load forecasting for active distribution networks. 2nd IEEE PES International Conference and Exhibition on Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Europe). 2011, pp.1-6.
7. Gofman I.V., Gospital'nik G.L. *Organizatsiya i planirovanie*

Komp'yuternye tekhnologii, upravlenie, radioelektronika [Proceedings of the South-Ural State University. Series: Information technology, control, radio electronics], 2014, vol.14, no.1, pp.5-13. (In Russian)

- energohozyaystv promyshlennykh predpriyatiy* [Organization and Planning of Power Facilities at Industrial Enterprises]. Moscow, Leningrad, Gosenergoizdat Publ., 1954. 439 p.
8. Avilov-Karnaukhov B.N. *Elektroenergeticheskie raschety dlya ugolnykh shakht* [Calculation of Power Consumption for Coal Mines]. Moscow, Mineral resources Pibl., 1969. 103 p.
 9. Belykh B.P., Sverdel' I.S., Oleynikov V.K. *Energeticheskie kharakteristiki i elektropotreblenie na gornorudnykh predpriyatiyakh* [Energy Characteristics and Energy Consumption at Mining Enterprises]. Moscow, Mineral resources Publ., 1971. 248 p.
 10. Shemetov A.N., Oleynikov V.K., Makhnev A.M. The Issue of Calculation of Rated Power Consumption in Metallurgy. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2003, no.9, pp. 142-149. (In Russian)
 11. Wayne G.H., Possibility Theory and Fuzzy Sets: Theory of Applications to Energy and Environmental Policy Analysis. *The J. Energy and Development*. 1991, vol.17, no.1, pp.47-64.
 12. Van Geert E., Glende I., Halberg N. et al. Methods for Planning under Uncertainty. Towards Flexibility in Power System Development. *Electra*. 1995, no.161, pp.143-163.
 13. Aliev R.A., Tserkovnyy A.E., Mamedova G.A. *Upravlenie proizvodstvom pri nechetkoy iskhodnoy informatsii* [Production Management in Terms of Indefinite Source Information]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1991. 240 p.
 14. Demenkov N.P. *Nechetkoe upravlenie v tekhnicheskikh sistemakh* [Fuzzy Control in Engineering Systems]. Moscow, Publishing center of Bauman MSTU, 2005. 200 p.
 15. Shemetov A.N., Oleynikov V.K. [ower Consumption Control at Sintering Plants under Fuzzy Source Information Conditions. *Elektrika* [Electrical engineering], 2003, no.5, pp.24-27.
 16. Shemetov A.N., Mussirov E.K., Shulepov P.A. The problem of electric power metering performance in FSBEI HPE Nosov Magnitogorsk State Technical University. *Systems and Complexes*, 2012, no. 20, pp. 199-203. (In Russian)

Шеметов А.Н., Федорова С.В., Кузнецов С.В., Ляпин Р.Н. Современные проблемы и перспективы формирования модели управления энергохозяйством на предприятиях горно-металлургического комплекса // *Электротехнические системы и комплексы*. 2016. №4(33). С.41-48. doi: 10.18503/2311-8318-2016-4(33)-41-48

Shemetov A.N., Fedorova S.V., Kuznetsov S.V., Lyapin R.N. Modern Problems and Prospects of Model Forming of Energy Management at Enterprises of Mining and Metallurgical Complex. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2016, no. 4 (33), pp. 41-48. (In Russian). doi: 10.18503/2311-8318-2016-4(33)-41-48

Бунин А.А.¹, Газизова О.В.², Тарасов В.М.¹

¹ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат»

²ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»

АНАЛИЗ СТАТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ И ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ СИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ ИХ ПОДКЛЮЧЕНИИ К ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМ ЧАСТОТЫ С ИЗМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА РАБОТЫ

Усовершенствование технологического процесса металлургических производств и повышенные требования к снижению себестоимости продукции в условиях рыночной конкуренции требуют применения более экономичных и гибких систем электропитания мощных двигателей. В связи с этим питание крупных синхронных двигателей осуществляется не напрямую от сети трехфазного переменного тока, а посредством преобразователей частоты, что приводит к изменению не только энергопотребления, но и устойчивости узла электрической нагрузки в целом. Такой переход, с одной стороны, существенно повышает энергетическую эффективность производства на счет снижения потребляемой электроэнергии. С другой стороны, синхронные двигатели прекращают быть источниками реактивной мощности, что может при большой электрической удаленности снизить устойчивость оставшихся в параллельной работе с энергосистемой двигателей. В данной статье рассмотрены вопросы анализа статической устойчивости синхронных двигателей в узле нагрузки, содержащем крупные синхронные двигатели, питающиеся как через преобразователи частоты, так и непосредственно от энергосистемы, а также источники распределенной генерации относительно небольшой мощности с помощью разработанного программного комплекса. Даны рекомендации по повышению статической устойчивости синхронных двигателей. Исследовано изменение энергопотребления нагнетателей как основных потребителей электрической энергии кислородно-конвертерного цеха при замене преобразователей частоты, предназначенных для пуска, на полностью регулируемый частотный преобразователь с одновременным перестроением технологической схемы их работы на примере системы электроснабжения ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат». На основе полученных экспериментальных данных выполнен анализ изменения параметров работы нагнетателей при замене преобразователей частоты, предназначенных для пуска, на преобразователи частоты для постоянной работы. Произведено исследование выбранной циклограммы работы привода и пантографа. Разработаны мероприятия по повышению энергетической эффективности работы новых приводов в части изменения частоты и временных интервалов разгона - торможения. Полученные материалы могут служить основой для дальнейшего повышения энергоэффективности мощных синхронных двигателей с вентиляторным моментом сопротивления на валу в различных циклах производства.

Ключевые слова: синхронный генератор, синхронный двигатель, статическая устойчивость, промышленное предприятие, установившийся режим, программное обеспечение, система электроснабжения, энергетическая эффективность, потребление электроэнергии, нагнетатель, преобразователь частоты.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время энергосбережение в России входит в пятерку приоритетных направлений развития экономики. До одной трети всех производимых в стране энергоресурсов расходуется нерационально. Энергоемкость ВВП России по оценкам экспертов в среднем в 4-5 раз выше, чем в странах Западной Европы [1]. Именно поэтому одним из главных приоритетов новой энергетической политики России является повышение эффективности использования энергетических ресурсов. Принятие закона «Об энергосбережении и повышении энергетической эффективности» подчеркивает высокую актуальность решения задач по увеличению производительности, снижению энергопотребления и повышению энергоэффективности в промышленном секторе экономики Российской Федерации [1-3].

Одним из крупнейших потребителей электроэнергии в промышленном секторе является сталелитейное производство. Сталелитейный передел ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» включает два цеха: кислородно-конвертерный (далее ККЦ) и электросталеплавильный цех. В данной статье рассматривается кислородно-конвертерный цех, который является самым мощным производственным подразделением

и основным производителем стали ОАО «ММК», его доля в общем производстве стали достигает 90 %, или 950 тыс. тонн продукции в натуральном выражении (по данным ЦЭСТ ОАО «ММК»). Ежесуточное потребление электроэнергии ККЦ составляет 1200-1500 тыс. кВт·ч (по данным ЦЭСТ ОАО «ММК»). Суточное электропотребление ККЦ (без электропечных установок) составляет 800-900 тыс. кВт·ч из них 280-320 тыс. кВт·ч приходится на нагнетатели конвертерного отделения, это порядка 30 %.

В связи с этим перспективной является разработка мероприятий, направленных на повышение эффективности работы нагнетателей. К таким мероприятиям относится использование частотных преобразователей при управлении режимами синхронных двигателей.

Однако при постоянной работе двигателя через преобразователь он перестает выдавать в сеть реактивную мощность, что при существенной электрической удаленности от энергосистемы может привести к снижению устойчивости синхронных и асинхронных двигателей, работающих в параллель с энергосистемой. В случае применения источников распределенной генерации, они также должны будут принимать участие в выработке реактивной мощности. В таких условиях для повышения устойчивой работы двигательной нагрузки может быть повышена пропускная способность ЛЭП, использованы возможности источников местной

генерации по выработки реактивной мощности или возможности РПН.

Исследованию статической и динамической устойчивости синхронных генераторов, линий электропередачи и нагрузки посвящено большое число работ [4-7]. Особый интерес представляет режим выхода источников распределенной генерации с нагрузкой на раздельную с энергосистемой работу [8-11]. Исследованию динамической устойчивости двигателей посвящены работы [12-14]. Большая часть существующих работ ориентирована на крупные энергосистемы и не учитывает особенности промышленных [15-19]. В условиях усложнения конфигураций промышленных систем электроснабжения и изменения схем питания электроприемников актуальным, особенно при наличии источников распределенной генерации, является исследование статической устойчивости промышленных генераторов и нагрузки [20, 21], работы двигателей в условиях местной несимметрии [22-24], а также планирование оптимальных режимов [25-27]. С другой стороны, постоянное усложнение систем электроснабжения с целью повышения экономических и технических характеристик требует постоянного анализа надежности [28-31].

Разработанный на кафедре ЭПН МГТУ им. Носова программный комплекс КАТРАН позволяет исследовать статическую устойчивость двигателей в узле сложной конфигурации при наличии электрически близких собственных источников распределенной генерации.

МЕТОДИКИ

В качестве объекта исследования выступали нагнетатели конвертерного отделения кислородно-конвертерного цеха ОАО «ММК». Упрощенная однолинейная схема электроснабжения ПС №29, распределительное устройство дымососного отделения и блока очистных сооружений приведены на **рис. 1**.

При выплавке стали в конвертерном производстве основным продуктом является технический кислород. В результате химических реакции в конвертере основным побочным продуктом при производстве стали является СО – монооксид углерода. Для удаления газа из рабочей зоны конвертера применяются нагнетатели. До завершения реконструкции в качестве привода нагнетателя используется синхронный двигатель напряжением 10 кВ типа СДЗ-5600 в паре с преобразователем частоты типа ПЧВС. Основной функцией морально устаревшего ПЧВС является плавный разгон двигателя до частоты 50 Гц, синхронизация его с сетью и перевод двигателя на номинальный режим работы параллельно с сетью. В номинальном режиме работы основным устройством, регулирующим мощность двигателя, является пантограф – задвижка, регулирующая разрежение газа на выходе газоотводящего тракта.

Если рассмотреть циклограмму работы пантографа (**рис. 2**) в течение плавки, очевидно, что наибольшее разрежение газа и соответственно максимальная мощность двигателя необходима на двух этапах плавки: заливка чугуна (состояние 26) и непосредственно продувка кислородом (состояние 5). В других циклах работы мощность двигателя снижается до минимально возможной по условиям механической стойкости газо-

отводящего тракта за счет закрытия пантографа. Изменение мощности нагнетателя в течение цикла плавки (см. **рис. 2**). По результатам статистического анализа мощность во время заливки чугуна изменяется в пределах 4,9-5,6 МВт, во время продувки 4,2-4,9 МВт.

Рассматривая настоящую технологическую карту работы нагнетателя с учетом всех параметров, экологических и производственных рисков. Следует обратить внимание, что работа нагнетателя в режимах, отличных от заливки чугуна и продувки кислородом, требуется с мощностью не более 0,5 МВт.

Реализовать работу двигателя нагнетателя на мощности 0,5-0,6 МВт на действующем электрооборудовании не представлялось возможным. В настоящее время произведена замена устаревшего ПЧВС на современный преобразователь частоты ATV1200, выполненный по технологии многоуровневой широтно-импульсной модуляции (ШИМ) с выходными инверторами на IGBT-транзисторах и предназначенный для управления асинхронными и синхронными высоковольтными двигателями напряжением 10000 В и максимальным выходным током до 480 А [32]. С помощью современного электрооборудования на практике, изменяя алгоритм работы, реализуем новый номинальный режим работы двигателя нагнетателя непосредственно от преобразователя частоты. Режим работы двигателя параллельно с сетью рассматривается как ремонтный (для вывода в ремонт ПЧ без остановки конвертера), либо аварийный (при аварии основного контроллера).

Питание двигателя осуществляется через преобразователь частоты по закону управления ($U/f = \text{const}$). Управление возбуждением в режиме работы от ПЧ берет на себя преобразователь частоты. Управление осуществляется с помощью регулятора косинуса с законом $\cos\varphi=1$, выдающим задание на вход возбудителя. В новой схеме регулирование мощности двигателя осуществляется совокупным управлением: частотой преобразователя частоты и степенью открытия пантографа.

В настоящее время в обобщенной форме циклограмма представляет собой вид, представленный на **рис. 3**:

1. Межпродувочный интервал: работа двигателя на частоте 30 Гц с минимальным открытием пантографа.
2. Завалка металлолома: разгон двигателя и работа на частоте 50 Гц.
3. Заливка чугуна: работа двигателя на частоте 50 Гц с максимальным открытием пантографа.
4. Продувка шихты кислородом: работа двигателя на частоте 50 Гц с требуемым по технологии плавки регулированием мощности с помощью пантографа.
5. Слив стали – торможение двигателя и работа на частоте 30 Гц с минимальным открытием пантографа.

В данной циклограмме снижение энергопотребления осуществляется на следующих циклах плавки: межпродувочный интервал и слив стали (далее – режим экономии). Также снижение энергопотребления достигается в ремонтные периоды конвертера, когда работа нагнетателя необходима с мощностью не более 1 МВт. В настоящее время отлажена работа двигателя со снижением частоты до 30 Гц в заданных ранее циклах. Потребляемая активная мощность двигателя на частоте 30 Гц составляет не более 1200 кВт.

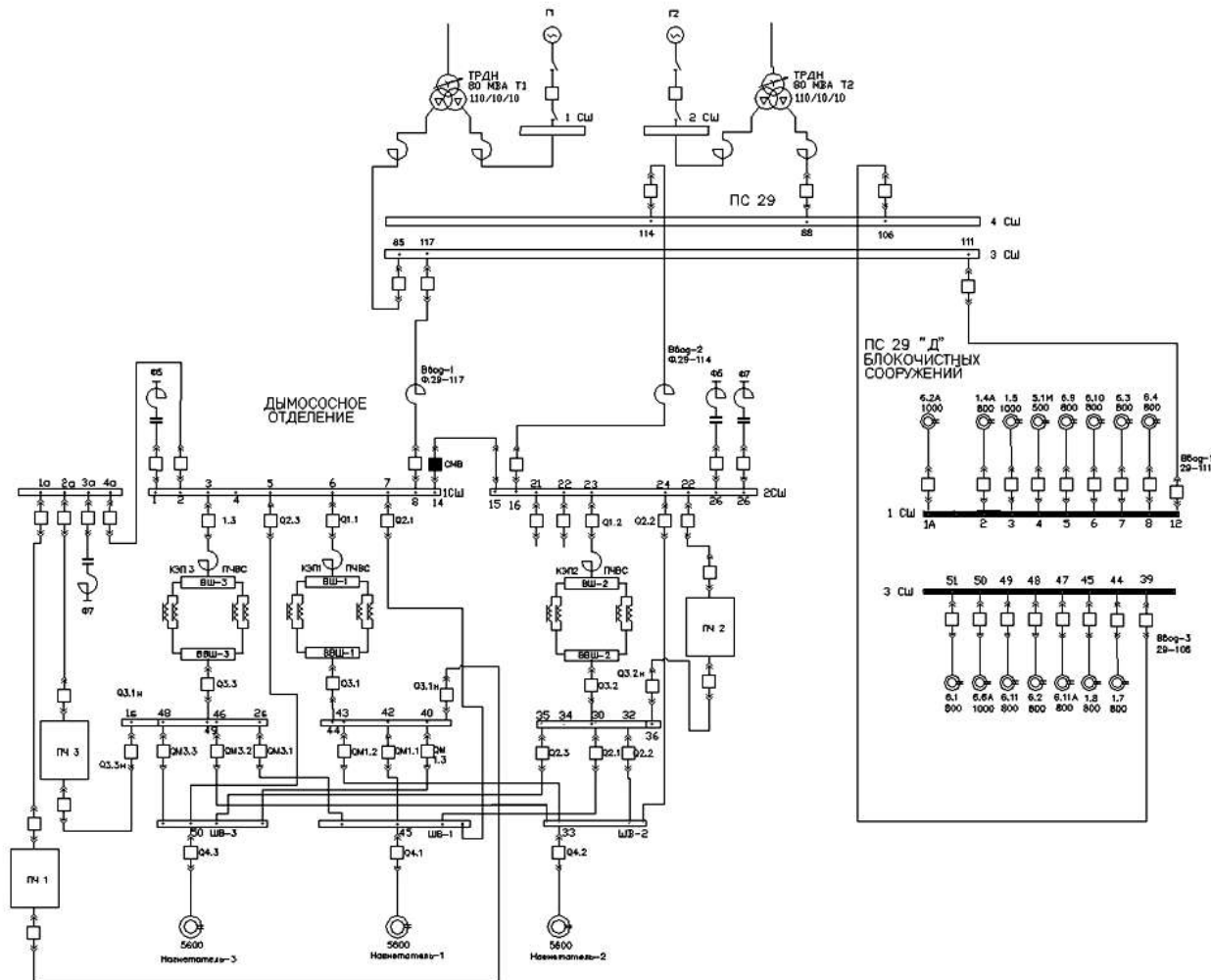


Рис. 1. Упрощенная однолинейная схема электроснабжения подстанций ПС №29, ПС №29Г, ПС №29

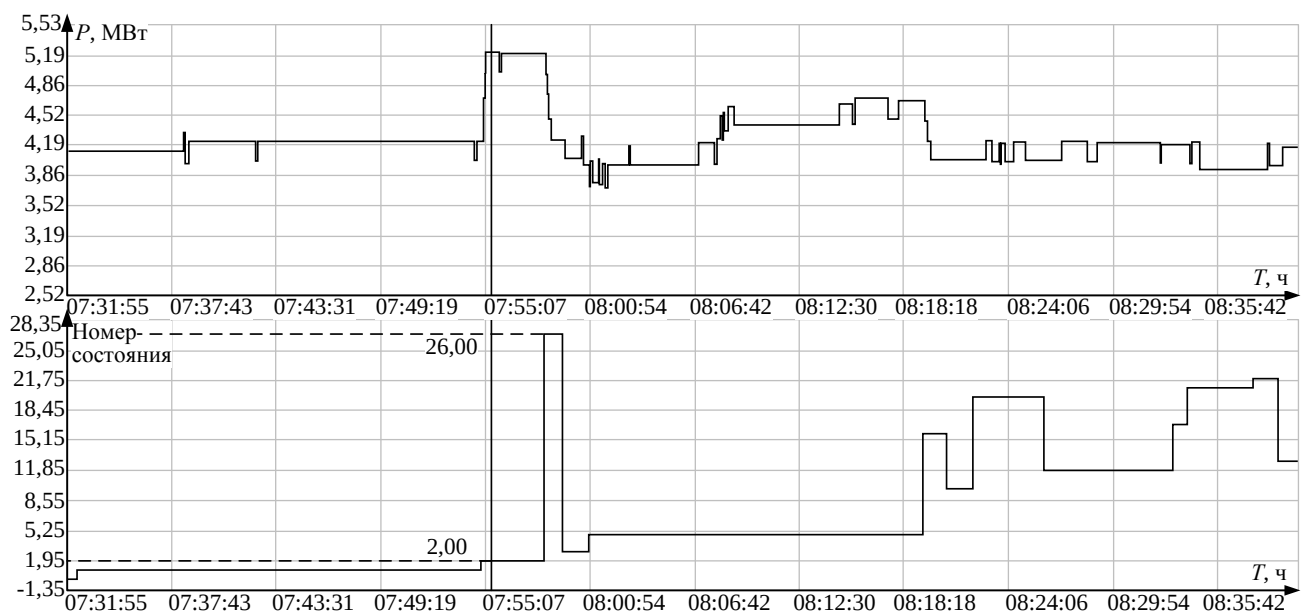


Рис. 2. График изменения мощности двигателя в течение одного цикла плавки

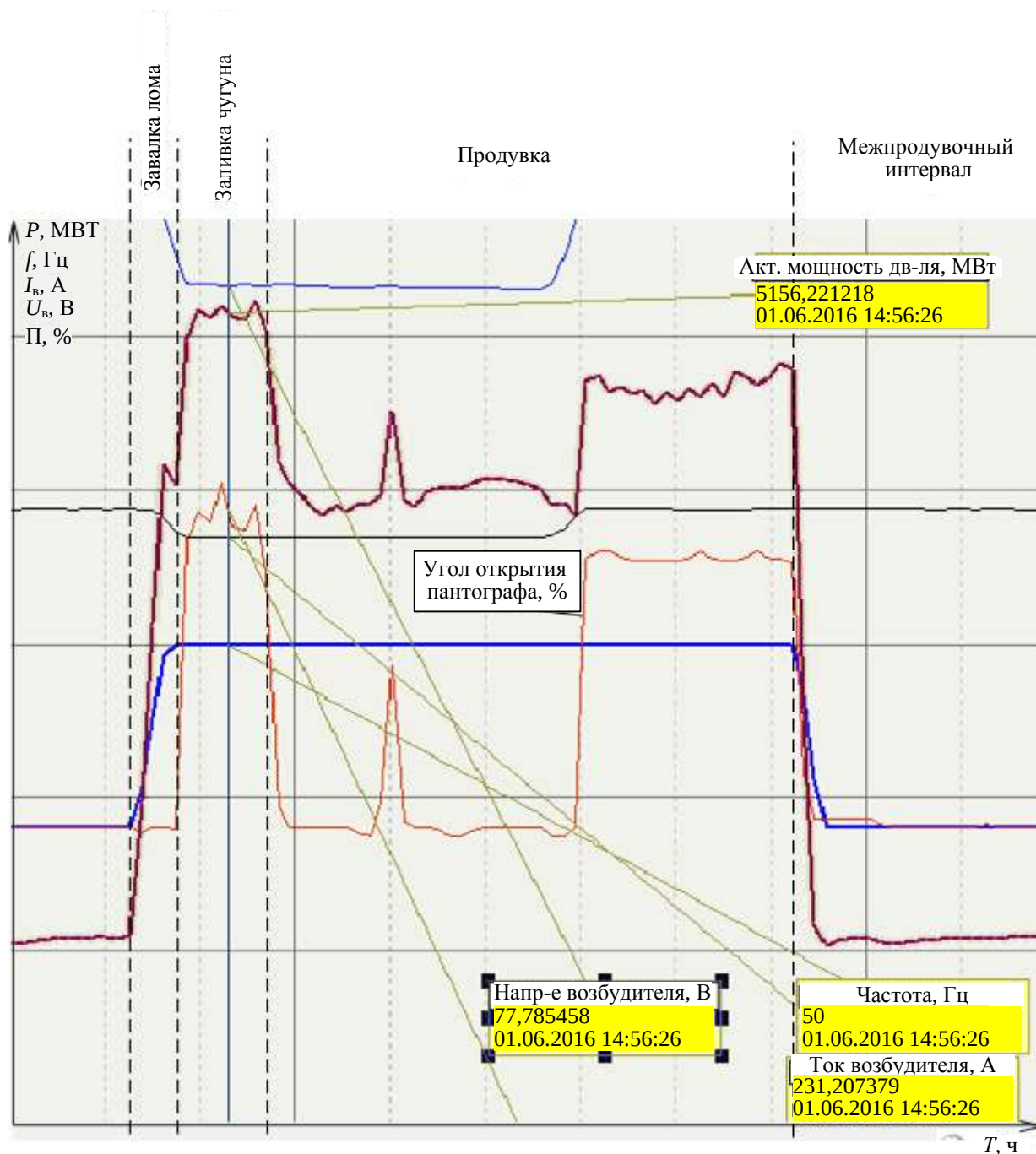


Рис. 3. График изменения мощности двигателя, частоты, угла открытия пантографа

В представленном исследовании расчеты экономии электроэнергии делались с учетом объемов производства стали по методике, предлагаемой в трудах [33, 34].

На первоначальном этапе был произведен сбор архивных данных по месячной выплавке стали и энергопотреблению дымососного отделения за тот же период. Полученные данные ранжируются по возрастанию значений объема выплавленного жидкого металла в ККЦ. Формируется ряд значений объема выплавленного жидкого металла от 700 000 до 900 000 т с шагом $k=9\,999$ т. Значения потребления электроэнергии отделением ККЦ и объема выплавленного жидкого металла за базовый период группируются по принятым интервалам. Значения потребления электроэнергии дымо-

сосным отделением ККЦ и объема выплавленного металла в каждом интервале усредняются по формулам:

$$E_m = \frac{\sum_i^{l+k} E\delta_m}{i}; \quad (1)$$

$$\Pi_m = \frac{\sum_i^{l+k} \Pi\delta_m}{i}, \quad (2)$$

где i – количество значений базового удельного расхода электроэнергии на тонну выплавленного жидкого металла, соответствующего рассматриваемому интервалу, шт.; m – номер интервала (табл. 1); l – значение объема выплавленного жидкого металла в ККЦ, соответствующее нижней границе интервала, т; k – значе-

ние шага изменения интервала выплавленного жидкого металла в ККЦ (принят равным 9 999 т); $E_{б_m}$ – значения потребления электроэнергии дымососным отделением ККЦ за базовый период, попавшие в рассматриваемый интервал m , кВтч; $П_{б_m}$ – значения объема выплавленного жидкого металла в ККЦ за базовый период, попавшие в рассматриваемый интервал m , т; E_m – среднее значение $E_{б_m}$, попавшее в рассматриваемый интервал m , кВтч; $П_m$ – среднее значение $П_{б_m}$, попавшее в рассматриваемый интервал m , т.

Чтобы охватить все возможные режимы производительности ККЦ, для тех интервалов выплавки металла, данные по которым в архиве отсутствуют, значения E_m и $П_m$ определяются как среднее значение из предыдущего и следующего интервала:

$$E_m = \frac{E_{m-k} + E_{m+k}}{2}; \quad (3)$$

$$П_m = \frac{П_{m-k} + П_{m+k}}{2}, \quad (4)$$

где E_{m-k} – среднее значение потребления электроэнергии дымососным отделением ККЦ в предыдущем интервале, кВтч; E_{m+k} – среднее значение потребления электроэнергии дымососным отделением ККЦ в последующем интервале, кВтч; $П_{m-k}$ – среднее значение объема выплавленного жидкого металла в ККЦ в предыдущем интервале, т; $П_{m+k}$ – среднее значение объема выплавленного жидкого металла в ККЦ в последующем интервале, т.

На основании данных **табл. 1** рассчитывается базовый удельный расход электроэнергии на тонну выплавленного металла, соответствующий каждому интервалу (режиму производства ККЦ):

$$W_m = \frac{E_m}{П_m}. \quad (5)$$

Значения W_m , соответствующие значениям объема выплавленного жидкого металла ниже 720 000 т, принимаются равными значению W_m в интервале 720 000 – 729 999 т. Значения W_m , соответствующие значениям объема выплавленного жидкого металла выше 879 999 т, принимаются равными значению W_m в интервале 870 000 – 879 999 т.

В расчетный период значение W_m для сравнения с фактическим удельным расходом на тонну выплавленного жидкого металла ККЦ принимается из того интервала m , которому соответствует фактический объем выплавленного жидкого металла ККЦ в расчетный период $Пф_m$. Предполагается, что значение $Пф_m$ попадает в заданный интервал, если оно больше нижней границы интервала и меньше верхней, т.е. соответствует условию: $1 \leq Пф_n \leq 1+k$.

Далее сравнивается фактический удельный расход электроэнергии на тонну выплавленного металла за расчетный месяц с базовым удельным расходом электроэнергии на тонну выплавленного металла из **табл. 1**.

$$Wф_n = \frac{Eф_n}{Пф_n}, \quad (6)$$

где $Eф_n$ – фактический расход электроэнергии на нужды дымососного отделения ККЦ в расчетный период, кВтч; $Пф_n$ – фактический объем выплавленного жидкого металла ККЦ в расчетный период, т.

Расчет величины экономии электрической энергии в расчетном периоде

$$\Delta W = \frac{W_m - Wф_n}{W_m} \cdot 100\%. \quad (7)$$

В настоящее время от новых преобразователей частоты работают два двигателя из трех.

Потребление электроэнергии синхронными двигателями за май месяц получаем двумя способами: по приборам учета электроэнергии; статистическим методом с использованием среднеквадратичной мощности за каждый период. Второй способ целесообразно использовать для расчета размера экономического эффекта отдельно по нагнетателю №1 и 3, так как прибор учета используется один на 2 нагнетателя. Результаты расчетов сведем в **табл. 2**.

Различие в значениях экономического эффекта нагнетателей №1 и 2 связано в большей степени с разным количеством простоев технологического оборудования и длительностью плановых ремонтов. В июне 2016 г. наблюдается выравнивание размера экономии в пределах 24-27 % относительно базового значения.

При анализе режимов работы двигателей нагнетателей от преобразователей частоты со снижением частоты в режимах экономии, а также изучении технологических режимов плавки нами был выдвинут ряд мероприятий по оптимизации использования частотного регулирования и дальнейшему повышению энергоэффективности.

Мероприятие №1 по дальнейшему снижению энергопотребления синхронных двигателей нагнетателей является их работа в режимах экономии на частоте 25 Гц. В настоящее время при апробации данных режимов работы проявляются недостатки маслостанции системы смазки подшипников двигателей, проявляющиеся в отсутствии регулирования мощности двигателей маслонасосов.

В результате на частоте 25 Гц избыточная мощность маслонасоса приводит к увеличению давления в системе смазки до критического. После установки частотного преобразователя и реализации управления двигателями маслонасосов будет произведен перевод двигателей нагнетателей с частоты 30 на 25 Гц в режимах экономии. Расчетное значение потребляемой мощности двигателя при снижении частоты с 30 до 25 Гц при минимальном значении открытия пантографа снижается соответственно с 1100 до уровня 560 кВт·ч. Данный расчет был доказан эмпирически.

Данное мероприятие способно довести уровень экономического эффекта до 30-32 % по результатам статистического анализа суточного расхода при работе с данной нагрузкой.

Мероприятие №2 заключается в оптимизации исходных данных – временных точек, определяющих начало разгона двигателя.

Для эффективного использования регулирования мощности двигателя в различных режимах необходимо рассчитать допустимые временные характеристики разгона двигателя с частоты 25 до 50 Гц.

Таблица 1

Значения удельного расхода электроэнергии на выплавку тонны металла в зависимости от объема выплавки металла (выборка)

№ интервала (m)	Нижняя граница интервала (l), т.	Верхняя граница интервала (l+k), т	Значения электропотребления за базовый период в заданном интервале ($E_{бm}$), кВт·ч	Значения объема выплавленного жидкого металла за базовый период в заданном интервале ($P_{бm}$), т.	Среднее значение электропотребления за базовый период в интервале (E_m), кВт·ч	Среднее значение выплавленного жидкого железа за базовый период (P_m), т	W_m , кВт·ч/т.
1	850 000	859 999	8830284,00	852328,00	8830284,00	852328,00	10,36
2	860 000	869 999	9221365,00 8810704,00 9299104,00	865002,00 866143,00 867920,00	9110391,00	866355,00	10,52
3	870 000	879 999	9167119,00 9179642,00	870907,00 877370,00	9173380,50	874138,50	10,49

Таблица 2

Значения удельного расхода электроэнергии на выплавку тонны металла в зависимости от объема выплавки металла

Параметр	Нагнетатель №1 на новых ПЧ	Нагнетатель №3 на новых ПЧ	Нагнетатель №2 на старых ПЧВС (по приборам) за май	Базовый из табл. 1 для соответствующего объема производства за период
Удельный расход электроэнергии на тонну выплавленного металла в мае 2016 г., кВт/т	8,15 (расчетный)	7,62 (расчетный)	10,25 (по приборам учета)	10,49
Расчетное значение размера экономии электропотребления в мае 2016 г., %	20,51	25,61	-	-

Номинальный момент двигателя

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n} = \frac{5600}{157} = 35669 \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad (8)$$

где угловая скорость

$$\omega_n = \frac{2\pi n_n}{60} = 157 \text{ рад/с}. \quad (9)$$

Момент, развиваемый двигателем, определяется статическим сопротивлением на валу двигателя и динамическими нагрузками

$$M = M_c + M_{дин}. \quad (10)$$

Примем, что в установившемся режиме M_c и I_c связаны линейной зависимостью. В этом случае

$$I_{c.max} = \frac{I_{c.n} M_{c.max}}{M_n} = \frac{370 \cdot 14715}{35669} = 153 \text{ А}. \quad (11)$$

Зададим условие, что в режиме разгона ток статора не должен превышать номинального значения. Отсюда следует, что величина динамического тока статора будет составлять

$$I_{дин} = I_{c.n} - I_{c.max} = 370 - 153 = 217 \text{ А}. \quad (12)$$

При неизменном темпе разгона

$$M_{дин} = M_c I_d \cdot I_c^{-1} = 20870 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (13)$$

Отсюда следует, что время разгона не должно быть меньше чем 2,8 мин.

$$T_{разг} = \frac{J_{сум.прив} \omega_n}{M_{дин}} = \frac{22640 \cdot 157}{20870} = 170 \text{ с}. \quad (14)$$

В настоящее время исходным параметром, определяющим время начала разгона двигателя, является изменение веса на подвеске главного подъема грузочных кранов при завалке металлолома. Но в реальных условиях интервал времени от начала завалки металлолома до начала заливки чугуна значительно больше 3 мин, необходимых для вывода нагнетателя на номинальную мощность.

Также в условиях производства наблюдаются режимы, когда заливка чугуна происходит через длительный промежуток времени, который определяется: отсутствием чугуна, десульфурацией чугуна, технологическими особенностями работы кранов и т.д. Тем

самым время начала разгона в ряде случаев выбирается с ошибкой, достаточно сильно влияющей на энергоэффективность предложенных инноваций. Данный режим раннего старта отражен на **рис. 4**.

Время выхода двигателя на работу с частоты 25 до 50 Гц равно 2 мин и совпадает с временем торможения до 25 Гц. Тем самым необходимо определить либо синтезировать в АСУ исходное условие для начала разгона двигателя, с учетом постоянной времени разгона 2 мин. Таким параметром может выступать сигнал из АСУ о изменении веса на подвесе главного подъема заливочных кранов в сочетании с назначением ковша на конкретный конвертер. Данное мероприятие способно повысить энергоэффективность на 1-2 %.

В заключение с помощью программного комплекса КАТРАН был произведен анализ статической устойчивости синхронных двигателей, оставшихся на параллельной работе с энергосистемой, с учетом снижения выработки реактивной мощности синхронными двигателями, приводящими нагнетатели, возможности от-

ключения источников распределенной генерации, изменения положения РПН и собственной реактивной мощности двигателей. Полученный алгоритм приведен на **рис. 5**.

Исследования проводились применительно к синхронному двигателю подстанции 29 Д номинальной мощностью 0,8 МВт, работающему с коэффициентом загрузки 0,85 и выдающему реактивную мощность 0,07 МВАр. Результаты расчета сведены в **табл. 3**.

Как видно из **табл. 3**, наибольшее влияние на устойчивость двигателя оказывает положение РПН питающего трансформатора и собственная выдаваемая реактивная мощность. Если двигатель не выдает реактивную мощность в сеть, то статическая устойчивость по мощности снижается до нормативных значений. Выдача мощности нагнетателями и генераторами не оказывает определяющего влияния. Однако при повышении сопротивления связи с энергосистемой эти факторы также начинают играть роль.

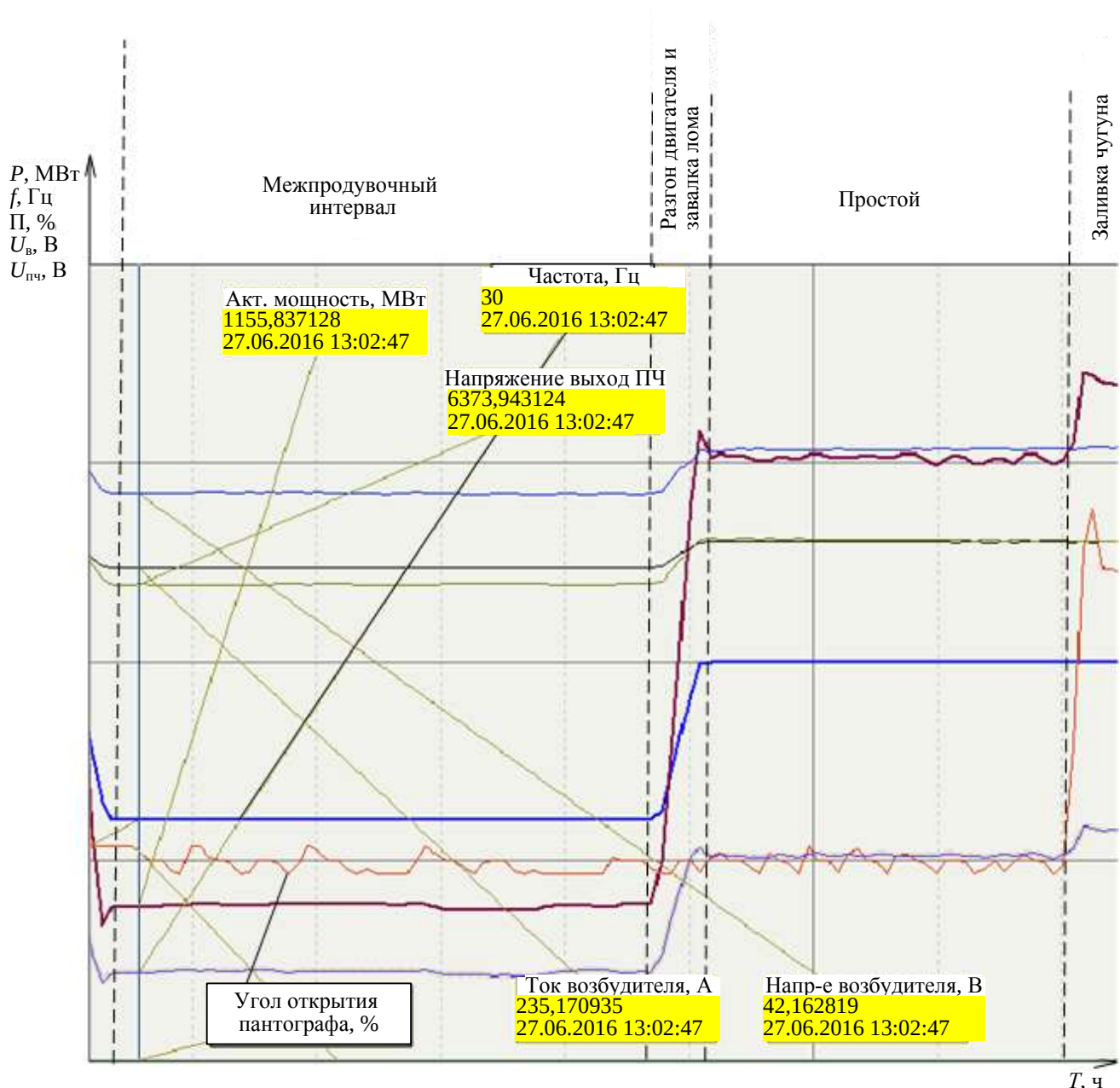


Рис. 4. Несоответствие точки начала разгона и реальной заливки чугуна

Таблица 3

Значения коэффициента запаса статической устойчивости синхронного двигателя, %, подключенного к ПС 29 Д при изменении режимов сети

Реактивная мощность двигателя, МВАр	Коэффициенты запаса устойчивости по напряжению и активной мощности	Генераторы в работе				Генераторы отключены			
		Нагнетатели подключены напрямую к сети (Q=2,44 МВАр)		Нагнетатели включены в сеть через преобразователи (Q=0 МВАр)		Нагнетатели подключены напрямую к сети (Q=2,44 МВАр)		Нагнетатели включены в сеть через преобразователи (Q=0 МВАр)	
		РПН в максимальном положении	РПН в минимальном положении	РПН в максимальном положении	РПН в минимальном положении	РПН в максимальном положении	РПН в минимальном положении	РПН в максимальном положении	РПН в минимальном положении
0	k_U	56	64	55	64	55	64	55	64
	k_P	13	39	12	38	13	39	12	38
0,1	k_U	59	67	58	66	58	67	58	66
	k_P	20	50	19	48	20	49	19	48
0,2	k_U	61	69	61	69	61	69	61	69
	k_P	29	60	28	59	29	60	28	59

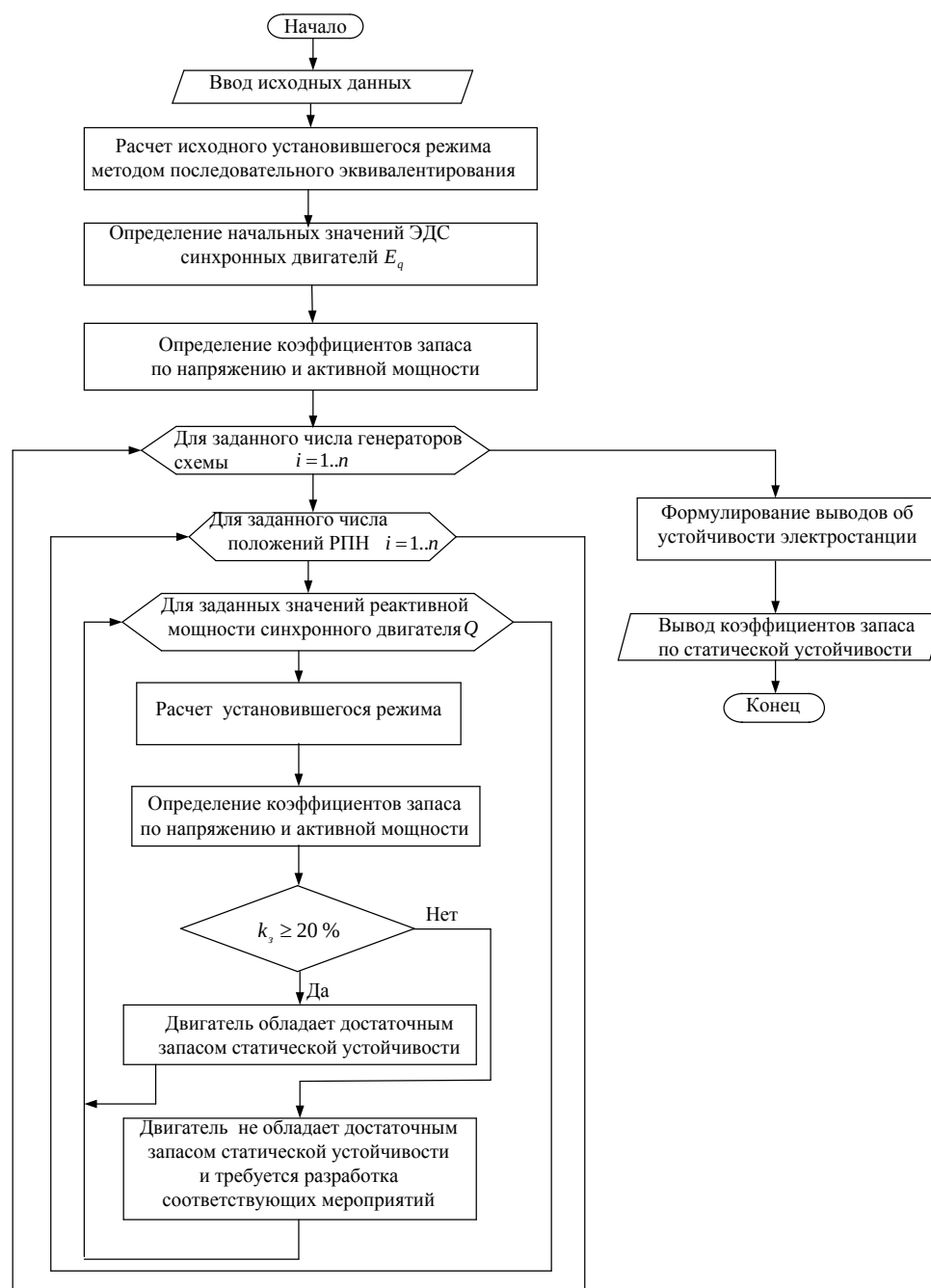


Рис. 5. Алгоритм анализа статической устойчивости синхронных двигателей в узле нагрузки, содержащем источники собственной генерации

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Реализация такого комплекса мероприятий по замене устаревших ПЧВС на полнорегулируемые частотные преобразователи, выполненные по технологии многоуровневой широтно-импульсной модуляции (ШИМ), повысит энергоэффективность таких мощных электрических приемников, как нагнетатели конвертерного на 25-27 %. При выполнении дополнительных мероприятий по оптимизации использования частотного регулирования, исходных данных для разгона и торможения двигателя возможно достичь снижения электропотребления рассматриваемым комплексом до 33-35 %.

Существует широкий технический потенциал повышения энергетической эффективности кислородно-конвертерного производства ОАО «ММК» за счет использования частотных преобразователей для регулирования мощности двигателей газоочистных сооружений и согласования их работы и нагрузки в зависимости от технологического процесса выплавки и обработки стали. Однако при использовании частотных преобразователей на мощных двигателях необходимо осуществлять проверку узла по статической устойчивости и при необходимости разрабатывать мероприятия по ее повышению.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Никифоров Г.В., Олейников В.К., Заславец Б.И., Шеметов А.Н. Управление энергопотреблением и энергосбережение: монография. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та. им. Г.И. Носова, 2013. 422 с.
2. Мещеряков В.Н., Туркин М.А. Энергосбережение при рациональном режиме работы синхронного двигателя при частотном регулировании // Системы управления и информационные технологии. 2007. Т. 27. № 1.1. С. 180-183.
3. Лисицин А.С., Эрнст А.В. Перспективы управления и частотного регулирования синхронных электрических двигателей // Динамика систем, механизмов и машин. 2014. № 1. С. 302-303.
4. Kothari D.P., Nagrath I.J. Power System Engineering. Second Edition. New Delhi, Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, 2008.
5. Кимбарк Э. Синхронные машины и устойчивость электрических систем. М.:Л.: Госэнергоиздат, 1960. 392 с.
6. Xiufeng S., Shiguang M. Research on Measures to Improve Stability of the Power System. Applied Mechanics and Materials, Vol. 742, 2015, pp. 648-652.
7. Hazarika D. New method for monitoring voltage stability condition of a bus of an interconnected power system using measurements of the bus variables. IET Generation, Transmission & Distribution. Oct 2012, Vol. 6, Issue 10, pp. 977-985.
8. Малафеев А.В., Буланова О.В., Ротанова Ю.Н. Исследование динамической устойчивости систем электроснабжения промышленных предприятий с собственными электростанциями при отделении от энергосистемы в результате короткого замыкания // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2008. № 17 (117). С. 72-74.
9. Влияние высоковольтных двигателей собственных нужд на надежность системы электроснабжения собственных нужд ТЭЦ ОАО «ММК» / А.В. Малафеев, О.И. Карандаева, Ю.Н. Ротанова, О.В. Буланова // Электротехнические системы и комплексы. 2009. № 17. С. 96-104.
10. Исследование сходимости метода расчета установившихся режимов систем электроснабжения при работе раздельно с энергосистемой / О.В. Буланова, В.А. Игуменцев, А.В. Малафеев, Ю.Н. Ротанова // Электротехнические системы и комплексы. 2005. № 10. С. 129-134.
11. Исследование эффективности работы делительной автоматики в системе электроснабжения промышленного предприятия черной металлургии / О.В. Газизова, А.В. Малафеев, В.М. Тарасов, М.А. Извольский // Промышленная энергетика. 2012. № 10. С. 12-17.
12. Расчет динамических характеристик синхронных и асинхронных двигателей промышленных предприятий с целью анализа устойчивости систем электроснабжения / В.А. Игуменцев, А.В. Малафеев, О.В. Буланова, Ю.Н. Ротанова // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2006. № 2. С. 71.-75.
13. Akagi H., Takahashi K., Kobayashi T., Sugihara H., Kai T. Analysis of an Adjustable Speed Rotary Condenser for Power System Stabilization. Electrical Engineering in Japan, Vol. 133, no. 1, 2000.
14. Xu Y., Dong Zh. Y., Zhao J., Xue Y., Hill D. J. Trajectory sensitivity analysis on the equivalent one-machine-infinite-bus of multi-machine systems for preventive transient stability control. The Institution of Engineering and Technology IET Gener. Transm. Distrib., 2015, Vol. 9, Iss. 3, pp. 276-286.
15. Satheesh A., Manigandan T. Maintaining Power System Stability with Facts Controller using Bees Algorithm and NN. Journal of Theoretical and Applied Information Technology. 10th March 2013. Vol. 49, Iss. 1, pp. 38-47.
16. Boudour M., Hellal A. Mochaned Power System Dynamic Security Mapping Using Synchronizing and Damping Torques Technique. The Arabian Journal for Science and Engineering, Vol. 30, no. 1B.
17. Harikrishna D., Srikanth N.V. Dynamic Stability Enhancement of Power Systems Using Neural-Network Controlled Static-Compensator. TELKOMNIKA. Vol.10, No.1, March 2012, pp. 9-16.
18. Sujatha Er.S., Anitha Dr.R., Selvan Dr.P., Selvakumar Er.S. Transient Stability Enhancement of Tneb 400 kV Transmission Network with SVC. Journal of Theoretical and Applied Information Technology. 10th May 2014. Vol. 63, Iss. 1, pp. 85-91.
19. Welhazi Y., Guesmi T., Jaoued I. B., Abdallah H. H. Power System Stability Enhancement Using FACTS Controllers in Multimachine Power Systems. J. Electrical Systems, 2014, 10-3, pp. 276-291.
20. Анализ статической устойчивости генераторов / А.В. Малафеев, О.В. Газизова, А.В. Кочкина, Е.А. Гринчак // Главный энергетик. 2013. № 7. С. 17-25.
21. Исследование влияния ввода в работу перспективной воздушной линии на режимы промышленного энергетического узла / Ю.Н. Кондрашова, О.В. Газизова, М.М. Гладышева, И.М. Галлиулин // Международный научно-исследовательский журнал. 2014. № 4-2 (23). С. 35-37.
22. Анализ режимов несимметричных коротких замыканий в сложных системах электроснабжения с собственными электростанциями / А.В. Малафеев, О.В. Буланова, Е.А. Панова, М.В. Григорьева // Промышленная энергетика. 2010. № 3. С. 26-31.
23. 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.
24. Оценка эффективности релейной защиты в сетях 110-220 кВ сложных систем электроснабжения промышленных предприятий с собственными электростанциями / Игуменцев В.А., Заславец Б.И., Николаев Н.А., Малафеев

- ев А.В., Буланова О.В., Кондрашова Ю.Н., Панова Е.А. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2011. 141 с.
25. Малафеев А.В., Хламова А.В., Краснов М.И. Оптимизация загрузки генераторов собственных электростанций ОАО «ММК» с учетом потерь активной мощности в распределительной сети путем декомпозиции общей задачи // Главный энергетик. 2011. № 3. С. 54-57.
 26. Varganova A.V., Panova E.A., Kurilova N.A., Nasibullin A.T. Mathematical Modeling of Synchronous Generators in Out-of-balance Conditions in the Task of Electric Power Supply Systems Optimization. Collection of scientific papers: International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS). 2015.
 27. Kornilov G.P., Panova E.A., Varganova A.V. Algorithm of Economically Advantageous Overhead Wires Cross Section Selection Using Corrected Transmission Lines Mathematical Models. *Procedia Engineering*, 2015, Vol. 129, pp. 951-955.
 28. Анализ интенсивности отказов частотно-регулируемых электроприводов районных тепловых станций при нарушениях электроснабжения / В.Р. Храмшин, К.Э. Одинцов, А.Р. Губайдуллин, О.И. Карандаева, Ю.Н. Кондрашова // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2014. Т. 14. № 2. С. 68-79.
 29. Методика прогнозирования остаточного ресурса электрооборудования при эксплуатации / К.Э. Одинцов, Ю.Н. Ротанова, О.И. Карандаева, С.Е. Мостовой, П.В. Шилев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2010. № 3-1. С. 192-198.
 30. Разработка методики прогнозирования отказов сложных электротехнических систем на примере электрических систем / Ю.Н. Кондрашова, М.М. Гладышева, Арт.А. Николаев, А.А. Николаев // Технические науки: от теории к практике. Новосибирск: НП «СибАК», 2014. №33. С. 101-108.
 31. Karandaev A.S., Khramshin V.R., Evdokimov S.A., Kondrashova Yu.N., Karandaeva O.I. Methodology of calculation of the reliability indexes and life time of the electric and mechanical systems. Collection of scientific papers: Proceedings of 2014 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems, MEACS 2014. pp. 1-6.
 32. Энергоэффективные режимы регулируемых электроприводов переменного тока / В.Н. Поляков, Р.Т. Шрейнер; под ред. Р.Т. Шрейнера. Екатеринбург: ФГАОУ ВПО «Российский государственный профессионально-педагогический университет», 2012. 220 с.
 33. Emadi A. *Energy-efficient Electric Motors*, Third Edition, Revised and Expanded, (2005), New York, Marsel Dekker Inc., 400 p.
 34. Осипов О.И. Частотно-регулируемый асинхронный электропривод: учеб. пособие. М.: Изд-во МЭИ, 2004. 80 с.

Поступила в редакцию 15 июня 2016 г.

INFORMATION IN ENGLISH

ANALYSIS OF STATIC STABILITY AND ENERGY CONSUMPTION OF SYNCHRONOUS MOTORS WHEN THEY ARE CONNECTED TO FREQUENCY CONVERTERS WITH CHANGING TECHNOLOGICAL AND ELECTRICAL OPERATING PARAMETERS

Aleksandr A. Bunin

Electrician, Joint Service Company LLC, Magnitogorsk, Russia.

Ol'ga V. Gazizova

Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Electric Power Supply of Industrial Enterprises Department, Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Vladimir M. Tarasov

Ph.D. (Eng.), Electric Equipment Service Chief Foreman, Magnitogorsk Iron and Steel Works OJSC, Magnitogorsk, Russia.

Improvement of the technological process of steelmaking and higher requirements to reduce production costs in the competitive market conditions require the use of more economical and flexible systems of power supply for powerful motors. That is why large synchronous motors are not supplied directly from the network of the three-phase alternating current, but through frequency converters, which leads to a change in not only energy, but also to sustainability of electrical load as a whole. Such a transition, on the one hand, increases the energy efficiency of production at the expense of reducing electricity consumption. On the other hand, synchronous motors are no longer reactive power sources that can at the big electrical distance reduce resistance of motors operating in parallel with the grid. This article deals with analysis of static stability of synchronous motors in the load node containing large synchronous motors powered both through frequency converters, and directly from the power grid, as well as distributed generation sources of relatively small power using the developed software complex. Some recommendations are given aimed at improving of static stability of synchronous motors. The research group investigated variation of energy consumption of blowers as major consumers of electric

energy at the oxygen converter shop when inverters designed for start-up are replaced with fully adjustable frequency converter and simultaneous rebuilding of the technological scheme of their operation using power-supply system of the OJSC "Magnitogorsk Iron and Steel Works" as an example. On the basis of the experimental data, the authors carried out analyses of changes in parameters of the blowers when inverters designed for start-up were replaced with frequency converters for permanent operation. The selected cyclograms of the drive and pantograph operation were studied. The authors developed activities to increase the energy efficiency of new actuators in terms of frequency and time intervals of acceleration-braking. The obtained data can serve as a basis for further improving the energy efficiency of powerful synchronous motors with fan moment on the shaft resistance in different production cycles.

Keywords: Synchronous generator, synchronous motor, static stability, industrial enterprise, load software, power supply system, energy efficiency, energy consumption, supercharger, frequency converter.

REFERENCES

1. Nikiforov G.V., Oleynikov V.K., Zaslavets B.I., Shemetov A.N. *Upravlenie energopotrebleniyem i energosberezhenie: monografiya* [Energy Management and Energy Saving: a monograph]. Magnitogorsk, Publishing center of Novosibirsk Magnitogorsk State Technical University, 2013. 422 p.
2. Meshcheryakov V.N., Turkin M.A. Energy Saving at Rational Operation of Synchronous Motor with Frequency Regulation. *Sistemy upravleniya i informatsionnye tekhnologii* [Control systems and information technology], 2007, vol. 27, no. 1.1, pp. 180-183. (In Russian)
3. Lisitsyn A.S., Ernst A.V. Prospects of Control and Frequency Control of Synchronous Electric Motors. *Dinamika sistem, mekhanizmov i mashin* [Dynamics of systems, mechanisms and machines], 2014, no.1, pp.302-303. (In Russian)
4. Kothari D.P., Nagrath I.J. *Power System Engineering*. Second Edition. New Delhi, Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, 2008.
5. Kimbark E. *Sinkhronnye mashiny i ustoychivost elektricheskikh sistem* [Synchronous machines and stability of electrical systems]. Moscow-Leningrad, Gosenergoizdat Publ., 1960. 392 p.
6. Xiufeng S., Shiguang M. Research on Measures to Improve Stability of the Power System. *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 742, 2015, pp. 648-652.
7. Hazarika D. New method for monitoring voltage stability condition of a bus of an interconnected power system using measurements of the bus variables. *IET Generation, Transmission & Distribution*. Oct 2012, Vol. 6, Issue 10, pp. 977-985.
8. Malafeev A.V., Bulanova O.V., Rotanova Yu.N. Research of Dynamic Stability of Industrial Power Systems with Internal Power Stations at Separation from Electric System as a Result of Short-circuit Failure. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Komp'yuternye tekhnologii, upravlenie, radioelektronika* [Bulletin of the South Ural State University. Series "Computer Technologies, Automatic Control & Radioelectronics"], 2008, no. 17 (117), pp. 72-74. (In Russian)
9. Malafeev A.V., Karandaeva O.I., Rotanova Yu.N., Bulanova O.V. Influence of High-Voltage Motors of own Needs on Reliability of System of Electrical Power Supply of Own Needs of CHPP JSC MMK. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical systems and complexes], 2009, no. 17, pp. 96-104. (In Russian)
10. Bulanova O.V., Igumenshev V.A., Malafeev A.V., Rotanova Yu.N. Investigation of Convergence of Method of Calculation of Set Modes of Systems of Electrical Power Supply Operating Separately from Power Supply System. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical systems and complexes], 2005, no. 10, pp. 129-134. (In Russian)
11. Gazizova O.V., Malafeev A.V., Tarasov V.M., Izvolsky M.A. Research of Overall Performance of Dividing Automatic Equipment in System of Electrical Power Supply of Industrial Enterprise of Ferrous Metallurgy. *Promyshlennaya energetika* [Industrial power engineering], 2012, no. 10, pp. 12-17. (In Russian)
12. Igumenshev V.A., Malafeev A.V., Bulanova O.V., Rotanova Yu.N. Calculation of Response Characteristics of Synchronous and Asynchronous Motors of Industrial Enterprises for Purpose of Analysis of Stability of Systems of Electrical Power Supply. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Novosibirsk Magnitogorsk State Technical University], 2006, no. 2, pp. 71.-75. (In Russian)
13. Akagi H., Takahashi K., Kobayashi T., Sugihara H., Kai T. Analysis of an Adjustable Speed Rotary Condenser for Power System Stabilization. *Electrical Engineering in Japan*, Vol. 133, no. 1, 2000.
14. Xu Y., Dong Zh. Y., Zhao J., Xue Y., Hill D. J. Trajectory sensitivity analysis on the equivalent one-machine-infinite-bus of multi-machine systems for preventive transient stability control. *The Institution of Engineering and Technology IET Gener. Transm. Distrib.*, 2015, Vol. 9, Iss. 3, pp. 276-286.
15. Satheesh A., Manigandan T. Maintaining Power System Stability with Facts Controller using Bees Algorithm and NN. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*. 10th March 2013. Vol. 49, Iss. 1, pp. 38-47.
16. Boudour M., Hellal A. Mohamed Power System Dynamic Security Mapping Using Synchronizing and Damping Torques Technique. *The Arabian Journal for Science and Engineering*, Vol. 30, no. 1B.
17. Harikrishna D., Srikanth N.V. Dynamic Stability Enhancement of Power Systems Using Neural-Network Controlled Static-Compensator. *TELKOMNIKA*. Vol.10, No.1, March 2012, pp. 9-16.
18. Sujatha Er.S., Anitha Dr.R., Selvan Dr.P., Selvakumar Er.S. Transient Stability Enhancement of Tneb 400 kV Transmission Network with SVC. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*. 10th May 2014. Vol. 63, Iss. 1, pp. 85-91.
19. Welhazi Y., Guesmi T., Jaoued I. B., Abdallah H. H. Power System Stability Enhancement Using FACTS Controllers in Multimachine Power Systems. *J. Electrical Systems*, 2014, 10-3, pp. 276-291.
20. Malafeev A.V., Gazizova O.V., Kochkina A.V., Grinchak E.A. Analiz staticheskoy ustoychivosti generatorov [Analysis of Static Stability of Synchronous Generators. *Glavnyy energetik* [Chief Power Engineer], 2013, no. 7, pp. 17-25. (In Russian)
21. Kondrashova Yu.N., Gazizova O.V., Gladysheva M.M., Galliulin I.M. Research of Influence of Implementation of Perspective Overhead Line on Modes of Industrial Energetic Hub. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal* [International research journal], 2014, no. 4-2 (23), pp. 35-37. (In Russian)
22. Malafeev A.V., Bulanova O.V., Panova E.A., Grigoryeva M.V. Analysis of Modes of Asymmetrical Short Circuits in Complex Systems of Electrical Power Supply with Auxiliary Power Stations. *Promyshlennaya energetika* [Industrial Power Engineering], 2010, no. 3, pp. 26-31. (In Russian)
23. Bulanova O.V., Malafeev A.V., Nikolayev N.A., Rotanova Yu.N., Panova E.A. Determination of Asynchronous Power of Synchronous Generators in Calculations of Electromechanical Transient Processes in case of Asymmetrical Modes. *Elektrika* [Electrician], 2010, no. 8, pp. 24-26. (In Russian)
24. Igumenshev V.A., Zaslavets B.I., N.A. Nikolayev, A.V. Malafeev, O.V. Bulanova, Yu.N. Kondrashova, E.A. Panova *Otsenka effektivnosti releyonoy zashchity v setyakh 110-220 kV slozhnykh sistem elektrosnabzheniya promyshlennykh predpriyatiy s sobstvennymi elektrostantsiyami* [Evaluating the Effectiveness of Relaying Networks in Complex Systems of 110-220 kV Power Supply of Industrial Enterprises with Auxiliary Power Plants], Magnitogorsk, Novosibirsk Magnitogorsk State Technical University Publ. House, 2011, p. 141.
25. Malafeev A.V., Khlamova A.V., Krasnov M.I. Optimization of Loading of Generators of Auxiliary Power Stations of JSC MMK Taking into Account Losses of Active Power on Distributive Network by Decomposition of General Task. *Glavnyy energetik* [Chief Power Engineer], 2011, no. 3, pp. 54-57. (In Russian)
26. Varganova A.V., Panova E.A., Kurilova N.A., Nasibullin A.T. Mathematical Modeling of Synchronous Generators in Out-of-balance Conditions in the Task of Electric Power Supply Systems Optimization. *Collection of scientific papers: International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS)*. 2015.

27. Kornilov G.P., Panova E.A., Varganova A.V. Algorithm of Economically Advantageous Overhead Wires Cross Section Selection Using Corrected Transmission Lines Mathematical Models. *Procedia Engineering*, 2015, Vol. 129, pp. 951-955.
 28. Khramshin V.R., Odintsov K.E., Gubajdullin A.R., Karandaeva O.I., Kondrashova Yu.N. Fault Rate Analysis of Variable-FREQUENCY Electric Drives in District Heating Stations under Power Supply Violations. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika* [Bulletin of the South Ural State University. Series "Power Engineering"], 2014, Vol. 14, no. 2, – pp. 68-79. (In Russian)
 29. Odintsov K., Rotanova Yu., Karandayeva O., Mostovoy S., Shilyaev P. Technique to Predict Electrical Equipment Operational Remaining Life. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [News of the Tula state university. Technical science], 2010, no. 3-1, pp. 192-198. (In Russian)
 30. Kondrashova Yu.N., Gladysheva M.M., Nikolaev Art.A., Nikolaev A.A. Development of Technique of Failure Prediction of Complex Electrotechnical Systems Using Electrical Networks as an Example. *Tekhnicheskie nauki: ot teorii k praktike* [Technical science: from the theory to practice], 2014, no. 33, pp. 101-108. (In Russian)
 31. Karandaev A.S., Khramshin V.R., Evdokimov S.A., Kondrashova Yu.N., Karandaeva O.I. Methodology of calculation of the reliability indexes and life time of the electric and mechanical systems. Collection of scientific papers: Proceedings of 2014 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems, MEACS 2014. pp. 1-6.
 32. Polyakov V.N. *Energoeffektivnye rezhimy reguliruemyykh elektroprivodov peremennogo toka* [Energy saving operating modes of controlled AC electric drives]. Under the editorship of R.T. Shreiner. Yekaterinburg, FSAEI HPE Russian State Vocational Pedagogical University, 2012. 220 p.
 33. Emadi A. *Energy-efficient Electric Motors*, Third Edition, Revised and Expanded, (2005), New York, Marsel Dekker Inc., 400 p.
 34. Osipov O.I. *Chastotno-reguliruemyy asinkhronnyy elektroprivod* [Variable-frequency induction motor drive]. Moiscow, MPEI Publ., 2004.80 p.
-
- Бунин А.А., Газизова О.В., Тарасов В.М. Анализ статической устойчивости и энергопотребления синхронных двигателей при их подключении к преобразователям частоты с изменением технологических и электрических параметров режима работы // *Электротехнические системы и комплексы*. 2016. №4(33). С.49-60. doi: 10.18503/2311-8318-2016-4(33)-49-60
-
- Bunin A.A., Gazizova O.V., Tarasov V.M. Analysis of static stability and energy consumption of synchronous motors when they are connected to frequency converters with changing technological and electrical operating parameters. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2016, no.4(33), pp. 49-60. (In Russian). doi: 10.18503/2311-8318-2016-4(33)-49-60
-

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА «ДУГОВАЯ СТАЛЕПЛАВИЛЬНАЯ ПЕЧЬ – СТАТИЧЕСКИЙ ТИРИСТОРНЫЙ КОМПЕНСАТОР»

В статье приведено подробное описание математической модели электротехнического комплекса «дуговая сталеплавильная печь – статический тиристорный компенсатор» на примере ДСП-120 и СТК-100. Модель реализована в приложении *Simulink* математического пакета *Matlab*. Разработанная модель позволяет проводить комплексные исследования электрических режимов ДСП, режимов работы системы автоматического управления перемещением электродов, а также алгоритмов управления реактивной мощностью статического тиристорного компенсатора. С целью наглядной демонстрации работы модели в рамках данного исследования получены графики: электрических характеристик ДСП-120; изменения тока электрической дуги; электрических и технологических характеристики ДСП-120 с фактическим распределением рабочих точек; суммарной мощности дуг во время перехода с одной стадии плавки на другую; реактивной мощности комплекса ДСП-120-СТК и напряжения на шинах ЗРУ-35 кВ при различных режимах регулирования ТРГ.

Ключевые слова: математическая модель, дуговая сталеплавильная печь, статический тиристорный компенсатор, система управления перемещением электродов, компенсация реактивной мощности, случайные колебания токов дуг.

ВВЕДЕНИЕ

За последние десятилетия в металлургической отрасли промышленности стран СНГ и зарубежья наблюдается активное замещение конвертерного и мартеновского производства электросталеплавильным. Данный факт обусловлен высокой экономической и энергетической эффективностью дуговых сталеплавильных печей (ДСП) и установок ковш-печь (УКП). Как показывает практический опыт, зачастую эксплуатация подобных установок осуществляется недостаточно рационально вследствие сложности физических процессов, лежащих в основе функционирования электросталеплавильного комплекса.

Исследование особенностей функционирования электросталеплавильного комплекса представляет собой трудоёмкую задачу. Режим работы ДСП достаточно сложно описать точными математическими зависимостями. Характер изменения нагрузки ДСП носит сложно предсказуемый характер, который зависит от технологических особенностей выплавки стали (качество металлолома, шихтовка плавки, работа системы управления положением электродов), а также электрических характеристик питающей сети и работы компенсатора реактивной мощности в системе электроснабжения электросталеплавильного комплекса [1]. Для дуговых печей высокой мощности с целью обеспечения электромагнитной совместимости и поддержания напряжения на первичной стороне печного трансформатора устанавливаются статические тиристорные компенсаторы (СТК). Они являются устройствами косвенной компенсации, состоящими из управляемой индуктивности – тиристорно-реакторной группы (ТРГ) и нерегулируемого источника реактивной мощности – фильтрокомпенсирующих цепей (ФКЦ), включающих в себя фильтры 2-й, 3-й и 4-й гармоник [2, 3].

Авторами статьи разработана математическая модель комплекса «ДСП-120 и СТК-100 МВАр». Данная

модель включает все основные элементы системы электроснабжения дуговой печи и её электрического контура и позволяет исследовать работу комплекса с учётом многих факторов, например параметров питающей сети, режимов работы ДСП и СТК и др.

ОПИСАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА «ДСП-120 – СТК»

Модель электротехнического комплекса «ДСП-120 – СТК» состоит из пяти основных элементов (**рис. 1**): питающая сеть 220/35 кВ и силовая часть статического тиристорного компенсатора 100 МВАр; система автоматического управления тиристорно-реакторной группой *MACH2*; электрический контур дуговой сталеплавильной печи ДСП-120; система управления перемещением электродов *HIREG Plus*; блок формирования случайных возмущений дуг.

На **рис. 1**: u_A, u_B, u_C – фазные напряжения в сети 220 кВ, В; $u_{AB}^{шин}, u_{BC}^{шин}, u_{CA}^{шин}$ – линейные напряжения на шинах закрытого распределительного устройства (ЗРУ) 35 кВ, В; $u_{шинA}, u_{шинB}, u_{шинC}$ – фазные напряжения на шинах ЗРУ-35 кВ, В; $u_{AB}^{пex}, u_{BC}^{пex}$ – линейные напряжения на первичной стороне печного трансформатора, В; $i_A^{ДСП}, i_C^{ДСП}$ – токи на первичной стороне печного трансформатора, А; $i_{сумA}, i_{сумB}, i_{сумC}$ – суммарные токи электросталеплавильного комплекса, потребляемые из питающей сети, А; $i_{нагрA}, i_{нагрB}, i_{нагрC}$ – суммарные токи ДСП и ФКЦ, А; $Q_{уст}$ – уставка регулирования ТРГ по реактивной мощности, ВАр; $U_{уст}$ – уставка регулирования ТРГ по напряжению, В; $B_{ТРГmax}$ – ограничение по максимальной проводимости ТРГ, См; $I_{AB}^1, I_{BC}^1, I_{CA}^1$ и $I_{AB}^2, I_{BC}^2, I_{CA}^2$ – отпирающие импульсы, подающиеся соответственно на прямую и обратную группы тиристорных; $u_{дA}, u_{дB}, u_{дC}$ – напряжения электрических дуг, В; $i_{дA}, i_{дB}, i_{дC}$ – токи электрических дуг, А; R'_Σ – суммарные активные сопротивления электрического контура ДСП, Ом; L'_Σ – суммарные индуктивности электрического контура ДСП, Гн; K_T – коэффициент трансформации печного трансформатора; θ_d – тепловая постоянная

времени дуги, мс; g_{d0} - начальное значение проводимости дуги в момент подачи напряжения, См; α - падение напряжения в приэлектродных областях, В; β - градиент напряжения дуги, В/мм; K_I - коэффициент, учитывающий изменение коэффициента трансформации печного трансформатора на различных ступенях РПН; K_{Iph} - коэффициент балансировки фаз, который обеспечивает ослабление (или усиление) обратной связи по току с целью изменения соотношения технологических параметров печи в одной фазе по отношению к двум другим; K_T - коэффициент трансформации печного трансформатора при 12 ступени РПН; K_U - коэффициент, определяемый текущей ступенью трансформатора, уставкой адмитанса, номером рабочей кривой, а также системой динамической компенсации колебаний напряжения питающей сети *HI REG DEC*; N_{TR} - номер ступени РПН печного трансформатора; N_{OC} - номер рабочей кривой САУ перемещением электродов; T_ϕ - постоянная времени фильтра, с; $T_{ГЦ}$ - постоянная времени гидроцилиндра, учитывающая инерционность его действия, с; K_a - коэффициент, позволяющий варьировать быстродействие контура в зависимости от ступени печного трансформатора; $Bias$ - постоянный сигнал смещения; $U_{max up}$, $U_{max low}$ - верхнее и нижнее ограничения сигнала ошибки, рассчитываемой по формуле (1), мВ; $L_{дA}$, $L_{дB}$, $L_{дC}$ - длины электрических дуг; $S(I_{дA})$, $S(I_{дB})$, $S(I_{дC})$ - стандартные отклонения токов электрических дуг, А; $\Delta L_{дA}$, $\Delta L_{дB}$, $\Delta L_{дC}$ - изменения длин дуг, мм.

Имитационная часть модели (рис. 2) реализована с помощью готовых блоков из библиотек, встроенных в

приложение *Simulink*, и содержит: электрическую сеть, по которой получает питание сталеплавильный комплекс, включающую понижительный трансформатор 220/35 кВ, воздушные и кабельные линии электропередачи; тиристорно-реакторную группу и фильтры высших гармоник.

Тиристорно-реакторная группа на исследуемом объекте работает под управлением САУ *MACH2* фирмы *ABB*. В системе предусмотрен расчет ортогональных составляющих токов и напряжений прямой и обратной последовательности на основании мгновенных значений, регистрируемых в различных точках комплекса. В рассматриваемой модели САУ ТРГ реализованы прямой канал управления и два канала управления с обратными связями (рис. 3). В прямом канале осуществляется симметрирование нагрузки (исключение токов обратной последовательности) путём изменения проводимости фаз ТРГ. Каналы управления с обратными связями формируют корректирующие сигналы на задания реактивных проводимостей фаз ТРГ с целью реализации заданного режима регулирования: поддержание заданной реактивной мощности или заданного напряжения на первичной стороне печного трансформатора. Суммарные величины проводимостей фаз ТРГ через блоки ограничения (с уставкой $B_{ТРГ max}$) подаются на блоки нелинейности, в которых реализована обратная регулировочная характеристика ТРГ $\alpha=f(B)$. Сигналы задания на углы отпирания тиристоры отправляются в систему импульсно-фазового управления (СИФУ) [4].

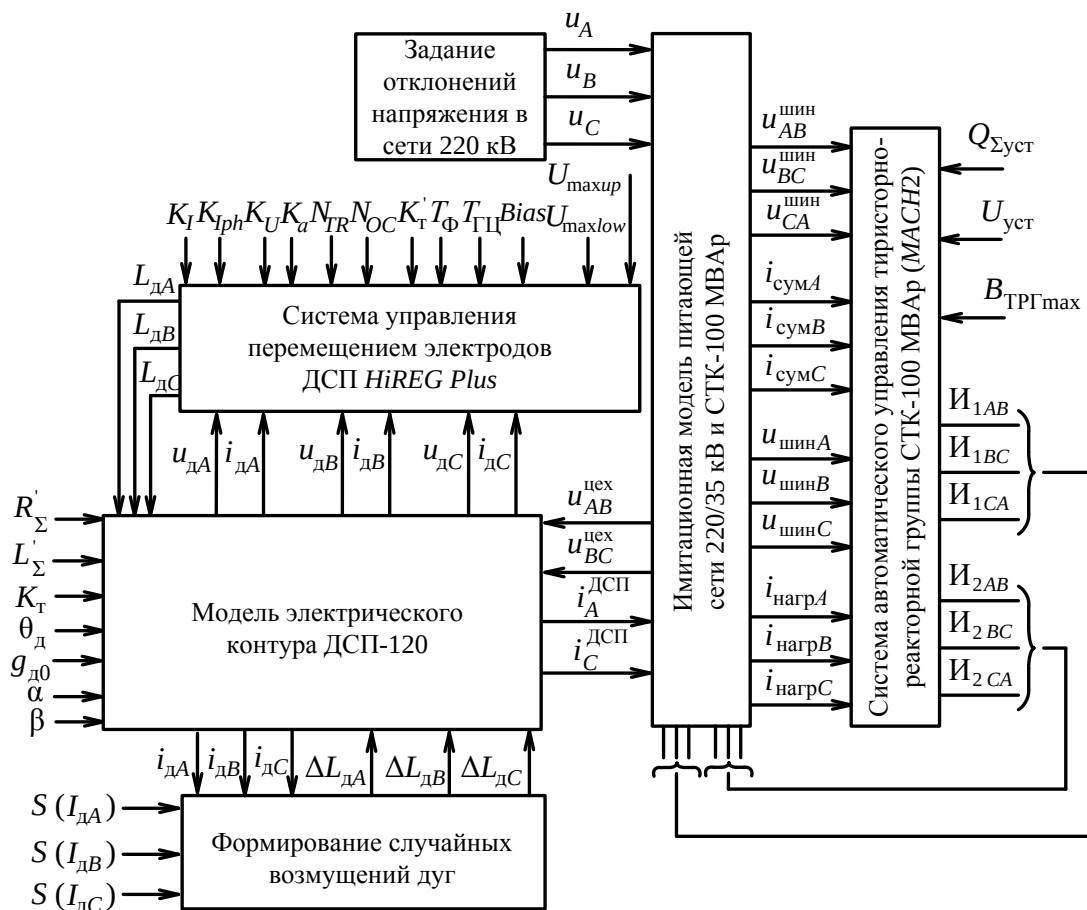


Рис. 1. Блок-схема математической модели электротехнического комплекса «ДСП-120 – СТК»

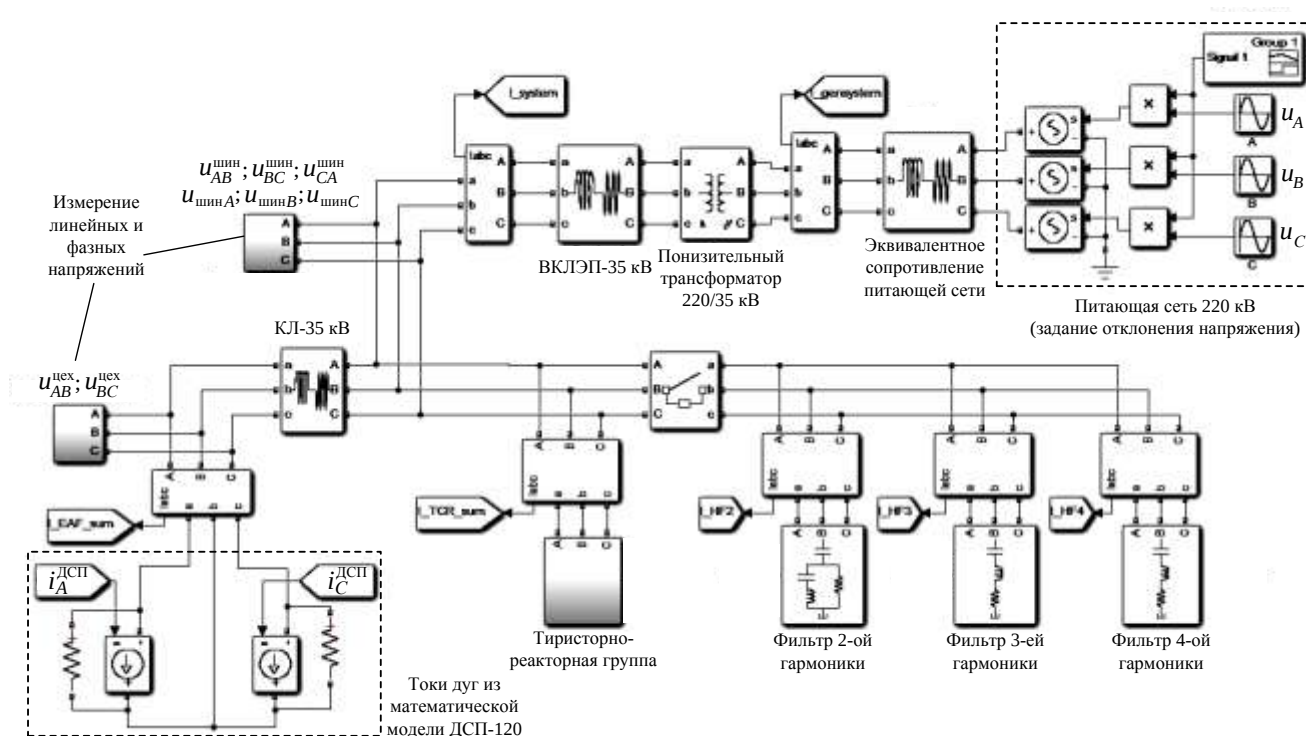


Рис. 2. Имитационная модель питающей сети 220/35 кВ и силовой части СТК-100

На выходе СИФУ формируются импульсы, которые поступают на входы управления тиристорных ключей ТРГ. Для корректной работы преобразователя координат и СИФУ предусмотрена модель фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ). ФАПЧ используется для формирования синхронизированных сигналов линейных напряжений в условиях постоянно меняющихся частоты и фазы [5].

Подробное описание математической модели электрического контура дуговой сталеплавильной печи (рис. 4) приведено в работе [6]. Здесь отметим, что данная математическая модель построена на основании дифференциального уравнения мгновенной проводимости электрической дуги (уравнение Касси), а также на уравнениях, записанных в соответствии с первым и вторым законом Кирхгофа.

Для управления положением электродов на ДСП-120 применяется система *HIREG Plus* (Danieli, Италия). Её математическая модель представлена на рис. 5.

Алгоритм управления данной системы подразумевает косвенное регулирование адмитанса электрического контура за счёт поддержания на нулевом уровне ошибки регулирования, вычисляемой по следующей формуле:

$$\text{Error} = K_I \cdot K_{Iph}^{-1} \cdot I_1 - K_U \cdot U_{2\phi}, \quad (1)$$

где I_1 – ток, измеренный на стороне высокого напряжения печного трансформатора, пропорциональный току дуги (при условии соединения обмоток по схеме $\Delta/\Delta-0$); $U_{2\phi}$ – фазное напряжение, измеренное между выводами вторичной обмотки трансформатора и подиной печи.

Сигнал ошибки *Error* после фильтрации поступает на вход нелинейного блока БН1. Данный блок в системе *HIREG* предназначен для обеспечения заданного быстродействия системы регулирования адмитанса для различных диапазонов ошибки регулирования, что

позволяет максимально точно обрабатывать малые перемещения, а также максимально быстро устранять режимы коротких замыканий [7]. Сформированный в результате работы всех вышеприведённых функциональных блоков сигнал необходимо ограничить. Это позволит привести величину сигнала ошибки в соответствие диапазону управляющего сигнала сервоклапана (от -10000 до 10000 мВ) [8, 9].

Поскольку характеристика сервоклапана является нелинейной и несимметричной относительно начала координат, в системе *HIREG* производится процедура линеаризации данной характеристики с помощью блока БН2 (см. рис. 5). Под линеаризацией понимается обеспечение линейности и симметрии в диапазоне $\pm 30\%$ от максимальной величины сигнала задания. Данный диапазон определяет границы эффективной зоны характеристики сервоклапана [10].

Для исследования особенностей работы электросталеплавильного комплекса с учётом таких факторов, как изменение напряжения в сети и характер горения дуг ДСП, в данной модели предусмотрены блоки задания отклонений напряжения в питающей сети 220 кВ и формирования случайных возмущений токов дуг.

Перед реализацией модели формирования случайных возмущений дуг (рис. 6) выполнен статистический анализ графиков изменения действующих значений токов дуг. На основании 100-секундных интервалов со стационарным (эргодическим) характером изменения тока получены автокорреляционные функции и функции спектральной плотности, которые содержат в себе информацию о частотном спектре случайных колебаний токов. Используя специализированные формирующие фильтры совместно с генератором белого шума, разработаны блоки формирования случайных возмущений. Сигналы на выходе формирующих фильтров $\Delta I_{дА}$, $\Delta I_{дВ}$, $\Delta I_{дС}$ соответствуют случайной составляющей колебаний токов дуг.

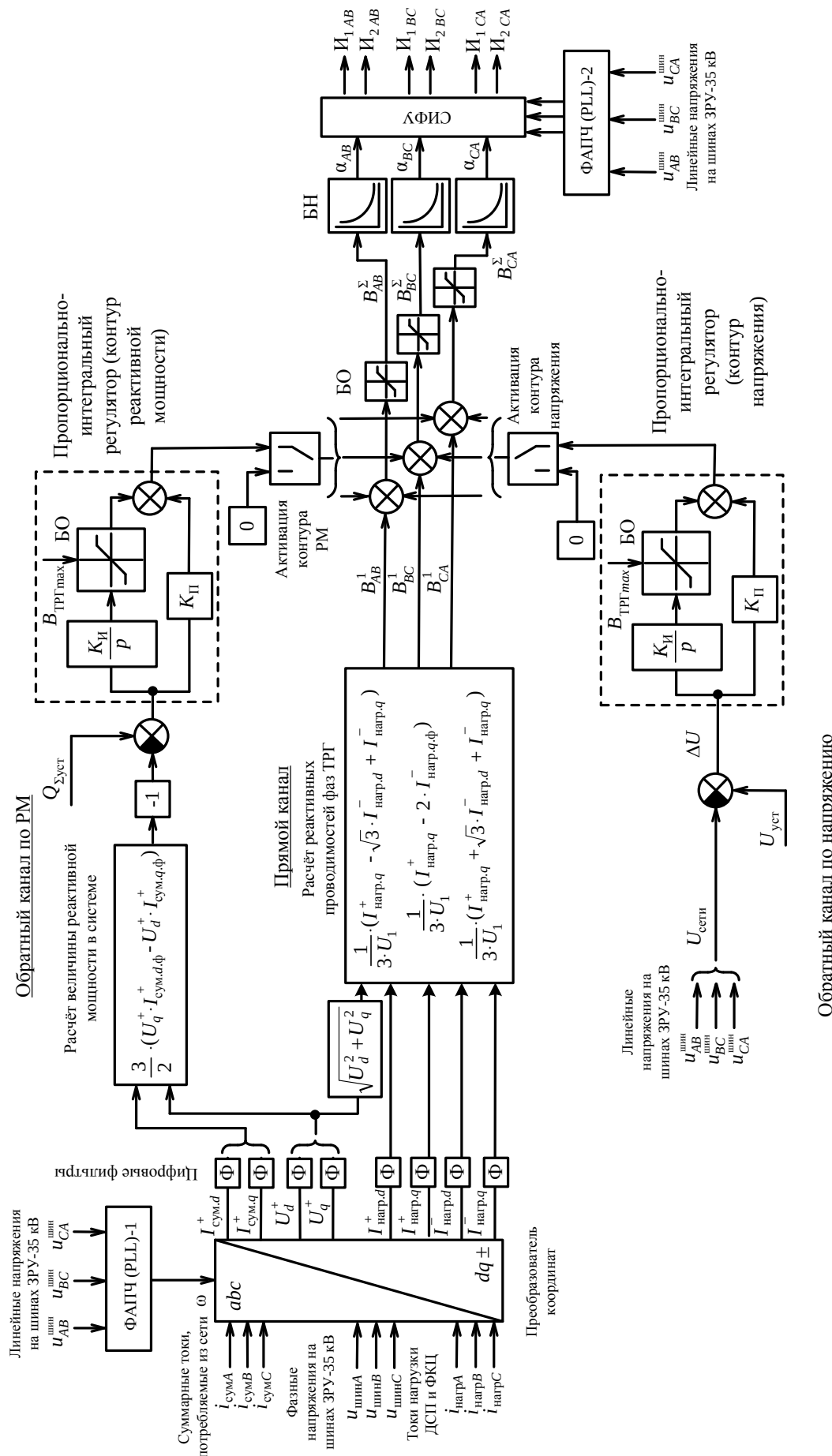


Рис. 3. Функциональная схема системы автоматического управления тиристорно-реакторной группы (\$B_{AB}^1, B_{BC}^1, B_{CA}^1\$ – проводимости фаз ТРГ прямого канала; См; БО – блоки ограничения; БН – блоки нелинейности)

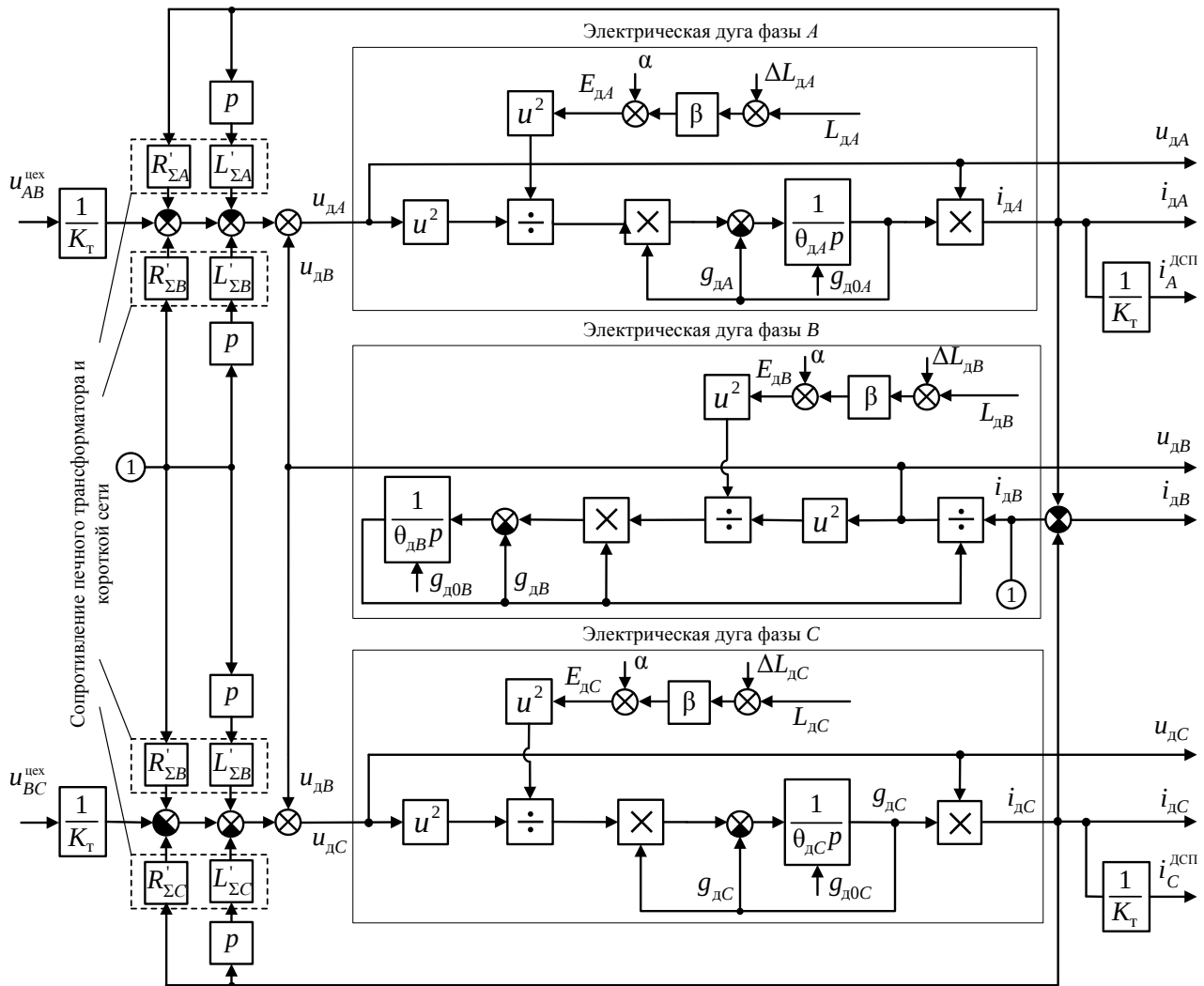


Рис. 4. Структурная схема электрического контура ДСП-120
($g_{дА}$, $g_{дВ}$, $g_{дС}$ – мгновенные проводимости дуг, См; $E_{дА}$, $E_{дВ}$, $E_{дС}$ – противо ЭДС дуг, В)

Для полной реализации случайных возмущений необходимо получить сигналы изменений длин дуг $\Delta L_{дА}$, $\Delta L_{дВ}$, $\Delta L_{дС}$. Для этого на математической модели получена характеристика $K_d = f(I_d)$ (блоки БН) путём дифференцирования зависимости $L_d = f(I_d)$. В данном случае K_d – коэффициент пропорциональности между возмущающим воздействием по длине дуги ΔL_d и возмущающим воздействием по току дуги ΔI_d при заданном I_d [11].

ПРИМЕНЕНИЕ РАЗРАБОТАННОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

В РАЗЛИЧНЫХ ТИПАХ ИССЛЕДОВАНИЙ РЕЖИМОВ РАБОТЫ
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА «ДСП – СТК»

Как уже было сказано выше, разработанная модель электросталеплавильного комплекса позволяет решать широкий спектр задач. В качестве примера на рис. 7 приведены электрические и технологические характеристики ДСП-120 (85 МВА), такие как: зависимости мощности дуг $P_d = f(I_d)$, коэффициентов износа футеровки $KIF = f(I_d)$ и интенсивности нагрева $KIH = f(I_d)$ для фактического и номинального значения напряжения питающей сети, которое, в свою очередь, напрямую зависит от режима работы СТК. На расчетные характеристики нанесены фактические распределения рабочих точек, полученные из архивных файлов сис-

темы *HIREG Plus*. Данные характеристики построены для двух технологических режимов работы печи: 1) стадия расплавления шихты при холодном старте (рис. 7, а); 2) стадия расплавления при непрерывной подаче шихты при помощи конвейера с использованием технологии *Consteel* (рис. 7, б). В последнем режиме электрические дуги всегда горят в условиях наличия жидкой ванны.

Использование математической модели в данном случае позволяет проводить оценку оптимальности положения средней рабочей точки на электрических и технологических характеристиках ДСП. В первом случае электрический режим дуговой печи является неоптимальным из-за низких значений КИФ и $\cos \phi$ (рис. 7, а). Также в данном случае из-за высоких значений отклонений P_d и I_d требуется коррекция параметров нелинейного регулятора системы управления перемещением электродов ДСП. Во втором случае электрические и технологические показатели ДСП находятся в норме, электрический режим является оптимальным.

Кроме построения статических характеристик, с помощью разработанной модели можно анализировать работу системы управления перемещением электродов в динамических режимах. На рис. 8 представлены графики изменения суммарной мощности электрических

дуг при переходе с одной ступени печного трансформатора на другую при соответствующем изменении значения уставки на адмитанс фазы $Y_{\text{зад}}$. При проведении данных исследований возможно оценивать эффективность настройки коэффициентов нелинейного регулятора и при необходимости осуществлять выбор наиболее оптимальной формы нелинейной характеристики, обеспечивающей достижение минимальных значений стандартных отклонений токов и мощностей дуг.

Другим видом исследований является анализ характера изменения напряжения на шинах ЗРУ-35 кВ и суммарного потребления реактивной мощности комплексом «ДСП-СТК» при различных режимах работы статического тиристорного компенсатора и различном отклонении напряжения во внешней питающей сети. На рис. 9 изображены графики изменения напряжения на шинах ЗРУ-35 кВ и величины суммарной реактивной мощности комплекса ДСП-120-СТК при двух режимах работы ТРГ.

При проведении исследований анализировались два возможных режима работы системы управления ТРГ СТК: 1) режим поддержания нулевой реактивной мощности комплекса «ДСП-СТК» (рис. 9, а); 2) режим

поддержания номинального напряжения на секции 35 кВ, от которой получают питание объекты электросталеплавильного комплекса (рис. 9, б). В первом случае из-за непостоянства напряжения во внешней сети 220 кВ имеют место отклонения напряжения в точке подключения комплекса, во втором случае возникает обратная картина: напряжение сети поддерживается на номинальном уровне за счет изменяющегося характера реактивной мощности комплекса «ДСП-СТК». Применение математической модели позволяет определить наиболее оптимальный режим в зависимости от величины отклонения напряжения во внешней питающей сети. При достаточно стабильном напряжении в сети 220 кВ режим поддержания нулевой реактивной мощности является наиболее предпочтительным, поскольку в этом случае достигаются наилучшие энергетические показатели комплекса. В условиях сильных отклонений напряжения во внешней сети в периоды максимальных суточных нагрузок необходимо использовать режим поддержания напряжения для исключения снижения напряжения на секции 35 кВ, сопровождающегося потерей производительности ДСП.

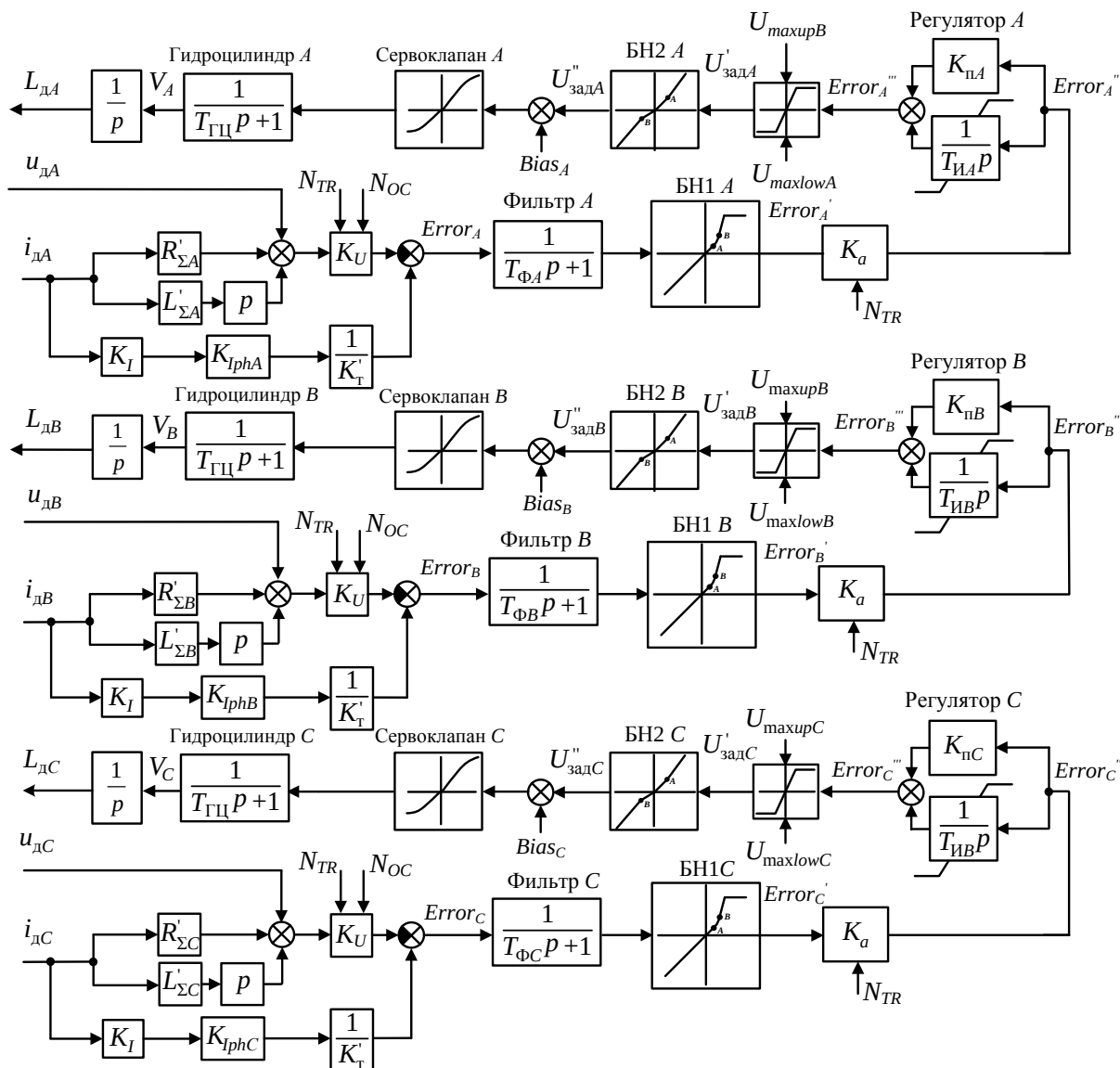


Рис. 5. Математическая модель системы автоматического управления перемещением электродов (V_A, V_B, V_C – скорости перемещения электродов)

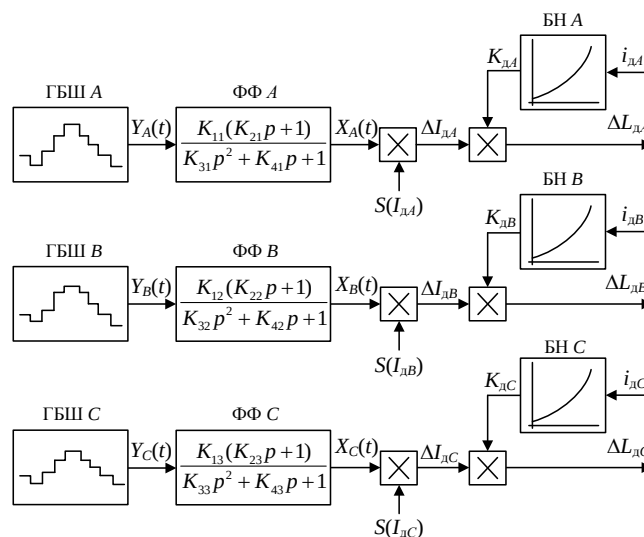


Рис. 6. Модель формирования случайных возмущений дуг ДСП-120
(ГБШ – генераторы белого шума; ФФ – формирующие фильтры; БН – блоки нелинейности;
 ΔI_{dA} , ΔI_{dB} , ΔI_{dC} – колебания токов дуг, А)

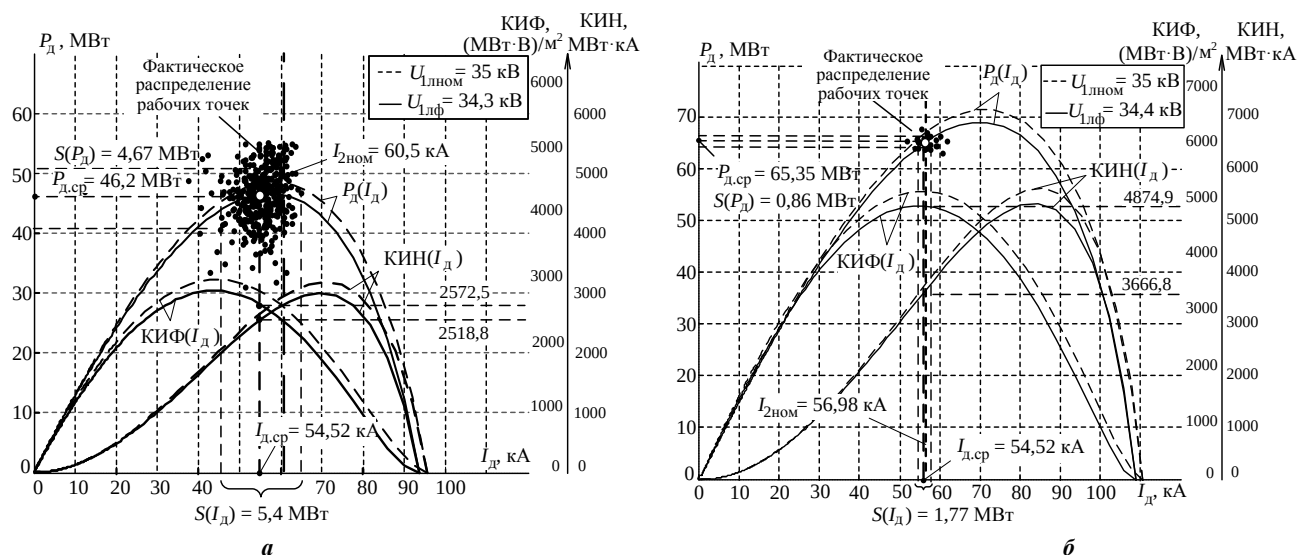


Рис. 7. Электрические и технологические характеристики ДСП-120 с фактическим распределением рабочих точек: а – холодный старт печи на стадии расплавления шихты; б – конечная стадия плавки при непрерывной подаче шихты с помощью конвейера (технология Consteel)

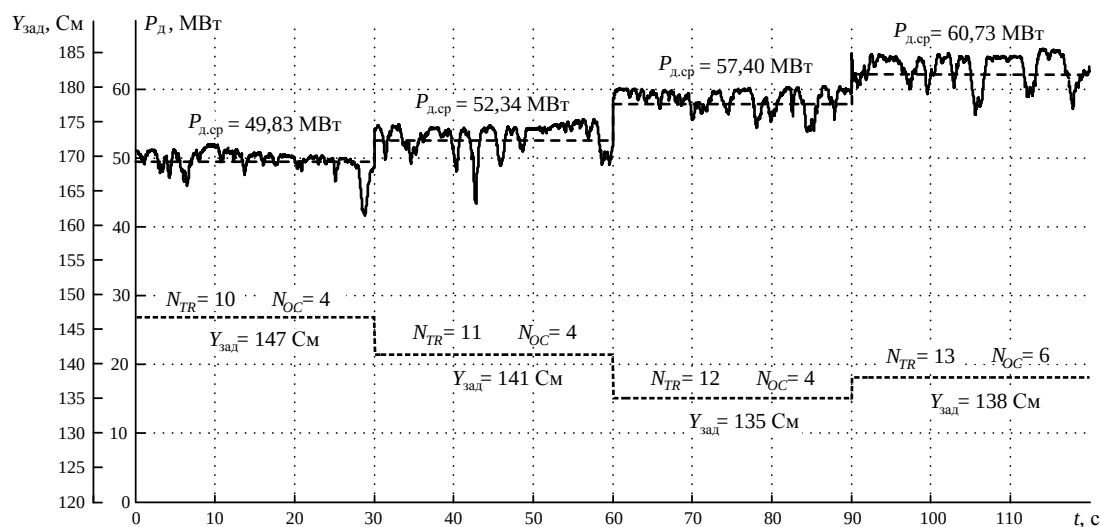


Рис. 8. График суммарной мощности дуг, полученный на модели для времени перехода с одной стадии плавки на другую ($Y_{зад}$ – уставка по адмитансу; N_{TR} – номер ступени печного трансформатора; N_{OC} – номер рабочей кривой)

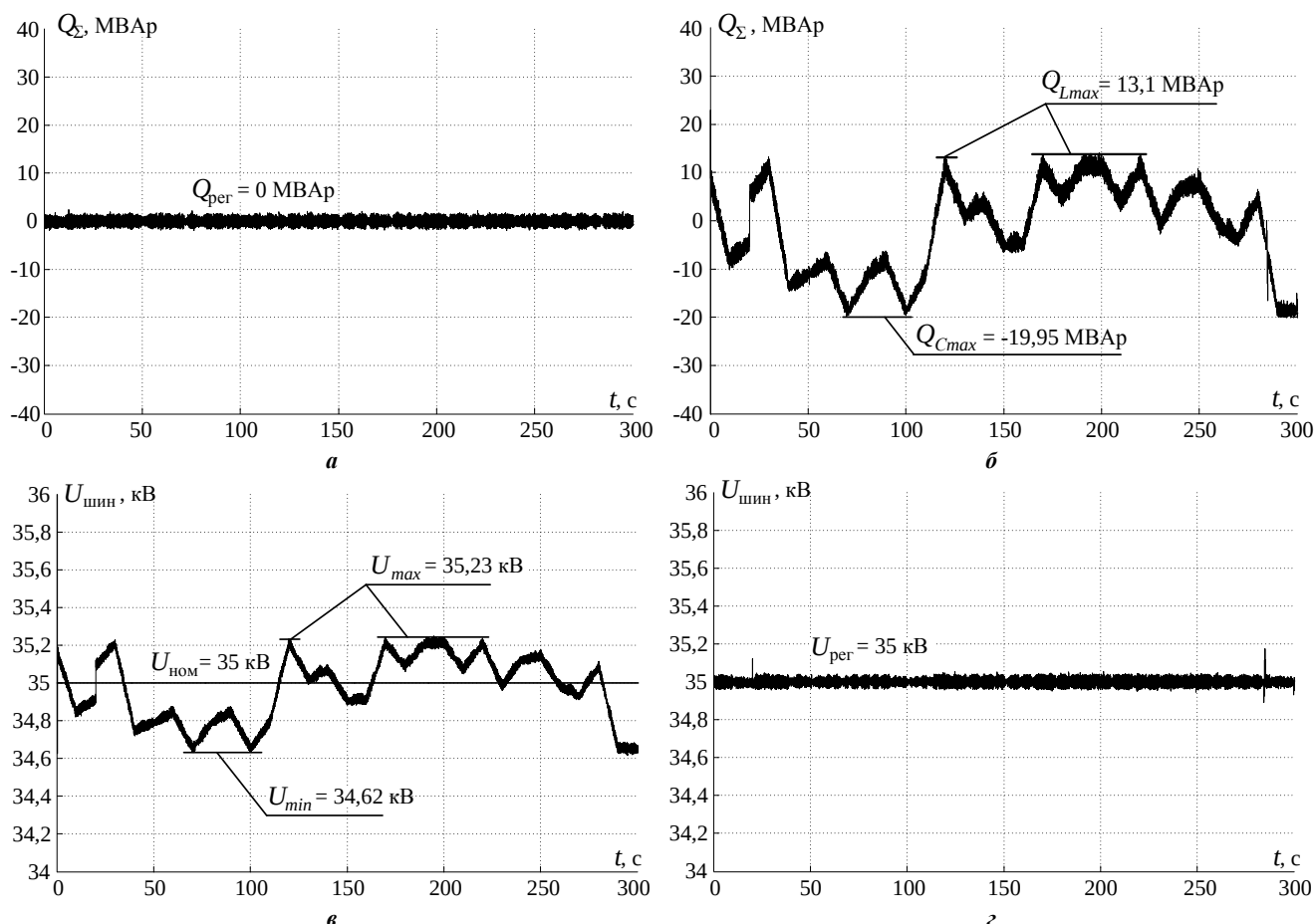


Рис. 9. Графики реактивной мощности комплекса ДСП-120-СТК и напряжения на шинах ЗРУ-35 кВ при режимах регулирования ТРГ: а-б – по реактивной мощности; в-г – по напряжению

Помимо вышесказанного, по мгновенным значениям линейных напряжений, записанным в какой-либо анализируемой точке модели, возможно проведение исследования соответствия качества электроэнергии нормативным значениям для различных стадий плавки ДСП, режимов работы СТК и параметров питающей сети [12-16]. На рис. 10 приведены графики изменения основных электрических параметров комплекса «ДСП-СТК» при различных режимах работы компенсатора реактивной мощности, рассчитанные на математической модели. Как видно рис. 10, снижение напряжения на шинах 35 кВ при отключенном СТК составляет 7,5 %, поэтому активная мощность, вводимая в печь, снижается примерно на 21 % (с 60 до 47,4 МВт) при отключенном СТК, что негативным образом сказывается на производительности ДСП. Коэффициент загрузки трансформатора, равный отношению фактической полной мощности к номинальной ($K_3 = S_{\text{ДСП}}/S_{\text{НОМ}}$), уменьшается на 27 %, с 1 до 0,73. Наряду с ухудшением энергетических показателей ДСП отключение СТК отрицательно сказывается на основных показателях качества напряжения в точке присоединения комплекса – увеличивается на 2,2 % содержание высших гармоник в питающем напряжении и растет коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности K_{2U} (+0,5 %).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана математическая модель электротехнического комплекса «ДСП-СТК», включающая в себя все наиболее важные структурные компоненты, такие как питающая сеть 220/35 кВ с силовой частью статического тиристорного компенсатора 100 МВАр, система автоматического управления ТРГ, электрический контур ДСП, а также система управления перемещением электродов *HIREG Plus* с реализацией блока формирования случайных возмущений дуг.

2. Основным преимуществом разработанной модели является возможность решения широкого спектра как исследовательских, так и прикладных задач, связанных с оптимизацией электрических режимов работы ДСП, выявлением энергетических резервов, оценкой качества регулирования системы управления перемещением электродов, а также анализом работы комплекса при различных режимах работы статического тиристорного компенсатора.

3. Разработанная модель является универсальной и позволяет осуществлять комплексный анализ работы объекта при различных: технологических режимах работы печи (холодный старт и режим работы при непрерывной подаче шихты с помощью конвейера); ступенях печного трансформатора, реактора и рабочих кривых; режимах регулирования ТРГ. Благодаря этому появляется возможность оценки параметров, характерных как для конкретных стадий, так и для всей плавки в целом.

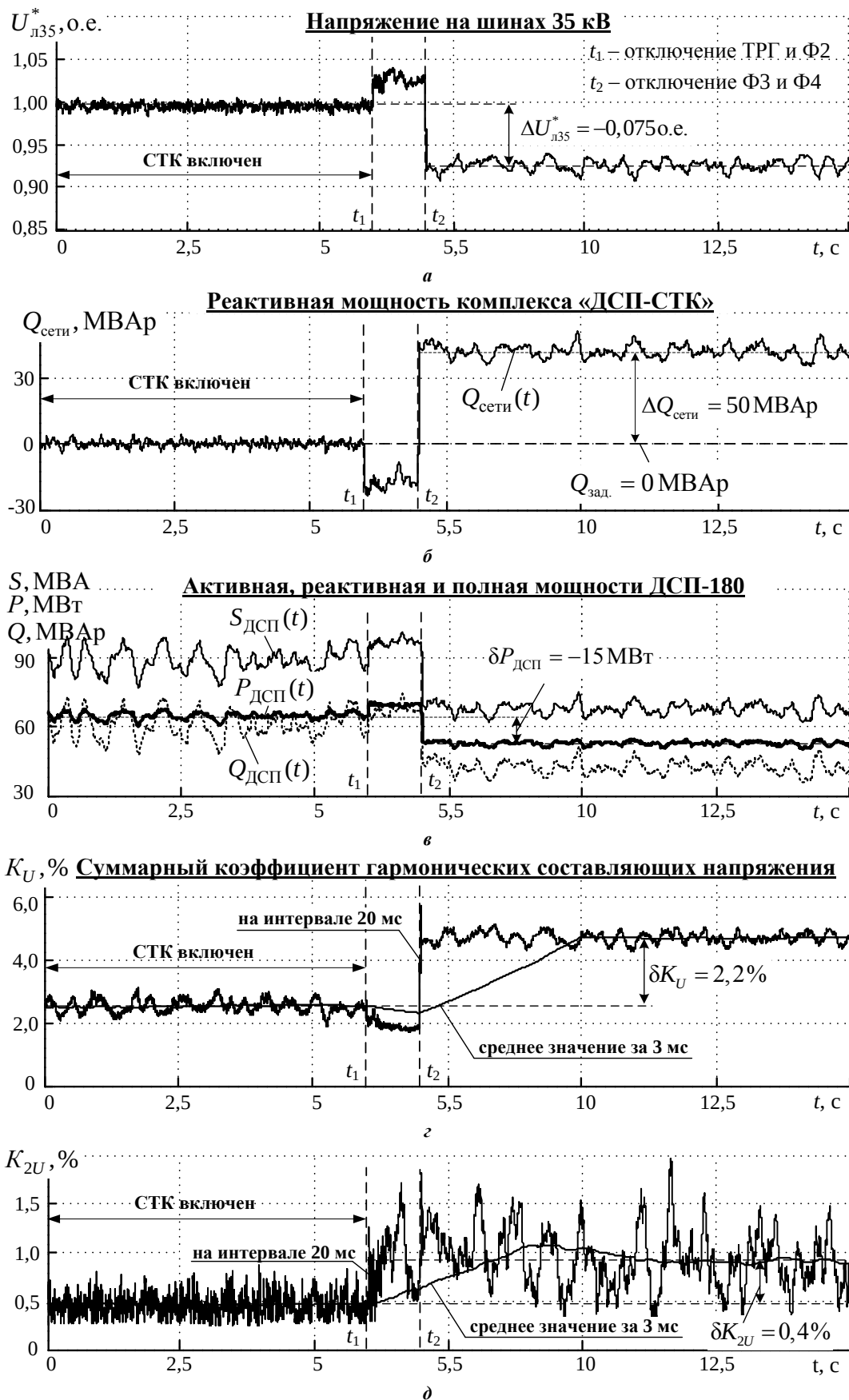


Рис. 10. Графики изменения параметров комплекса «ДСП-СТК» при различных режимах СТК, полученные на разработанной математической модели

($U_{л35}^*$ – действующее значение линейного напряжения на секции 35 кВ в относительных единицах;
 $Q_{\text{сети}}$ – реактивная мощность комплекса «ДСП-СТК»; S, P, Q – полная, активная и реактивная мощности комплекса «ДСП-СТК»; K_U – суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения;
 K_{2U} – коэффициент несимметрии напряжения по обратной последовательности)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Электротехнологические промышленные установки: учебник для вузов / И.П. Евтюкова, Л.С. Кацевич, Н.М. Некрасова, А.Д. Свенчанский. М.: Энергоиздат, 1982. 400 с.
2. Кочкин В.И., Нечаев О.П. Применение статических компенсаторов реактивной мощности в электрических сетях энергосистем и предприятий. М.: Изд-во «НЦ ЭНАС», 2002. 247 с.
3. Hingorani, N.G., Gyugyi L. Understanding FACTS. Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems. New York: IEEE Press book, 2000. 444 p.
4. Gyugyi, L., Otto R.A., Putman T.H. Principles and applications of static, thyristor controlled shunt compensators // IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-97, no. 5, 1978, pp. 1935-1945.
5. Корнилов Г.П., Николаев А.А., Храмин Т.Р. Моделирование электротехнических комплексов промышленных предприятий. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2014. 239 с.
6. Николаев А.А. Повышение эффективности работы статического тиристорного компенсатора сверхмощной дуговой сталеплавильной печи: дис. ... канд. техн. наук. Магнитогорск МГТУ им. Г.И. Носова, 2009. 204 с.
7. Kawamura A. An Optimal Control Method Applied for the Compensation of the Fundamental VAR Fluctuations in the Arc Furnace // IEEE Transactions of Industry Applications. 1983, vol. 1A-19, iss. 3. pp. 414-423. doi: 10.1109/TIA.1983.4504217
8. Свенчанский А.Д. Автоматическое управление электротермическими установками: учебник для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1990. 416 с.
9. Парсункин Б.Н., Андреев С.М., Ахметов У.Б. Оптимизация управления технологическими процессами в металлургии: монография. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2006. 198 с.
10. Yuhua W., Jianlin M. Electrode regulator system for ore smelting electric arc furnace based on active disturbance rejection control technology // Advanced Computer Control (ICACC), 2010 2nd International Conference (27-29 March 2010). 2010, vol. 2, pp. 109-113. doi: 10.1109/ICACC.2010.5487195
11. Математическая модель электрического контура дуговой сталеплавильной печи с реализацией случайных возмущений электрических дуг / А.А. Николаев, Г.П. Корнилов, А.В. Ануфриев, Е.В. Повелица // Приложение математики в экономических и технических исследованиях. 2014. №4(4). С. 260-271.
12. Пути совершенствования динамических характеристик дуговых сталеплавильных печей / И.А. Якимов, А.А. Николаев, Д.А. Корнилов, Г.П. Корнилов, А.В. Ануфриев, В.С. Горбунов, Е.В. Прудников // Электротехнические системы и комплексы. 2010. № 1. С. 233.
13. Особенности электроснабжения металлургического завода «ММК-METALURJI» / Г.П. Корнилов, А.А. Николаев, А.В. Ануфриев, И.А. Ложкин, В.С. Ивекеев, Е.Б. Славгородский // Электротехнические системы и комплексы. 2012. № 20. С. 235-238.
14. Ограничение провалов напряжения в системах электроснабжения промышленных предприятий / Г.П. Корнилов, А.Ю. Коваленко, А.А. Николаев, И.Р. Абдулвелеев, Т.Р. Храмин // Электротехнические системы и комплексы. 2014. № 2 (23). С. 44-48.
15. Исследование влияния провалов напряжения в системе электроснабжения завода «ММК-METALURJI» на работу главных электроприводов стана горячей прокатки / А.А. Николаев, А.С. Денисевич, И.А. Ложкин, М.М. Тухватуллин // Электротехнические системы и комплексы. 2015. № 3 (28). С. 8-14.
16. Николаев А.А., Тулупов П.Г. Разработка усовершенствованных алгоритмов управления гидроприводом перемещения электродов сверхмощной электродуговой сталеплавильной печи ДСП-250 // Электротехнические системы и комплексы. 2015. № 3 (28). С. 20-27.

Поступила в редакцию 14 июня 2016 г.

INFORMATION IN ENGLISH

DESIGN OF MATHEMATICAL MODEL OF ELECTROTECHNICAL COMPLEX "ELECTRIC ARC FURNACE – STATIC VAR COMPENSATOR"

Alexander A. Nikolaev

Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Head of the department, Department of Automatic Electric Drive and Mechatronics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: alexniko@inbox.ru.

Vasiliy V. Anokhin

Undergraduate, the department of Power Supply Systems of Industrial Enterprises, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: anohinvasilii@mail.ru.

Platon G. Tulupov

Undergraduate, the department of Automatic Electric Drive and Mechatronics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: tulupov.pg@mail.ru.

The article is concerned with detailed description of the mathematical model of electrotechnical complex «Electric arc furnace – static var compensator». We chose an electric arc furnace EAF-120 (85 MVA) and SVC-100 Mvar as an object of this research. The model was designed with Simulink Matlab application and makes it possible to provide the wide range of research aimed at analysis of the EAF electrical modes and algorithms of reactive power control for SVC. To demonstrate the possibilities of model, the following graphs were obtained for: electrical characteristics of EAF-120; electric arc current

oscillations in the phase "A"; electrical and technological characteristics of EAF-120 with distribution of operating points; total electric arc power during the transition from one heating stage to another; reactive power of the electrotechnical complex EAF-120 – SVC and voltage on the bus bars of indoor switchgear for different regulating modes of the thyristor-controlled reactor.

Keywords: Mathematical model, electric arc furnace, static var compensator, electrode position control system, reactive power compensation, arc currents random disturbances.

REFERENCES

1. Evtyukova I.P., Katsevich L.S., Nekrasova N.M., Svenchanskiy A.D. *Elektrotekhnologicheskie promyshlennye ustanovki* [Industrial Electrotechnological Installations]. Moscow, Energoizdat Publ., 1982, 400 p.
2. Kochkin V.I., Nechaev O.P. *Primenenie staticheskikh kompensatorov reaktivnoy moshchnosti v elektricheskikh setyakh energosistem i predpriyatiy* [Application of Static var Compensator in Electric Networks of Power Supply and Enterprises], Moscow, NTs ENAS Publ., 2002, 247 p.
3. Hingorani, N.G., Gyugyi L. *Understanding FACTS. Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems*. New York, IEEE Press book, 2000, 444 p.
4. Gyugyi, L., Otto R.A., Putman T.H. Principles and applications of static, thyristor-controlled shunt compensators, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-97, no. 5, 1978, pp. 1935-1945.
5. Kornilov G.P., Nikolaev A.A., Khramshin T.R. *Modelirovanie elektrotekhnicheskikh kompleksov promyshlennykh predpriyatiy* [Mathematical Modeling of the Industrial Plants Electrotechnical Complexes], training manual. Magnitogorsk, Nosov MSTU Publ., 2014, 239 p.
6. Nikolaev A.A. *Povyshenie effektivnosti raboty staticheskogo tiristorного kompensatora sverkhmoshchnoy dugovoy staleplavilnoy pechi* [Improvement of Efficiency of Static Var Compensator of Ultra-High Power Electric Arc Furnace. Ph.D. Diss.], Magnitogorsk, Nosov MSTU, 2009, 204 p.
7. Kawamura A. An Optimal Control Method Applied for the Compensation of the Fundamental VAR Fluctuations in the Arc Furnace, *IEEE Transactions of Industry Applications*, 1983, vol. 1A-19, iss. 3, pp. 414-423. doi: 10.1109/TIA.1983.4504217
8. Svenchanskiy A.D. *Avtomaticheskoe upravlenie elektrotermicheskimi ustanovkami* [Electrothermal Equipment Automated Control]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1990, 416 p.
9. Parsunkin B.N., Andreev S.M., Akhmetov U.B. *Optimizatsiya upravleniya tekhnologicheskimi protsessami v metallurgii* [Optimization of Technological Process Control in Metallurgy]: monograph. Magnitogorsk: Nosov MSTU Publ., 2006, 198 p.
10. Yuhua W., Jianlin M. Electrode regulator system for ore smelting electric arc furnace based on active disturbance rejection control technology. *Advanced Computer Control (ICACC)*, 2010 2nd International Conference (27-29 March 2010), 2010, vol. 2, pp. 109-113. doi: 10.1109/ICACC.2010.5487195
11. Nikolaev A.A., Kornilov G.P., Anufriev A.V., Povelitsa E.V. Mathematical Model of Electric Arc Furnaces Electric Circuit with Realization of Electric Arcs Random Disturbances. *Prilozhenie matematiki v ekonomicheskikh i tekhnicheskikh issledovaniyakh* [Application of Mathematics in Economic and Technical Investigations], 2014, no. 4(4), pp. 260-271. (In Russian)
12. Yakimov I.A., Nikolaev A.A., Kornilov D.A., Kornilov G.P., Anufriev A.V., Gorbunov V.S., Prudnikov E.V. Ways of Improvement of Arc-Furnaces Dynamic Characteristics. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2010, no. 1, pp. 233. (In Russian)
13. Kornilov G.P., Nikolaev A.A., Anufriev A.V., Lozhkin I.A., Ivekeev V.S., Slavgorodskiy E.B. Special aspects of metallurgical plant MMK-METALURJI electric power supply. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2012, no. 20, pp. 235-238. (In Russian)
14. Kornilov G.P., Kovalenko A.Yu., Nikolaev A.A., Abduvelev I.R., Khramshin T.R. Limitation of voltage drops in power supply systems of enterprises. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2014, no. 2 (23), pp. 44-48. (In Russian)
15. Nikolaev A.A., Denisevich A.S., Lozhkin I.A., Tukhvattulin M.M. Investigation of voltage drops' influence in the power supply system of the "MMK Metalurji" ironworks on the main electric drives of the hot strip mill. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2015, no. 3 (28), pp. 8-14. (In Russian)
16. Nikolaev A.A., Tulupov P.G. Development of the improved control algorithms for ultra-high power electric arc furnace EAF-250 electrode motion system. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2015, no. 3 (28), pp. 20-27. (In Russian)

Николаев А.А., Анохин В.В., Тулупов П.Г. Разработка математической модели электротехнического комплекса «дуговая сталеплавильная печь – статический тиристорный компенсатор» // Электротехнические системы и комплексы. 2016. №4(33). С.61-71. doi: 10.18503/2311-8318-2016-4(33)-61-71

Nikolaev A.A., Anokhin V.V., Tulupov P.G. Design of Mathematical Model of Electrotechnical Complex "Electric Arc Furnace – Static Var Compensator". *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2016, no.4(33), pp. 61-71. (In Russian). doi: 10.18503/2311-8318-2016-4(33)-61-71

Абулвелеев И.Р.¹, Храмшин Т.Р.¹, Корнилов Г.П.¹, Никифоров Г.В.²

¹ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»

²ООО «Магнитогорскгазстрой»

Принципы построения векторной широтно-импульсной модуляции для трехуровневого инвертора

В статье представлена схема двухзвенного преобразователя частоты на базе трехуровневых активного выпрямителя и автономного инвертора напряжения в составе регулируемого электропривода большой мощности. Рассмотрены основные способы формирования выходного напряжения инвертора средствами широтно-импульсной модуляции. Приведены основные принципы работы векторной ШИМ трехуровневого NPC-инвертора с фиксированной нейтральной точкой, включая формирование вектора выходного напряжения. Представлены формулы для расчета коэффициентов продолжительности и времени включения управляемых ключей, а также получены зависимости изменения продолжительности включения от угла задающего вектора при различных значениях коэффициента модуляции. В работе предложены стандартные шаблоны последовательности переключений. Представляет интерес произвести углубленное исследование предложенных алгоритмов формирования выходного напряжения инвертора с помощью математического моделирования, что будет осуществлено в будущем.

Ключевые слова: трехуровневый инвертор с фиксированной нейтральной точкой, векторная широтно-импульсная модуляция, шаблоны переключений.

ВВЕДЕНИЕ

Наиболее распространенным исполнением конверторов промышленных электроприводов большой мощности на сегодняшний день является параллельное включение двух одинаковых двухзвенных преобразователей частоты (ПЧ), каждый из которых представляет собой совокупность активного выпрямителя АВН (AFE – active front-end) и автономного инвертора напряжения АИН (VSI – voltage source inverter) [1, 2]. Подобная схема (**рис. 1**) нашла широкое применение в регулируемых электроприводах мощных прокатных станов, дробилок, конвейеров и т.д.

Силовой трансформатор конвертора выполнен по двенадцатипульсной схеме, для этого первичные обмотки двух отдельных трансформаторов соединены звездой и включены последовательно [3, 4]. Вторичная обмотка одного трансформатора соединена звездой, а второго – треугольником. В такой схеме ввиду симметрии трехфазной цепи отсутствуют гармоники, кратные 3. В свою очередь последовательное соединение первичных обмоток по 12-пульсной схеме позволяет за счет суммирования первых гармоник напряжений, сдвинутых на 30° , скомпенсировать гармоники тока $6(2k-1) \pm 1$ порядка. Таким образом, в сетевом токе трансформаторов отсутствуют 3, 5, 7, 9, 15, 17, 19 и т.д. гармоники.

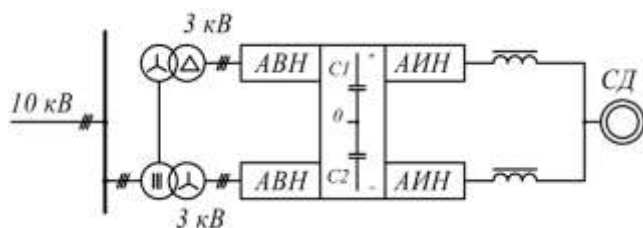


Рис. 1. Схема включения конвертора двигателя прокатного стана

Электрическая схема одного двухзвенного ПЧ, включающая в себя трехуровневые АВН и АИН, представлена на **рис. 2**. По сравнению с другими традиционными схемами ПЧ, такой подход обеспечивает двусторонний обмен энергией между двигателем и сетью, а также максимальное значение коэффициента мощности при потреблении практически синусоидального тока из сети.

Увеличение единичной мощности современных двигателей регулируемых электроприводов переменного тока оказало значительное влияние на развитие многоуровневых преобразователей частоты, в частности трехуровневых автономных инверторов напряжения с фиксированной нейтральной точкой NPC-VSI (Neutral Point Clamped) [5]. Подобная топология преобразователя, предложенная еще в 1981 году и получившая широкое распространение с середины 1990-х, имеет ряд преимуществ перед двухуровневыми инверторами:

1. Возможность подключения высоковольтных двигателей напряжением до 6000 В без дополнительного трансформатора на выходе преобразователя, благодаря последовательному включению GTO-тириستоров или IGBT-транзисторов в фазах инвертора.

2. Пониженное содержание высших гармоник в форме кривых выходного напряжения и тока преобразователя. Формирование трехуровневого фазного напряжения позволяет получить пятиуровневое линейное напряжение на выходе инвертора и за счет этого более качественный гармонический состав [6].

Для формирования выходного напряжения трех-уровневого инвертора в подавляющем большинстве систем используются три основных метода широтно-импульсной модуляции (ШИМ) [7-13]:

1) Метод сравнения сигналов управления с кривой опорного напряжения CBPWM (Carrier based pulse width modulation).

2) Метод удаления выделенных гармоник SHE (Selective harmonic eliminated).

3) Метод векторной широтно-импульсной модуляции SVPWM (Space vector pulse width modulation).

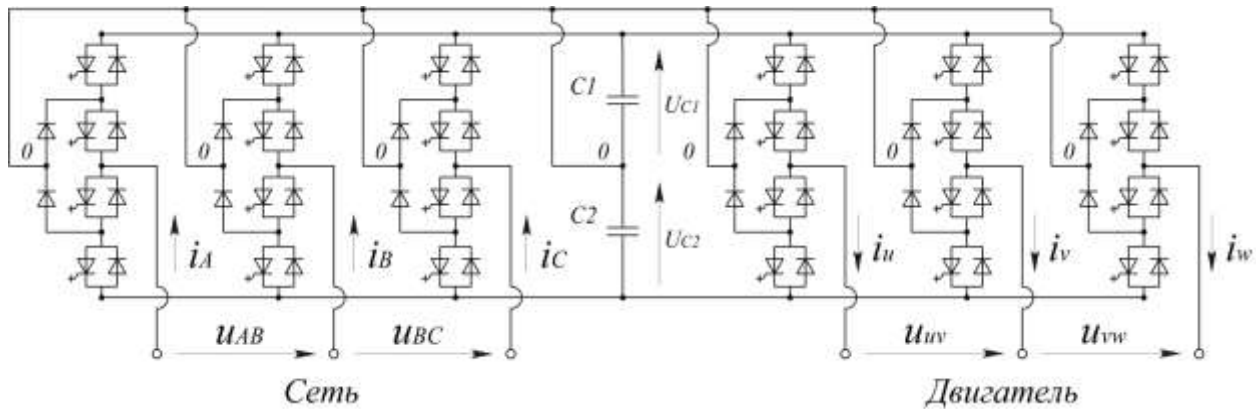


Рис. 2. Двухзвенный преобразователь частоты

Последний вариант является наиболее приемлемым в большинстве случаев, поскольку обладает значительной гибкостью при формировании кривой выходного напряжения и ориентирован на микропроцессорную реализацию [7].

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ И ПОНЯТИЯ ВЕКТОРНОЙ ШИМ

Трехуровневый NPC-инвертор имеет 27 различных комбинаций коммутационных состояний полупроводниковых ключей [8], так как каждая из трех фаз может иметь на выходе три различных уровня напряжения: P , O , N . Каждому коммутационному состоянию фазы инвертора соответствует определенный вектор выходного напряжения. Совокупность 27 возможных коммутационных состояний инвертора образует правильный шестиугольник на пространственной плоскости, сформированный из 19 соответствующих базовых векторов выходного напряжения (рис. 3). Базовые векторы включают в себя 6 «длинных» (a и b), 6 «средних» (c), 6 «коротких» (ap или an и bp или bn) и 1 «нулевой» вектор (op , on или oo), названия которых в дальнейшем указаны без кавычек. Из рис. 3 видно, что любой короткий вектор можно получить двумя способами – комбинациями P и O или N и O , в соответствии с этим в обозначении вектора появляется буква p или n , например: ap , bn и т.д. Обозначение нулевого вектора присваивается по аналогичному принципу. Положения ключей при формировании выходных напряжений сведены в табл. 1.

Шестиугольник на рис. 3 делится на секторы; они обозначены буквами A, B, C, D, E, F . Каждый сектор, в свою очередь, делится на четыре равносторонних малых треугольника с индексами 1, 2, 3 и 4. Направление индексации принято от вектора a к вектору b .

Задачей векторной ШИМ является формирование таких фазных выходных напряжений U_u, U_v, U_w трехуровневого NPC-инвертора, чтобы получить требуемый пространственный задающий вектор $\underline{U}_{ref}$:

$$\begin{aligned} \bar{U}_{ref} &= \frac{2}{3} \cdot (U_u + U_v e^{j120^\circ} + U_w e^{j240^\circ}) = \\ &= k(t) \frac{U_{pn}}{\sqrt{3}} e^{j\theta}, \end{aligned} \quad (1)$$

где k – коэффициент модуляции, принимающий значение от 0 до 1 и равный отношению между требуемой

величиной амплитуды фазного напряжения $|U_m|$ и его предельно возможным значением $U_{pn}/\sqrt{3}$ (рис. 4); θ – угол между задающим вектором и вектором a .

Подчеркнем, два перечисленных параметра: коэффициент модуляции (амплитуда) k и угол θ определяют положение вектора задающего напряжения.

Пусть задан некоторый вектор $\underline{U}_{ref}$, как это показано на рис. 4. В связи с тем, что шестиугольник пространственных векторов обладает определенной внутренней симметрией, рассмотрим только случай, когда угол задающего вектора лежит в пределах $0^\circ \leq \theta \leq 60^\circ$, т.е. в пространстве, ограниченном сектантом A .

При формировании задающего вектора напряжения, как правило, используют технику трех ближайших векторов NTV (Nearest three vectors) [9]. На рис. 4 конец вектора $\underline{U}_{ref}$ расположен в затененном треугольнике $A2$, следовательно, согласно NTV для синтеза задающего вектора следует задействовать базовые векторы $\underline{U}_S, \underline{U}_M$ и $\underline{U}_L$ (индексы S, M, L означают короткий, средний и длинный векторы соответственно). Для получения требуемого значения амплитуды и угла $\underline{U}_{ref}$ необходимо лишь рассчитать коэффициенты продолжительности включения каждого из трех ближайших базовых векторов. Таким образом, задающее напряжение определяется по формуле

$$\begin{aligned} \bar{U}_{ref} &= d_S \cdot \bar{U}_S + d_M \cdot \bar{U}_M + d_L \cdot \bar{U}_L; \\ d_S + d_M + d_L &= 1, \end{aligned} \quad (2)$$

где d_S, d_M, d_L – коэффициенты продолжительности включения короткого, среднего и длинного векторов соответственно, выраженные в долях.

Время включения трех ближайших векторов определяется периодом ШИМ T и рассчитывается в зависимости от области расположения вершины задающего вектора по формулам, приведенным в табл. 2 [10].

Пример изменения коэффициентов продолжительности в зависимости от угла при различных значениях коэффициента модуляции показан на рис. 5. Если вершина задающего вектора расположена в области $A3$, то в синтезе $\underline{U}_{ref}$ участвуют два коротких вектора $S1, S2$ и один средний M . Следовательно, в пределах области $A3$ для заданного коэффициента модуляции сумма коэффициентов продолжительности трех базовых векторов $dS1, dS2$ и dM , как видно из рис. 5, равна единице.

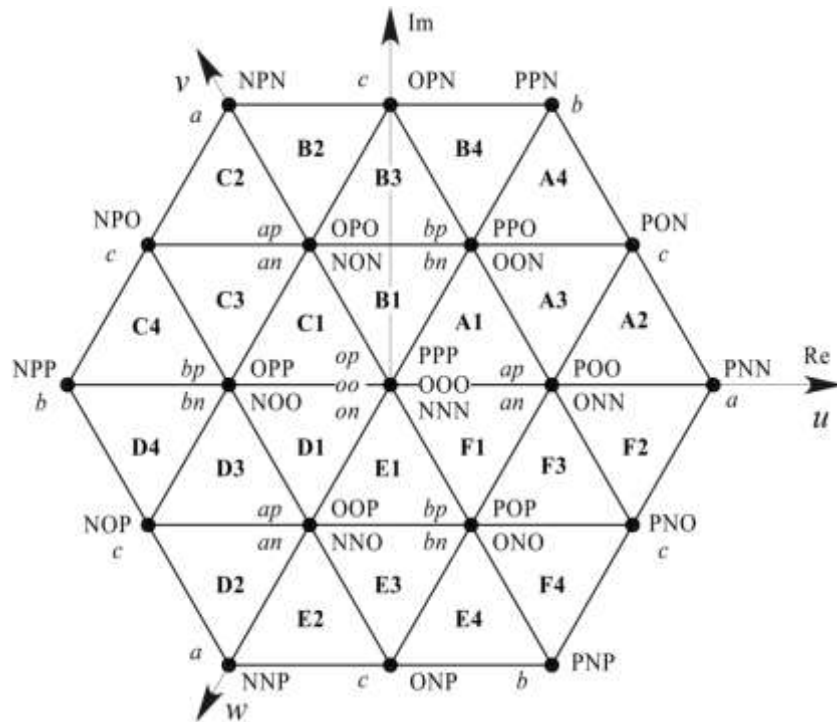


Рис. 3. Векторное представление выходных напряжений трехуровневого NPC-инвертора

Таблица 1

Положения ключей при формировании векторов напряжений

Категория	Обозначение	Положение ключей
Длинные L	a	PNN (1,-1,-1), NPN (-1, 1, -1), NNP (-1, -1, 1)
	b	PPN (1, 1, -1), NPP (-1, 1, 1), PNP (1, -1, 1)
Средние M	c	PON (1, 0, -1), OPN (0, 1, -1), NPO (-1, 1, 0), NOP (-1, 0, 1), ONP (0, -1, 1), PNO (1, -1, 0)
Короткие S	ap	POO (1, 0, 0), OPO (0, 1, 0), OOP (0, 0, 1)
	an	ONN (0, -1, -1), NON (-1, 0, -1), NNO (-1, -1, 0)
	bp	PPO (1, 1, 0), OPP (0, 1, 1), POP (1, 0, 1)
	bn	OON (0, 0, -1), NOO (-1, 0, 0), ONO (0, -1, 0)
Нулевые	op, oo, on	PPP (1, 1, 1), OOO (0, 0, 0), NNN (-1, -1, -1)

Таблица 2

Формулы расчета времени включения трех ближайших векторов

Область	Три ближайших вектора	Время включения
A1, B1, C1, D1, E1, F1	op, oo, on	$t_0 = T \cdot [1 - 2 \cdot k \cdot \sin(\theta + \pi/3)]$
	ap, an	$t_1 = 2 \cdot k \cdot T \cdot \sin(\pi/3 - \theta)$
	bp, bn	$t_2 = 2 \cdot k \cdot T \cdot \sin \theta$
A2, B2, C2, D2, E2, F2	ap, an	$t_1 = 2 \cdot T \cdot [1 - k \cdot \sin(\theta + \pi/3)]$
	c	$t_3 = 2 \cdot k \cdot T \cdot \sin \theta$
	a	$t_4 = T \cdot [2 \cdot k \cdot \sin(\pi/3 - \theta) - 1]$
A3, B3, C3, D3, E3, F3	ap, an	$t_1 = T \cdot [1 - 2 \cdot k \cdot \sin \theta]$
	bp, bn	$t_2 = T \cdot [1 - 2 \cdot k \cdot \sin(\pi/3 - \theta)]$
	c	$t_3 = T \cdot [2 \cdot k \cdot \sin(\theta + \pi/3) - 1]$
A4, B4, C4, D4, E4, F4	bp, bn	$t_2 = 2 \cdot T \cdot [1 - k \cdot \sin(\theta + \pi/3)]$
	c	$t_3 = 2 \cdot k \cdot T \cdot \sin(\pi/3 - \theta)$

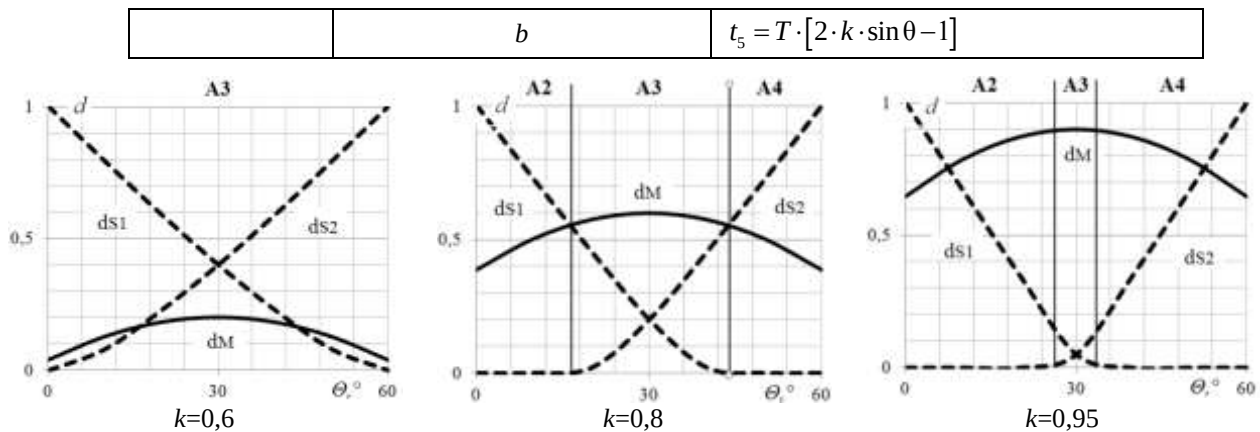


Рис. 4. Изменение коэффициента продолжительности включения векторов

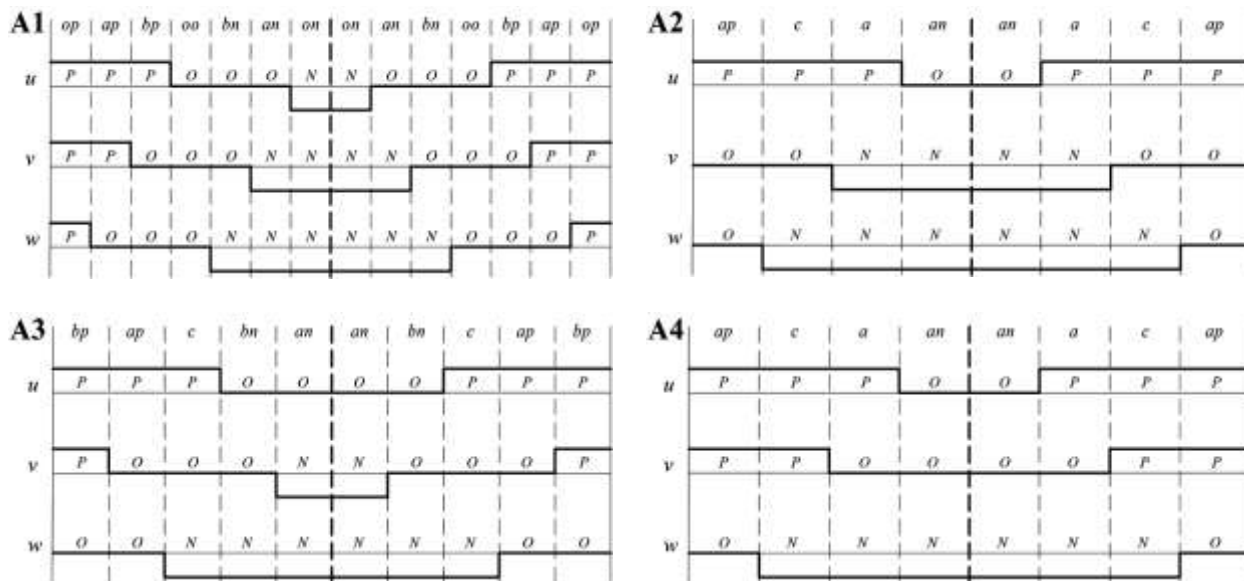


Рис. 5. Стандартные шаблоны циклов переключений NTV

ФОРМИРОВАНИЕ ШАБЛОНОВ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЙ

Стандартные шаблоны последовательности переключений для каждой области показаны на рис. 6. Следует отметить, что при построении подобных шаблонов важным условием является переключение только одного ключа при переходе от одного вектора к другому. В связи с этим в шаблонах фигурируют все возможные конфигурации коротких и нулевых векторов. Известно, что, изменяя соотношение продолжительности включения разнополярных коротких векторов (ap и ar , bp и br), можно контролировать потенциал нейтральной точки [11].

Следует отметить некоторые характерные особенности шаблонов, представленных на рис. 6, в дальнейшем оказывающих влияние не только на алгоритм формирования, но и на гармонический состав выходного напряжения. Например, векторы a и b присутствуют только в «крайних» областях сектора $A2$ или $A4$, вектор c – во всех областях кроме $A1$, а векторы op , oo , on – только в области $A1$. Кроме того, для областей $A2$ и $A4$ характерно наличие только одной пары полярных коротких векторов: ap/ar или bp/bn . Это приводит к тому, что каждая фаза в этих областях будет переключаться только в однополярном режиме «О-Р» или «О-Н». Тогда как наличие в $A1$ и $A3$ обеих пар полярных

векторов приводит к двухполярным переключениям ключей каждой фазы инвертора «Р-О-Н».

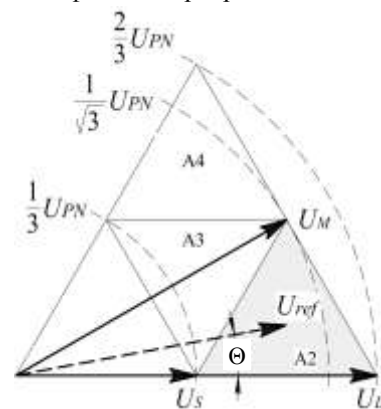


Рис. 6. Формирование задающего вектора напряжения

Формирование шаблонов переключений в зависимости от значения коэффициента модуляции, а также выводы и рекомендации будут представлены позже в следующем номере журнала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абдулвелеев И.Р., Храмшин Т.Р., Корнилов Г.П. Анализ способов модуляции напряжения активных выпрямителей

- на базе модульных многоуровневых конвертеров // Вестник ЮУрГУ. Серия: Энергетика. 2015. Т.15. №3. С. 25-36.
2. Rodriguez J., Lai J.S., Peng F.Z. Multilevel Inverters: A Survey of Topologies, Controls, and Applications. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2002, vol. 49, no. 4, pp. 724-738.
 3. Abdulvelev I.R., Khrashin T.R., Kornilov G.P., Krubcov D.S. Electromagnetic Compatibility of High Power STATCOM in Asymmetrical Conditions, 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), pp. 1-6. doi: 10.1109/SIBCON.2015.7146966
 4. Храшин Т.Р., Абдулвелев И.Р., Корнилов Г.П. Электромагнитная совместимость мощного СТАТКОМа при несимметричных режимах работы питающей сети // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. 2015. Т. 2, № 2. С. 40–46. doi: 10.14529/power150304
 5. Walczyn A.M., Hill R.J. Space Vector PWM Strategy for 3-Level Inverters With Direct Self-Controls. Fifth European Conference on Power Electronics and Applications, 1993, vol.4, pp. 152-157.
 6. Lui H.L., Choi N.S., Cho G.H. DSP Based Space Vector PWM for Three-Level Inverter with DC-Link Voltage Balancing, 1991 International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation (IECON '91), 1991, vol.1, pp. 197-203.
 7. Lui H.L., Choi N.S., Cho G.H. DSP Based Space Vector PWM for Three-Level Inverter with DC-Link Voltage Balancing, 1991 International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation (IECON '91), 1991, vol.1, pp. 197-203.
 8. Busquets-Monge S., Bordonau J., Boroyevich D., Somavilla S. The Nearest Three Virtual Space Vector PWM – A Modulation for the Comprehensive Neutral-Point Balancing in the Three-Level NPC Inverter. IEEE Power Electronics Letters, 2004, vol. 2, no. 1, pp. 11-15.
 9. Busquets-Monge S., Somavilla S., Bordonau J., Boroyevich D. The Capacitor Voltage Balance for the Neutral-Point-Clamped Converter using the Virtual Space Vector Concept With Optimized Spectral Performance. IEEE Transactions on Power Electronics, 2007, vol. 22, no. 4, pp. 1128-1135.
 10. Yamanaka K., Hava A.M., Kirino H., Tanaka Y., Koga N., Kume T. A Novel Neutral Point Potential Stabilization Technique Using the Information of Output Current Polarities and Voltage Vector. IEEE Transactions on Industry Applications, 2002, vol. 38, no. 6, pp. 1572-1580.
 11. Das S., Narayanan G. Novel Switching Sequences for a Space-Vector-Modulated Three-Level Inverter. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, vol. 59, no. 3, pp. 1477-1487.
 12. Храшин Т.Р., Храшин Р.Р., Корнилов Г.П. Расчет электромагнитных процессов в трехфазном двухуровневом инверторе напряжения // Электротехнические системы и комплексы. 2010. № 1. С. 212.
 13. Формирование фазных напряжений четырехуровневого высоковольтного преобразователя частоты / Т.Р. Храшин, Р.Р. Храшин, Г.П. Корнилов, Д.С. Крубцов // Электротехнические системы и комплексы. 2011. № 1. С. 174-181.

Поступила в редакцию 27 июня 2016 г.

INFORMATION IN ENGLISH

BASIC PRINCIPLES OF SPACE VECTOR MODULATION FOR THREE-LEVEL NPC-INVERTERS

Il'dar R. Abdulvelev

Post-graduate student, Electric Power Supply of Industrial Enterprises Department, Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Timur R. Khrashin

Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Electric Power Supply of Industrial Enterprises Department, Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Gennadiy P. Kornilov

D.Sc (Eng.), Professor, Head of the department of electric power supply of industrial enterprises, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: korn_mgn@mail.ru.

Gennadiy V. Nikiforov

D.Sc (Eng.), chairman of board of directors, Magnitogorsk gazstroy LLC, Magnitogorsk, Russia.

The article shows a scheme of a two-link converter on the basis of a three-level active front-end and voltage source inverter incorporated into a high power electric drive. The authors considered the main ways to generate an output voltage of the inverter by means of pulse-width modulation. The basic operating principles of three-level NPC-inverter space vector PWM were considered including the generation of the output voltage vector. The article describes the formula to calculate the factors of length and turn-on time of monitoring keys, as well as the relationship between the changes in the duty cycle and the angle of the given vector for various values of the modulation index. The paper proposed standard switching sequence templates. It is of interest to produce an in-depth investigation of the proposed algorithms

forming the inverter output voltage with the help of mathematical modeling, which will be done in future.

Keywords: Three-level NPC-inverter, space vector pulse-width modulation, switching sequence.

REFERENCES

1. Abdulvelev I.R., Khrashin T.R., Kornilov G.P. Analysis of Strategies of Modulation Voltage of the Active Front End Based on the Modular Multilevel Converters. *Vestnik YuUrGU. Seriya: Energetika* [Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering], 2015, vol. 15, pp. 25-36. (In Russian). doi: 10.14529/power150304
2. Rodriguez J., Lai J.S., Peng F.Z. Multilevel Inverters: A

- Survey of Topologies, Controls, and Applications. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2002, vol. 49, no. 4, pp. 724-738.
3. Abdulveleev I.R., Khrashin T.R., Kornilov G.P., Krubcov D.S. Electromagnetic Compatibility of High Power STATCOM in Asymmetrical Conditions, 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), pp. 1-6. doi: 10.1109/SIBCON.2015.7146966
 4. Khrashin T.R., Abdulveleev I.R., Kornilov G.P. EMC Powerful STATCOMs with unbalanced conditions of electric supply grid. *Elektrotehnika: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal* [Russian Internet Journal of Electrical Engineering], 2015, vol. 2, no.2, pp. 40-46. (In Russian). doi: 10.14529/power150304
 5. Walczyn A.M., Hill R.J. Space Vector PWM Strategy for 3-Level Inverters With Direct Self-Controls. Fifth European Conference on Power Electronics and Applications, 1993, vol.4, pp. 152-157.
 6. Lui H.L., Choi N.S., Cho G.H. DSP Based Space Vector PWM for Three-Level Inverter with DC-Link Voltage Balancing, 1991 International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation (IECON '91), 1991, vol.1, pp. 197-203.
 7. Lui H.L., Choi N.S., Cho G.H. DSP Based Space Vector PWM for Three-Level Inverter with DC-Link Voltage Balancing, 1991 International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation (IECON '91), 1991, vol.1, pp. 197-203.
 8. Busquets-Monge S., Bordonau J., Boroyevich D., Somavilla S. The Nearest Three Virtual Space Vector PWM – A Modulation for the Comprehensive Neutral-Point Balancing in the Three-Level NPC Inverter. IEEE Power Electronics Letters, 2004, vol. 2, no. 1, pp. 11-15.
 9. Busquets-Monge S., Somavilla S., Bordonau J., Boroyevich D. The Capacitor Voltage Balance for the Neutral-Point-Clamped Converter using the Virtual Space Vector Concept With Optimized Spectral Performance. IEEE Transactions on Power Electronics, 2007, vol. 22, no. 4, pp. 1128-1135.
 10. Yamanaka K., Hava A.M., Kirino H., Tanaka Y., Koga N., Kume T. A Novel Neutral Point Potential Stabilization Technique Using the Information of Output Current Polarities and Voltage Vector. IEEE Transactions on Industry Applications, 2002, vol. 38, no. 6, pp. 1572-1580.
 11. Das S., Narayanan G. Novel Switching Sequences for a Space-Vector-Modulated Three-Level Inverter. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, vol. 59, no. 3, pp. 1477-1487.
 12. Khrashin T.R., Khrashin R.R., Kornilov G.P. Computation of electromagnetic processes in the three-phase double stage voltage inverter. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2010, no. 1, pp. 212. (In Russian)
 13. Khrashin T.R., Khrashin R.R., Kornilov G.P., Krubtsov D.S. Generation of phase voltages of four-level frequency converter. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2011, no. 1, pp. 174-181. (In Russian)
-
- Абулвелеев И.Р., Храшин Т.Р., Корнилов Г.П., Никифоров Г.В. Принципы построения векторной широтно-импульсной модуляции для трехуровневого инвертора // *Электротехнические системы и комплексы*. 2016. №4(33). С.72-77. doi: 10.18503/2311-8318-2016-4(33)-72-77
-
- Abulveleev I.R., Khrashin T.R., Kornilov G.P., Nikiforov G.V. Basic principles of space vector modulation for three-level NPC-inverters. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2016, no.4(33), pp. 72-77. (In Russian). doi: 10.18503/2311-8318-2016-4(33)-72-77
-

ОБОБЩЕННОЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ТИРИСТОРНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ, ВЕДОМЫХ СЕТЬЮ

Дано обоснование единства математической структуры трехфазных тиристорных регуляторов переменного напряжения и мостовых выпрямителей. На этой основе предложена обобщенная математическая модель в среде MatLab для исследования этих преобразователей. По результатам исследований на математической модели разработаны принципы построения и создана экспериментальная установка, которая может работать и как выпрямитель, и как регулятор переменного напряжения.

Ключевые слова: постоянный ток, переменный ток, выпрямитель, регулятор переменного напряжения, обобщенная математическая модель.

ВВЕДЕНИЕ

При математическом описании и моделировании устройств силовой электроники AC/DC и DC/AC целесообразно учитывать параметры в цепях постоянного и переменного тока. Введение параметров источников питания и электропередачи позволяет создать возможность варьирования параметрами в цепях AC и DC и обеспечить универсальность математической структуры для применения в исследованиях широкого класса преобразователей. Используя этот подход, покажем на примере тиристорных выпрямителей и регуляторов переменного напряжения единство их математической структуры, на основе которой предложена обобщенная математическая модель этих преобразователей.

ТРЕХФАЗНЫЕ ТИРИСТОРНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Схема мостового тиристорного выпрямителя [1, 4] приведена на **рис. 1, а**. Она содержит шесть тиристоров, обозначенных по перекрестному принципу. Если в этой схеме выходные зажимы закоротить, а между сетью и тиристорным мостом включить трёхфазную нагрузку переменного тока, то получим схему трёхфазного регулятора переменного напряжения [2, 3], приведенную на **рис. 1, г**. Обычно регулятор переменного напряжения изображается так, как показано на **рис. 1, б**. В этой схеме напряжение сети U_C , распределяясь между тиристорами U_T и нагрузкой U_H , равно сумме $U_C = U_T + U_H$. Поменяем местами слагаемые в этой сумме и, переходя к схеме на **рис. 1, в**, переставим соответственно местами тиристоры и нагрузку. От этой перестановки и перераспределения напряжения на элементах суммарный результат и физические процессы в схеме не изменятся.

Если сравнить схемы, приведенные на **рис. 1, в** и **рис. 1, г**, то они идентичны. У них тиристоры соединены попарно встречно параллельно и включены в цепь нагрузки. Нумерация тиристоров на всех схемах также совпадает. К фазе *A* относятся тиристоры VS1 и VS4, к фазе *B* - VS3 и VS6 и к фазе *C* - VS5 и VS2.

По этим признакам видно, что выпрямитель может применяться как регулятор переменного напряжения и наоборот. Отличие лишь в том, что у выпрямителя от-

счёт угла управления тиристорами α производится от точки естественной коммутации, сдвинутой в сторону отставания на 30° относительно фазного напряжения сети, а у регулятора переменного напряжения от 0° этого напряжения (перехода фазного напряжения сети через нуль). Это отличие показано на диаграммах управляющих импульсов, приведенных на **рис. 2**.

У регулятора переменного напряжения при работе на чисто индуктивную нагрузку импульсы должны быть широкими, длительностью (см. **рис. 2**) не меньше угла $\varphi = 90^\circ$, в то время как у выпрямителя с любым соотношением между R и L нагрузки они могут быть как короткими и сдвоенными, следуя через 60° , так и широкими, длительностью не меньше 60° . Управление широкими импульсами повышает стабильность работы преобразователей, но при этом исключается возможность применения импульсных трансформаторов в выходном каскаде системы управления, требуется только оптическая развязка.

С учетом вышеприведенных диаграмм возможно переключение с укорачиванием по фронту 90° -градусных импульсов на 60° -градусные и одновременным смещением начала отсчета угла управления тиристорами α на 30° . Таким образом, при выполнении необходимых переключений в силовой схеме и системе управления регулятор переменного напряжения становится выпрямителем. Те же переключения в блочно-модульной схеме обобщенной математической модели позволяют исследовать физические процессы в выпрямителе и регуляторе переменного напряжения при различных видах нагрузки.

ОБОБЩЕННОЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ТИРИСТОРНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ, ВЕДОМЫХ СЕТЬЮ

В отдельный класс выделены преобразователи с синхронизированными с сетью системами управления или преобразователи, ведомые сетью. К ним относятся выпрямители и ведомые сетью инверторы, регуляторы переменного напряжения и циклоконвертеры, реверсивные и рекуперативные преобразователи для электроприводов постоянного и переменного тока [6]. Обобщенная принципиальная схема и соответствующая ей эквивалентная схема замещения вышеперечисленных мостовых тиристорных преобразователей приведены на **рис. 3**.

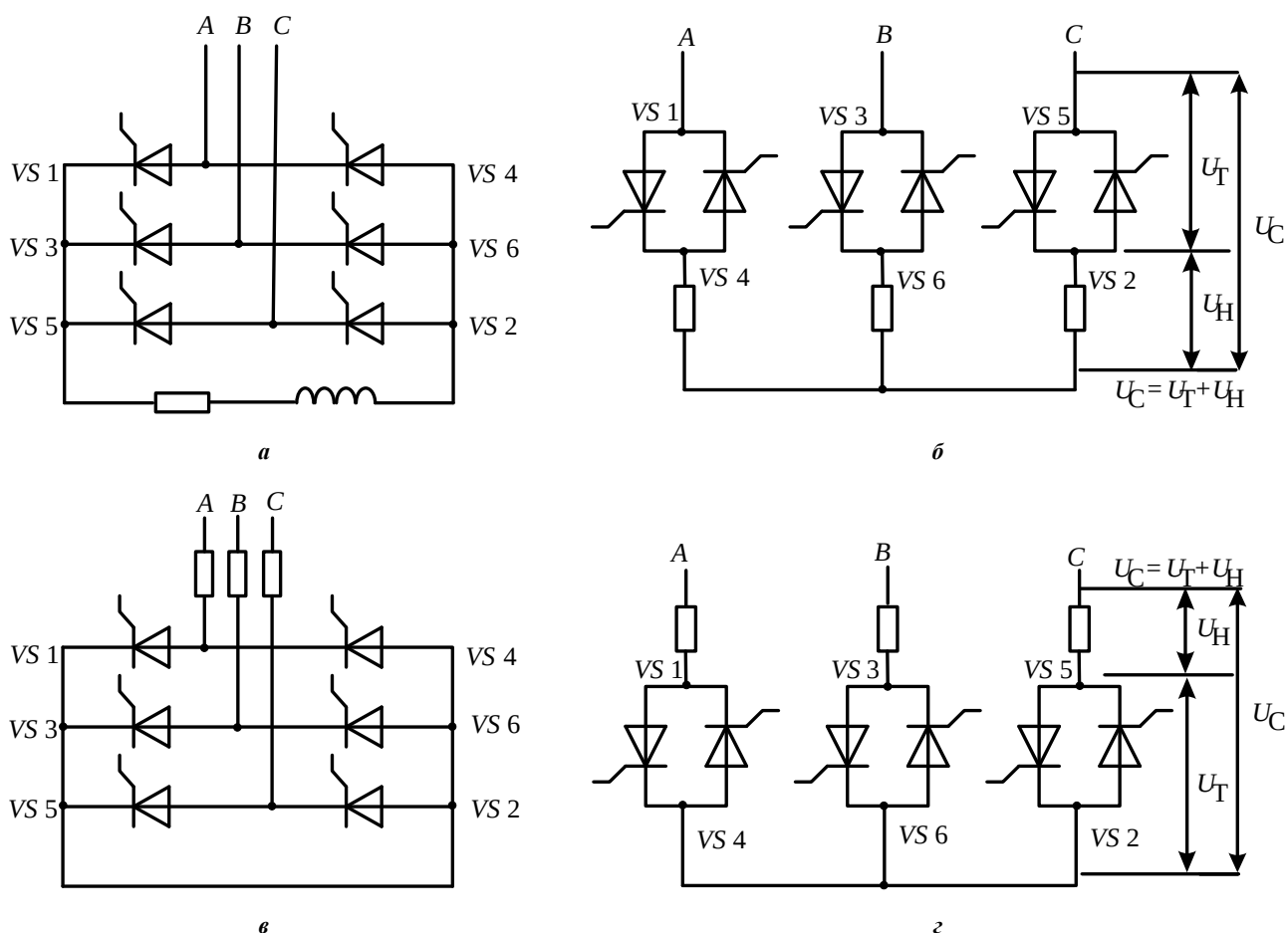


Рис. 1. Схемы трехфазных мостовых преобразователей:
а – выпрямителя; б, в, г – регуляторов переменного напряжения

Из принципиальной схемы (рис. 3, а) и схемы замещения (рис. 3, б) видно, что трехфазный мостовой выпрямитель и трехфазный регулятор переменного напряжения имеют много общего. Регулятор можно получить из выпрямителя путем вкоачивания нагрузки выпрямителя (ключ К4 замкнут) и увеличения сопротивления во входной цепи (ключи К1, К2, К3 разомкнуты). Эта особенность позволила составить одну обобщенную систему уравнений, описывающую электромагнитные процессы в преобразователях рассматриваемого класса.

Проведем апробацию предложенного подхода к исследованию преобразователей на примере трех схем – мостового трёхфазного тиристорного выпрямителя (МТВ), трёхфазного тиристорного регулятора переменного напряжения (ТРН) и преобразователя с нагрузками в цепях постоянного и переменного тока – пускорегулирующий преобразователь [5].

Различают два режима (интервала) работы тиристор в мостовой схеме.

1) В работе находятся два тиристора:

а) у ТРН называют интервалы двухфазной проводимости;

б) у МТВ называют межкоммутационный интервал.

2) В работе находятся три тиристора:

а) у ТРН называют интервалы трехфазной проводимости;

б) у МТВ называют интервал коммутации.

Используют также для обоих преобразователей

термины: «режим прерывистого тока», «бестоковая пауза».

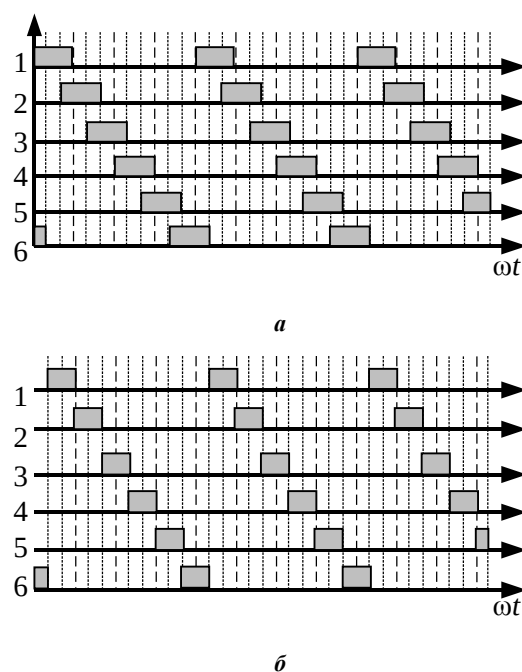


Рис. 2. Диаграммы управляющих импульсов для регулятора переменного напряжения (а) и выпрямителя (б)

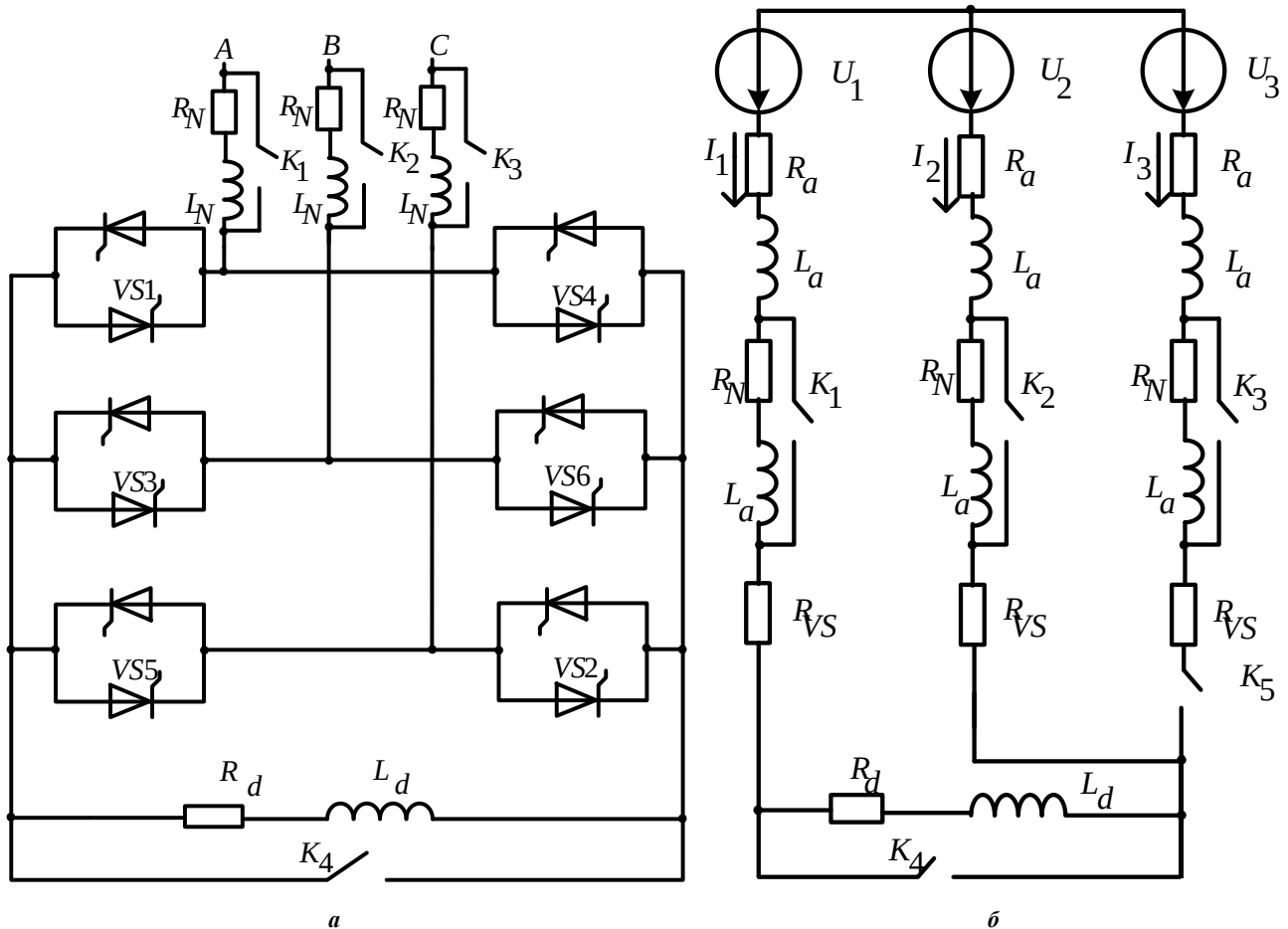


Рис. 3. Принципиальная схема (а) и эквивалентная схема замещения (б) мостовых тиристорных преобразователей

Обобщенная математическая модель учитывает индуктивности рассеяния обмоток сетевого трансформатора или индуктивность сети, которые вместе с индуктивностями нагрузок постоянного и (или) переменного тока влияют на длительность процесса коммутации. Вследствие того, что в коммутирующих фазах ток спадает не мгновенно, а в течение определенного времени, в моменты коммутации в работе одновременно находятся три тиристора.

Обобщенное дифференциальное уравнение, описывающее электромагнитные процессы в исследуемых схемах на межкоммутационных интервалах (двухфазная проводимость):

$$\frac{dI_1}{dt} = \frac{U_1 - U_2 - 2(R_{VS} + R_a + K_n R_n + K_d R_d)I_1}{2(L_a + K_n L_n) + K_d L_d}, \quad (1)$$

где U_1, U_2 – входное и выходное фазные напряжения; I_1 – входной ток; R_a, L_a – сопротивление и индуктивность рассеяния обмоток сетевого трансформатора; R_d, L_d – сопротивление и индуктивность нагрузки выпрямителя; R_n, L_n – сопротивление индуктивность нагрузки регулятора; R_{VS} – сопротивление открытого тиристора, K_d, K_n – коммутационные функции выпрямителя и регулятора.

Обобщенная система дифференциальных уравнений, описывающая электромагнитные процессы в исследуемых схемах в момент коммутации (трехфазная проводимость):

$$\begin{aligned} \frac{dI_2}{dt} &= \frac{x}{3(L_a + K_n L_n) + 2K_d L_d}; \\ x &= U_1 - U_2 - 2(2R_{VS} + R_a + 2K_n R_n + K_d R_d) + \\ &+ (R_{VS} + R_a + K_n R_n) \frac{L_a + K_n L_n + K_d L_d}{L_a + K_n L_n} - \\ &- (U_2 - U_3) \frac{L_a + K_n L_n + K_d L_d}{L_a + K_n L_n}; \\ \frac{dI_3}{dt} &= \frac{y}{L_a + K_n L_n}; \\ y &= U_2 - U_3 - I_3(R_{VS} + R_a + K_n R_n) + \\ &+ I_2(R_{VS} + R_a + K_n R_n) + \frac{dI_2}{dt}(L_a + K_n L_n), \end{aligned} \quad (2)$$

где I_2, I_3 – токи в двух коммутируемых фазах (спадающий и нарастающий соответственно).

Переход от уравнения (1) к системе уравнений производится в соответствии с диаграммой включения тиристорных управляющими импульсами (см. рис. 2), а обратный за счет естественного процесса переходе тока тиристора через нуль.

Обобщенные уравнения (1) и (2) описывают физические процессы трех устройств:

- а) тиристорного выпрямителя, если $K_n = 0$ и $K_d = 1$, т.е. нагрузка включена только в цепь постоянного тока;
- б) регулятора переменного напряжения, если $K_n = 1$ и $K_d = 0$, т.е. нагрузка включена в цепь переменного тока;
- в) пускорегулирующего устройства, если $K_n = 1$ и

$K_d = 1$, т.е. нагрузка включена в цепь переменного тока, а пусковой реостат или дроссель насыщения в цепь постоянного тока.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТИРИСТОРНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Обобщенная математическая модель [7] представлена на **рис. 4**. Здесь нагрузка переменного тока включена между сетью и тиристорным блоком, а нагрузка постоянного тока – на выходе мостового выпрямителя. Наличие двух нагрузок на стороне постоянного и переменного тока находит практическое применение, например, в пускорегулирующих устройствах асинхронных двигателей с фазным ротором. Частными случаями этой схемы является выпрямитель, когда в цепи переменного тока отсутствует нагрузка или регулятор переменного напряжения, когда нагрузка отсутствует в цепи постоянного тока.

Развернутая схема трёхфазного тиристорного моста изображена на **рис. 5**, его система управления – на **рис. 6**.

В состав тиристорного моста входят шесть тиристоров, три входных зажима переменного тока (1, 2, 3) и два выходных зажима постоянного тока (4, 5). Кроме этого, блок содержит информационный выход, с которого управляющие импульсы и напряжение для каждого тиристора подаются на осциллограф Os1.

На управляющий вход тиристорного моста (pulse) подается сигнал с системы управления (**рис. 6**).

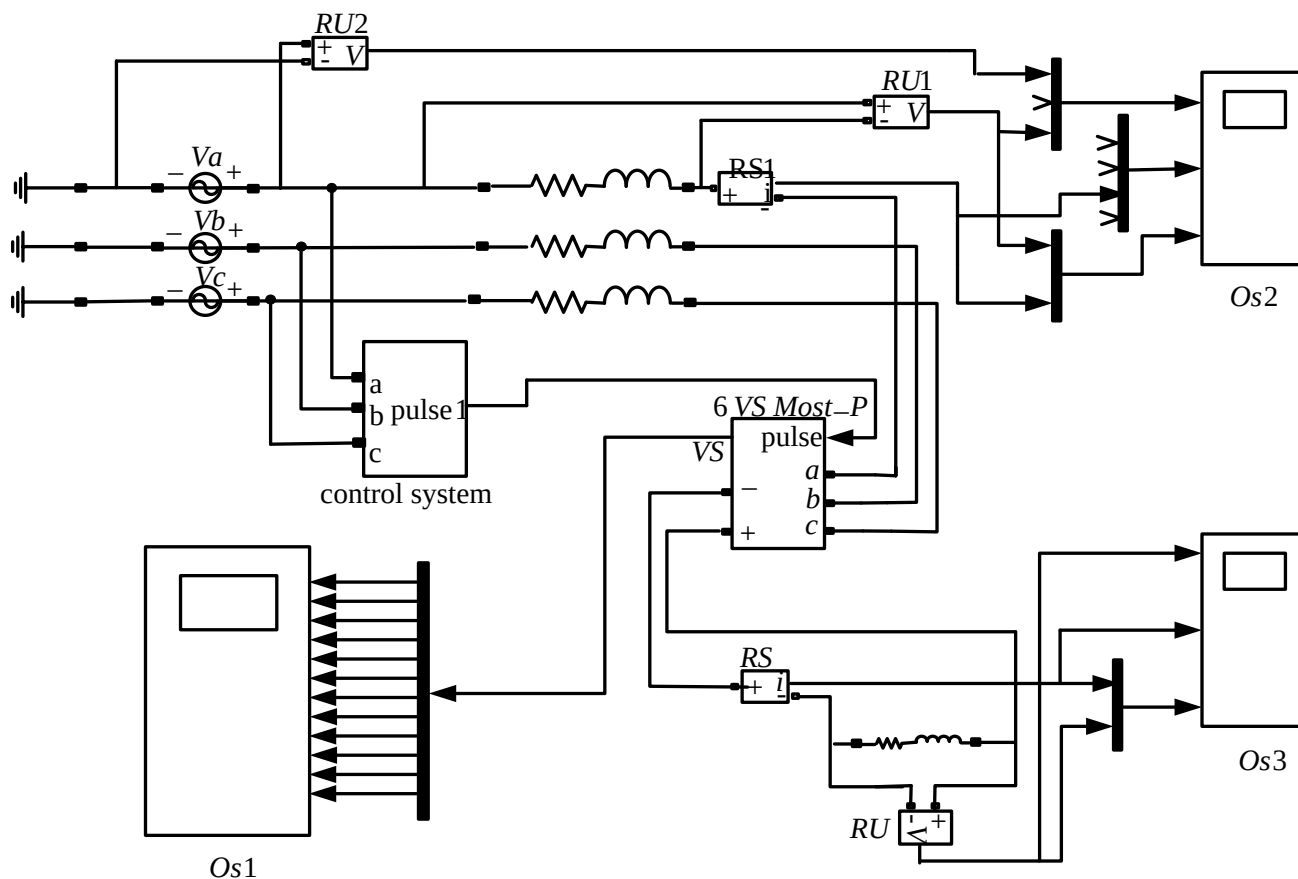


Рис. 4. Обобщенная блочно-модульная математическая модель мостового преобразователя в среде MatLab

ИССЛЕДОВАНИЕ НА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ В СРЕДЕ MATLAB ТРЕХФАЗНЫХ УСТРОЙСТВ

На **рис. 7** представлена схема модели трехфазного мостового регулятора переменного напряжения в среде MatLab. Она получена из обобщенной схемы (см. **рис. 3**) путем отключения нагрузки постоянного тока и шунтированием выходных зажимов постоянного тока 4 и 5 трехфазного моста. Это электронное устройство находит применение для промышленных симметричных нагрузок.

Результаты моделирования трехфазного регулятора переменного напряжения представлены осциллограммами на **рис. 8**.

На **рис. 8** введены следующие обозначения: U_H – мгновенное значение напряжения; i_{ca} , i_{cb} , i_{cc} – мгновенное значение трехфазного переменного тока сети; i_d – выпрямленный ток между тиристорными нагрузками.

Выполним численные эксперименты для регулятора переменного напряжения с естественной коммутацией ТРН-Е при работе на симметричную RL нагрузку с преобладающей индуктивностью ($85^\circ < \varphi < 90^\circ$) для различных углов α . Такой режим ТРН-Е наблюдается в статических компенсаторах реактивной мощности СТК с регулируемым реактором (режим регулятора индуктивной составляющей тока).

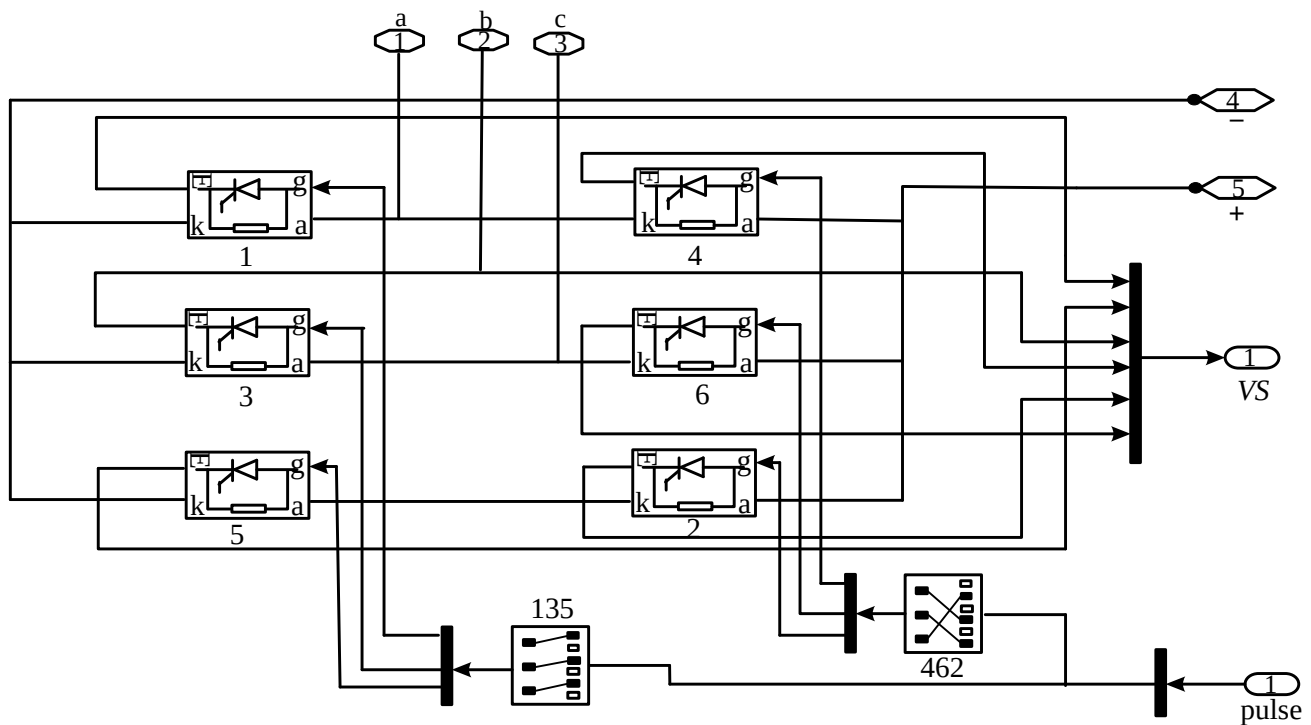


Рис. 5. Схема модуля тиристорного моста

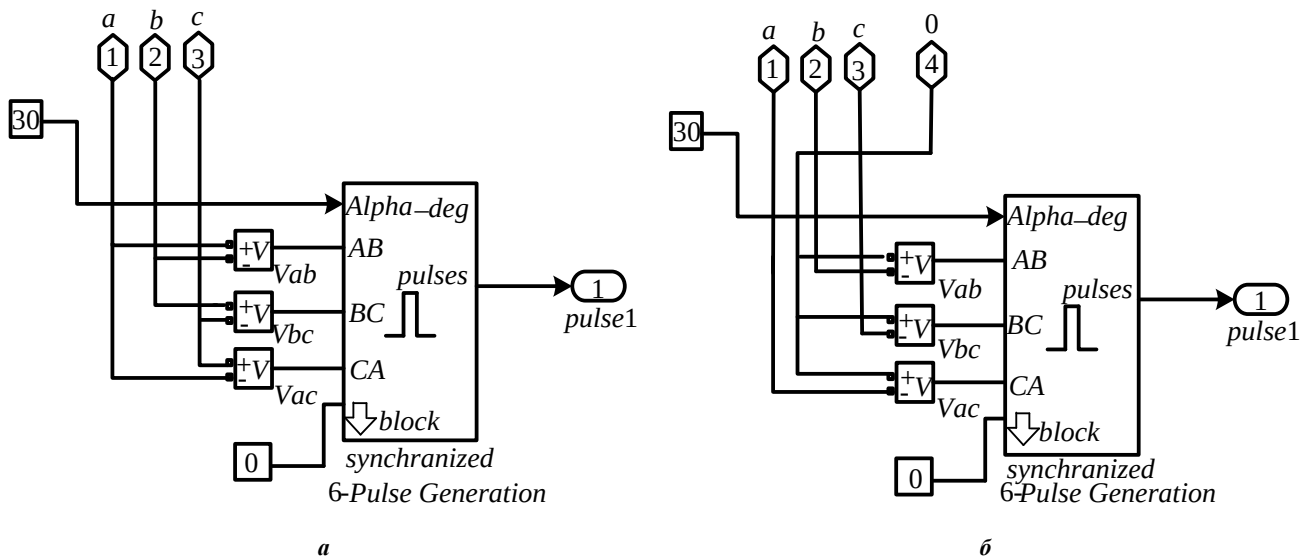


Рис. 6. Схема модуля системы управления для выпрямителя (а) и регулятора (б)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Целью экспериментальных исследований являлось следующее:

- 1) Проверка функционирования на одном блоке как всех элементов в отдельности, так и в целом устройств выпрямителя и регулятора переменного напряжения.
- 2) Осциллографирование напряжений и токов на нагрузке для этих преобразователей.

На рис. 9 представлены осциллограммы МТВ и ТРН, снятые на общей для этих преобразователей экспериментальной установке, выполненной с возможностью перераспределения сопротивлений в цепях постоянного и переменного тока. Здесь же (см. рис. 9) представлены осциллограммы МТВ и ТРН, снятые на обобщенной математической модели в среде MatLab.

В результате математического моделирования и экспериментальных исследований было установлено, что одно и то же изделие может работать и как регулятор переменного напряжения, и как выпрямитель при любом характере нагрузок в цепях переменного и (или) постоянного тока.

На рис. 10 представлен сравнительный анализ значений напряжения и тока одной фазы регулятора, полученных разными способами при работе ТРН на RL нагрузку с $\alpha = 60^\circ$. Здесь расчётные и экспериментальные кривые (рис. 10, а-б) приведены из сравнительного анализа в гл. 2.2 книги [6], а на рис. 10, в – получение на разработанной авторами модели.

При сравнении видно их хорошее совпадение. Таким образом, обобщенная математическая модель позволяет достоверно производить расчёт электромаг-

нитных процессов для преобразователей в переходных и стационарных режимах при любом характере нагрузки с выявлением любой электрической величины и характеристик устройств.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Осциллограммы, полученные при математическом и физическом моделировании, адекватно отображают физические процессы в выпрямителях и регуляторах переменного напряжения.

Экспериментальная апробация показала работоспособность трёхфазного регулятора переменного напряжения, выполненного на основе серийно выпускаемого трёхфазного мостового выпрямителя. Выпуск регуляторов и выпрямителей можно производить с общей комплектацией на одном предприятии.

Обобщенная блочно-модульная модель предназначена для исследования не только трехфазных мостовых преобразователей, но и других устройств силовой электроники. На ее основе весьма просто выполняется построение моделей нулевых трехфазных и мостовых однофазных преобразователей.

Предложенный обобщенный подход к аналитическому описанию и исследованию процессов, их математическому моделированию, предопределяет унифицированный подход к производству широкого класса

преобразователей и существенно снижает трудоемкость при выполнении НИР и ОКР, проведении испытаний, составлении и ведении КД и серийного производства в целом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Забродин Ю. С. Промышленная электроника. М.: Высш.шк., 1982. 496 с.
2. Шубенко В.А., Шубенко В.А., Браславский И.Я. Тиристорный асинхронный электропривод с фазовым управлением. М.: Энергия, 1972. 200 с.
3. Энергетическая электроника: справ, пособие / пер. с нем.; под ред. В. А. Лабунцова. М.: Энергоатомиздат, 1978. 464 с.
4. Чиженко И.М. Руденко В.С., Сенько В.И. Основы преобразовательной техники: учебник для вузов. 2-е изд. М.: Высш. шк., 1980. 424 с.
5. Климах В.С. Основы преобразовательной техники: учеб. пособие. Комсомольск-на-Амуре: ГОУ ВПО «Комсомольский-на-Амуре гос. техн. ун-т», 2010. 100 с.
6. Такеути Т. Теория и применение вентильных цепей для регулирования двигателей: пер. с англ. Л.: Энергия, 1973. 248 с.
7. Свидетельство РФ NO2016617861 о регистрации программа для ЭВМ «Программа обобщенной математической модели в среде MatLab тиристорных преобразователей, ведомых сетью, для исследования физических процессов». Климах В.С. (RU), Йе Мин Тху (RU). Бюл. №8, 20.08.2016.

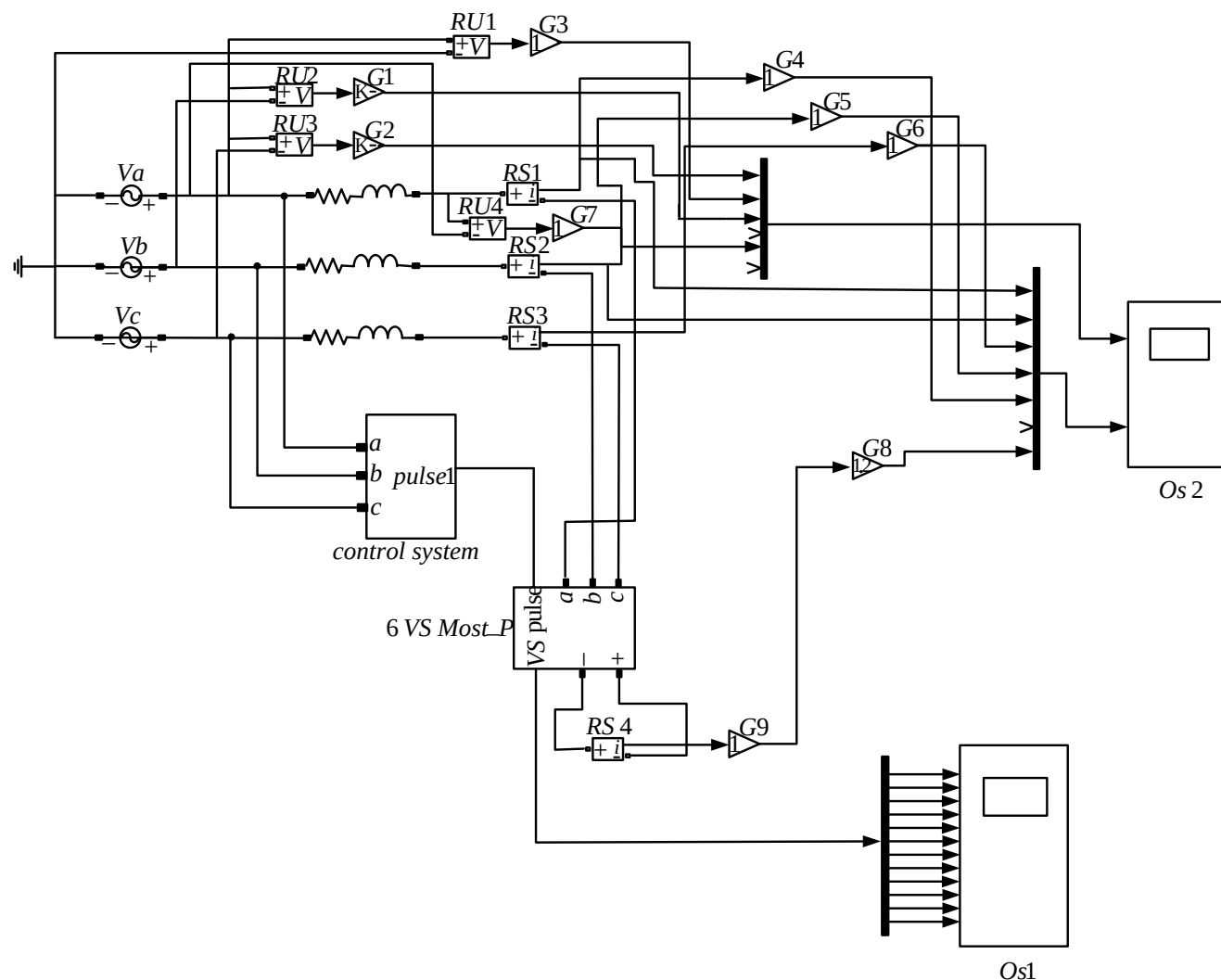
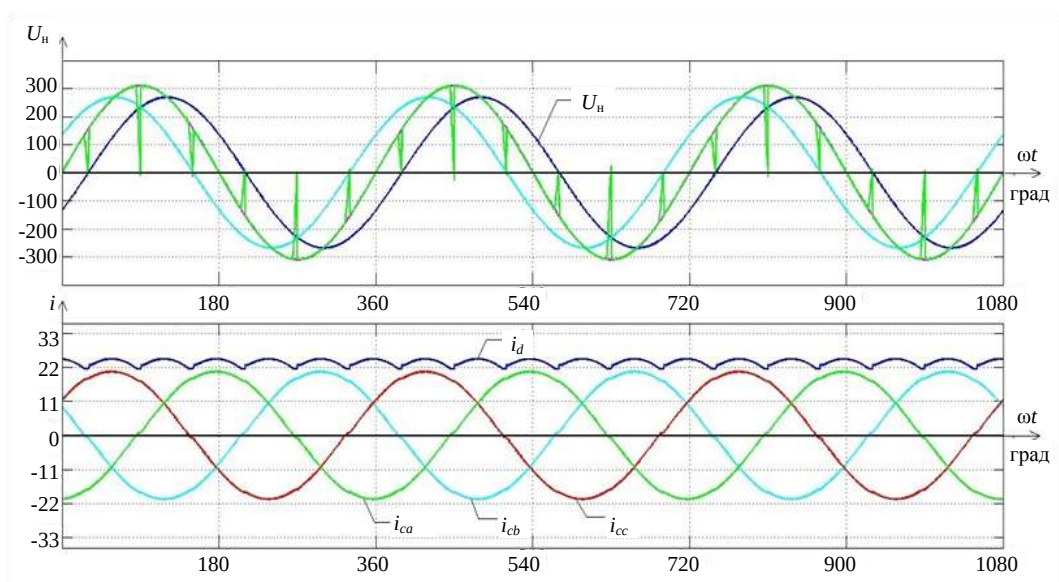
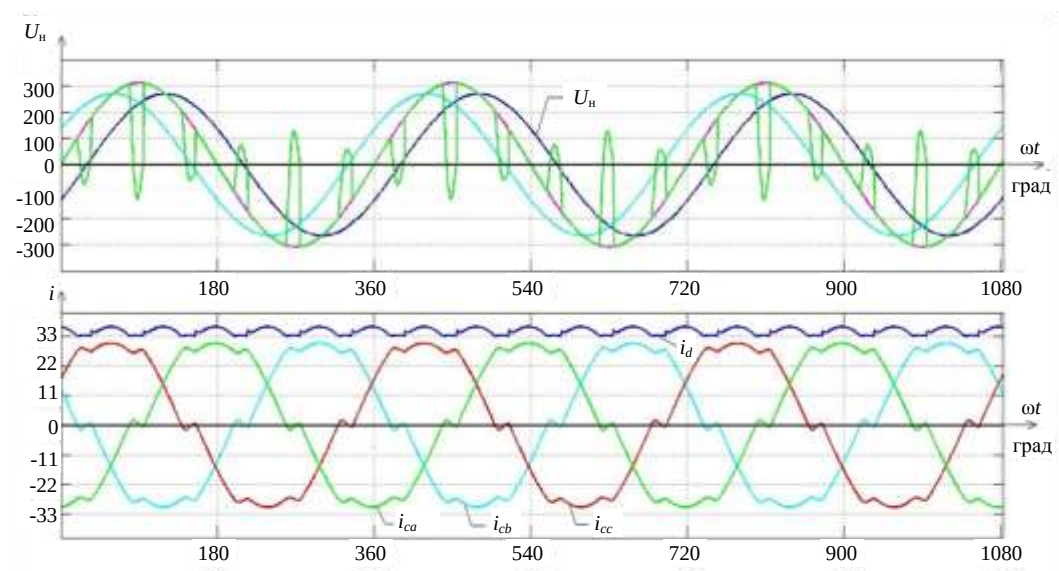


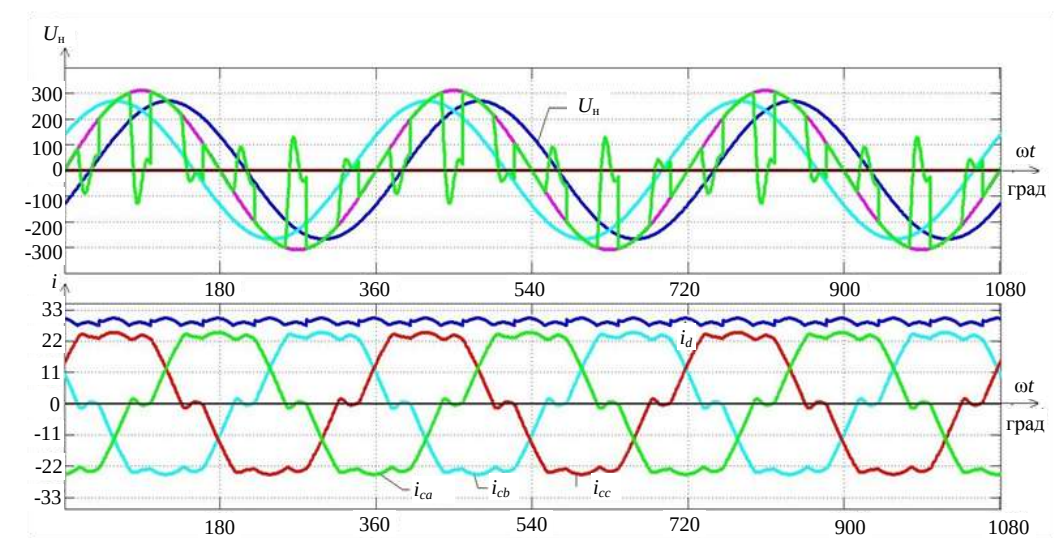
Рис. 7. Модель трехфазного регулятора переменного напряжения



а



б



в

 Рис. 8. Результаты численных экспериментов при $\alpha = 90^\circ$ (а), 95° (б), 100° (в) и RL нагрузке

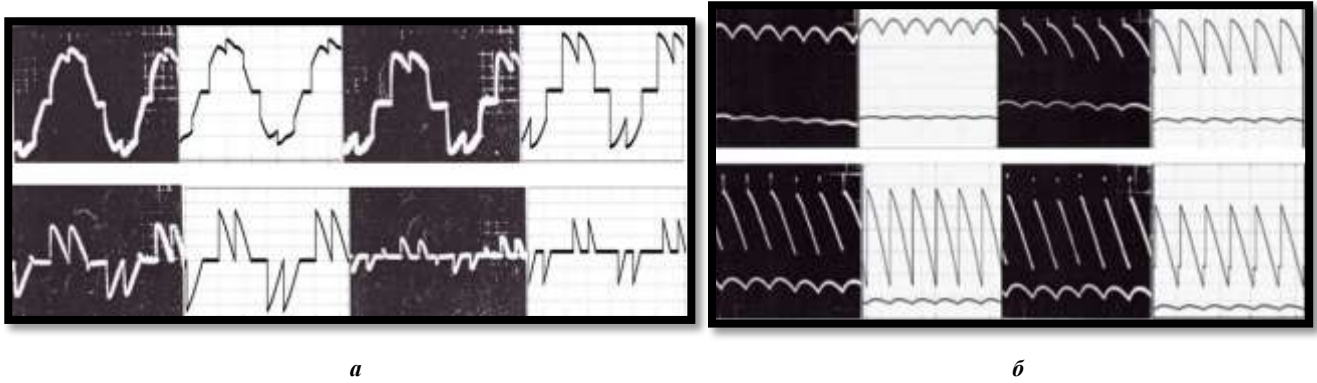


Рис. 9. Осциллограммы экспериментальной установки и обобщенной математической модели для регулятора переменного напряжения (а) и выпрямителя (б)

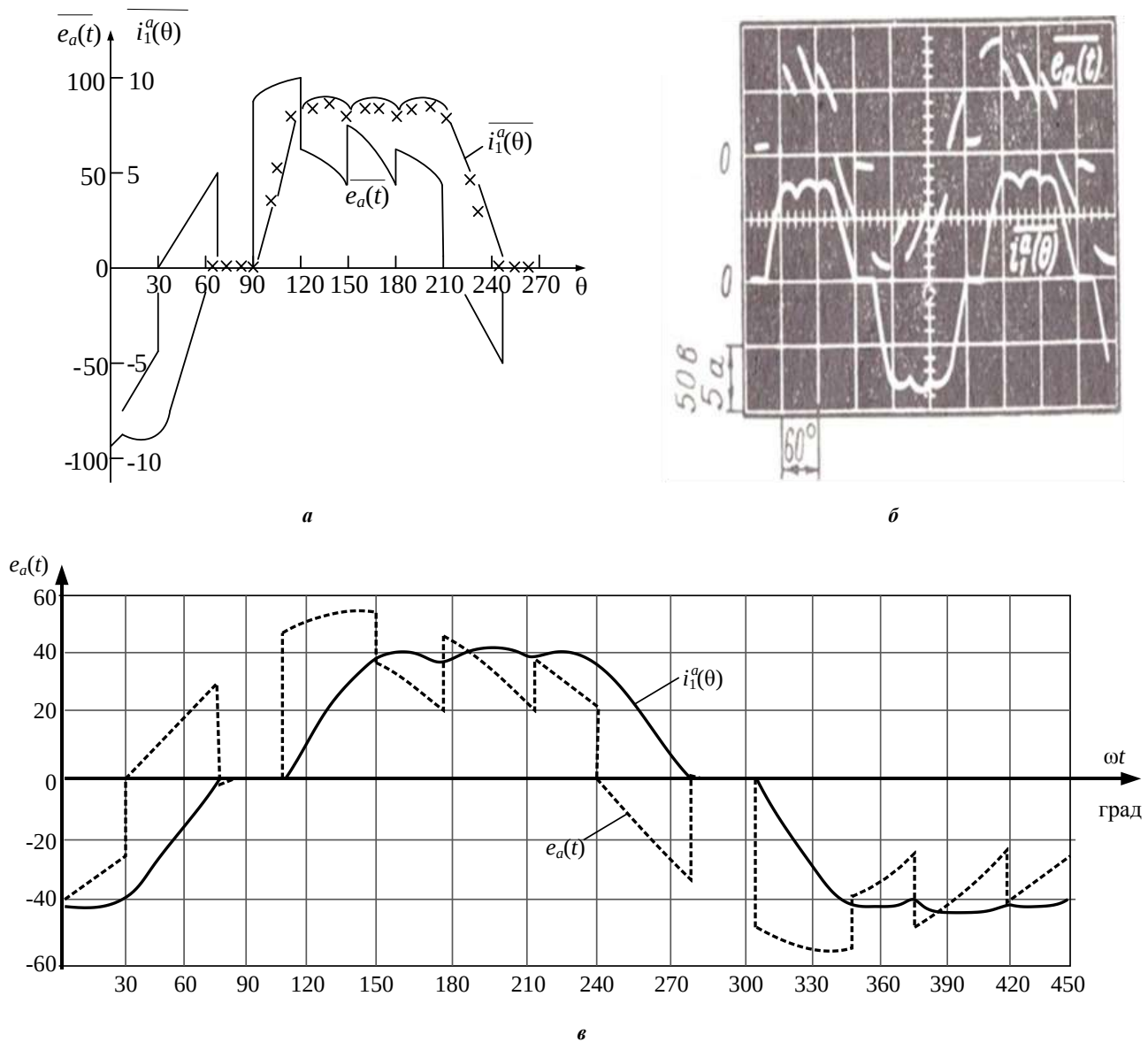


Рис. 10. Напряжения и токи, полученные по аналитическим выражениям (а), экспериментальным путем (б) и на обобщенной модели в среде MatLab (в)

INFORMATION IN ENGLISH

GENERIC MATHEMATICAL DESCRIPTION AND MODELING OF THYRISTOR CONVERTERS CONTROLLED BY POWER LINE

Vladimir S. Klimash

D.Sc. (Eng.), Professor, Department of Industrial Electronics, Komsomolsk-on-Amur State Technical University, Komsomolsk-on-Amur, Russia. E-mail: klimash@yandex.ru

Ye Min Thu

A post-graduate student, Department of Applied Mathematics and Computer Science, Komsomolsk-on-Amur State Technical University, Komsomolsk-on-Amur, Russia. E-mail: mryeminthu08@gmail.com

The paper explains the similarity in the mathematical structure of three-phase thyristor variable voltage regulators and bridge-circuit rectifiers. Thus a generic mathematical model in Matlab environment was suggested; the model makes it possible to study these converters. As a result of this research work, a mathematical model was used to develop the design principles and an experimental installation was assembled, which can be used both as a rectifier and a variable voltage regulator.

Keywords: Direct current, alternating current, rectifier, variable voltage regulator generic mathematical model.

REFERENCES

1. Zabrodin Yu.S. *Promyshlennaya elektronika* [Industrial Electronics]. Moscow, High school Publ., 1982. 496 p.
 2. Shubenko V.A., Braslavskiy I.Ya. *Tiristornyy asinkhronnyy elektroprivod s fazovym upravleniem* [Thyristor Asynchronous Drive with Phase Control]. Moscow, Energy Publ., 1972. 200 p.
 3. Labuntsov V.A. *Energeticheskaya elektronika* [Power electronics]. A reference book. Translated from German. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1978. 464 p.
 4. Chizhenko I.M., Rudenko V.S., Sen'ko V.I. *Osnovy preobrazovatel'noy tekhniki* [Fundamentals of Converting Equipment]. 2nd edition. Moscow, High school Publ., 1980. 424 p.
 5. Klimash V.S. *Osnovy preobrazovatel'noy tekhniki* [Fundamentals of Converting Equipment]. Komsomolsk-on-Amur: Komsomolsk-on-Amur State Technical University Publ., 2010. 100 p.
 6. Takeuti T. *Teoriya i primeneniye ventilnykh tsepey dlya regulirovaniya dvigateley* [Theory and Application of Valve Circuits to Control Motors]. Translated from English. Leningrad, «Energy», 1973. – 248 p.
 7. Klimash V.S., Ye Min Thu Certificate RF NO2016617861 of software registration for computers "Software of generic mathematical model in MatLab environment for thyristor converters controlled by power line for investigation of physical processes". Bulletin no.8, 20.08.2016.
-
- Климаш В.С., Йе Мин Тху Обобщенное математическое описание и моделирование тиристорных преобразователей, ведомых сетью // Электротехнические системы и комплексы. 2016. №4(33). С.78-86. doi: 10.18503/2311-8318-2016-4(33)-78-86
- Klimash V.S., Ye Min Tkhu Generic Mathematical Description and Modeling of Thyristor Converters Controlled by Power Line. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2016, no.4(33), pp. 78-76. (In Russian). doi: 10.18503/2311-8318-2016-4(33)-78-86

Абдулвелеев Ильдар Равильевич – аспирант, каф. электроснабжения промышленных предприятий, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия.

Агапитов Евгений Борисович – д-р техн. наук, проф., зав. каф., каф. теплотехнических и энергетических систем, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия.

Альбрехт Александр Яковлевич – начальник отделения релейной защиты, центральная электротехническая лаборатория, ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат», г. Магнитогорск, Россия.

Анохин Василий Васильевич – магистрант, каф. электроснабжения промышленных предприятий, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: anohinvasilii@mail.ru.

Баранкова Инна Ильинична – д-р техн. наук, доц., зав. кафедрой, каф. информатики и информационной безопасности, Магнитогорск, Россия.

Бунин Александр Андреевич – электромонтер по ремонту электрооборудования, ООО «ОСК» Стальсервис-1, г. Магнитогорск, Россия.

Варганов Дмитрий Евгеньевич – инженер-проектировщик, ООО «ЮГРАЭНЕРГО», г. Магнитогорск, Россия.

Варганова Александра Владимировна – ст. преподаватель, каф. электроснабжения промышленных предприятий, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия.

Газизова Ольга Викторовна – канд. техн. наук, доц., доц. каф. электроснабжения промышленных предприятий, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия.

Йе Мин Тху – аспирант, каф. прикладной математики и информатики, ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет», г. Комсомольск-на-Амуре, Россия. E-mail: mryeminthu08@gmail.com.

Климаш Владимир Степанович – д-р техн. наук, проф., проф. каф. промышленной электроники, ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет», г. Комсомольск-на-Амуре, Россия. E-mail: klimash@yandex.ru.

Корнилов Геннадий Петрович – д-р техн. наук, проф., зав. каф. электроснабжения промышленных предприятий, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия.

Кузнецов Сергей Викторович – магистрант, каф. энергетики, НЧОУ ВО «Технический университет УГМК», г. Верхняя Пышма, Россия. E-mail: kordinator30@yandex.ru.

Ляпин Роман Николаевич – магистрант, каф. энергетики, НЧОУ ВО «Технический университет УГМК», г. Верхняя Пышма, Россия. E-mail: lyapinrn@sib-pm.ru.

Малафеев Алексей Вячеславович – канд. техн. наук, доц., доц. каф. электроснабжения промышленных предприятий, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия.

Михайловский Владимир Николаевич – канд. техн. наук, доц. каф. теплотехнических и энергетических систем ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия.

Мугалимов Риф Гарифович – д-р техн. наук, доц., директор, ООО «МГТУ-Энергосбережение+», г. Магнитогорск, Россия.

Мугалимова Алия Рифовна – магистрант, канд. техн. наук, каф. автоматизированного электропривода и мехатроники, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия.

Никифоров Геннадий Васильевич – д-р техн. наук, председатель совета директоров ООО «Магнитогорскгазстрой», г. Магнитогорск, Россия.

Николаев Александр Аркадьевич – канд. техн. наук, доц., зав. каф. автоматизированного электропривода и мехатроники, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: alexniko@inbox.ru.

Осколков Сергей Васильевич – ст. преподаватель, каф. теплотехнических и энергетических систем, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия.

Панова Евгения Александровна – канд. техн. наук, доц. каф. электроснабжения промышленных предприятий, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: panova.ea@mail.ru.

Рудаков Никита Алексеевич – инженер-метролог, ООО «НПК», г. Магнитогорск, Россия.

Семенов Евгений Алексеевич – начальник паросилового цеха, ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат», г. Магнитогорск, Россия.

Тарасов Владимир Маркелович – канд. техн. наук, старший мастер, электротехнический участок, паровоздуховная электростанция, ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат», г. Магнитогорск, Россия.

Тремасов Максим Александрович – инженер, электротехнический отдел, ОАО «Магнитогорский ГИПРОМЕЗ», г. Магнитогорск, Россия.

Тулупов Платон Гарриевич – магистрант, каф. автоматизированного электропривода и мехатроники, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: tulupov.pg@mail.ru.

Устимов Константин Владимирович – аспирант, каф. теплотехнических и энергетических систем, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: ustimov.k.v@yandex.ru.

Фёдорова Светлана Владимировна – канд. техн. наук, доц., каф. энергетики, НЧОУ ВО «Технический университет УГМК», г. Верхняя Пышма, Россия. E-mail: s.fedorova@ugmk.com.

Храмшин Тимур Рифхатович – канд. техн. наук, доц., каф. электроснабжения промышленных предприятий, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия.

Шеметов Андрей Николаевич – канд. техн. наук, доц., доц. каф. электроснабжения промышленных предприятий, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: Shemetow-a-n@yandex.ru

Шошин Максим Андреевич – инженер-метролог, ООО «НПК», г. Магнитогорск, Россия.

Ягольников Евгений Борисовна – ст. преподаватель, каф. электроснабжения промышленных предприятий, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: yagolnikovaevgenia@inbox.ru.

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 02.02.2016 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 группам научных специальностей 05.09.00 – электротехника, 05.13.00 – информатика, вычислительная техника и управление, 05.14.00 – энергетика.

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;
- 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:

- рукопись статьи;
- информация об авторах;
- экспертное заключение о возможности опубликования;
- лицензионный договор, заполненный на каждого автора в двух экземплярах (отсканированная копия отправляется в формате pdf, оригиналы – по почте вместе с остальными документами).

С уважением,

редакция журнала «Электротехнические системы и комплексы»

E-mail: ecis.red@gmail.com