

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

ИЗДАЕТСЯ С ЯНВАРЯ 1996 Г.

№3(32), СЕНТЯБРЬ 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, НТУ «ХПИ», г. Харьков, Украина;

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

К.Т. Тергемес – проф., канд. техн. наук, г. Актау, Казахстан.

Dr. Boris Levin – School of Computer Science, The Academic College of Tel-Aviv-Yaffo, Jaffa, Израиль.

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

А.Е. Козярук – проф., д-р техн. наук, НМСУ Горный, 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 – проф., 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 – доц., 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.

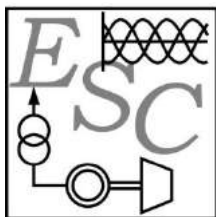
Адрес редакции:

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 25.09.2016. Заказ ... Тираж 500 экз. Цена свободная.



ELECTROTECHNICAL SYSTEMS AND COMPLEXES

PUBLISHED SINCE JAN., 1996

NO.3(32) SEP., 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.), NTU
«KhPI», Kharkov, Ukraine;

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

K.T. Tergemes – Professor, Ph.D. (Eng.), Aktau,
Kazakhstan.

Dr. Boris Levin – School of Computer Science,
The Academic College of Tel-Aviv-Yaffo, Jaffa,
Israel.

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

A.E. Kozyaruk – Professor, D.Sc. (Eng.), NMRU
(University of Mines), 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 – 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, Rus-
sia

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: 25.09.2016. Order. Circulation: 500.

Open price.

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА	4
<i>Закарюкин В.П., Крюков А.В., Арсентьев Г.О.</i> Моделирование асинхронных генераторов в фазных координатах	4
<i>Падалко Д.А.</i> Явление параметрического резонанса в асинхронных генераторах	10
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА	15
<i>Алексеева И.Ю.</i> Повышение надежности электроэнергетических систем на основе нейронных технологий	15
<i>Черепанов В.В., Калинина Е.А.</i> Расчет колебаний напряжения электрической сети при работе асинхронных двигателей с резкопеременной нагрузкой	20
<i>Газизова О.В., Кондрашова Ю.Н., Малафеев А.В.</i> Повышение эффективности управления режимами электростанций промышленного энергоузла за счет прогнозирования статической и динамической устойчивости при изменении конфигурации сети	27
МОНИТОРИНГ, КОНТРОЛЬ И ДИАГНОСТИКА ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ	39
<i>Стеклов А.С.</i> Нейронечеткое моделирование степени работоспособности трансформаторов судовых электроэнергетических установок	39
<i>Бочкарев И.В.</i> Разработка устройства диагностики фрикционных электромеханических устройств	44
ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ	48
<i>Агапитов Е.Б., Михайловский В.Н., Даутов Р.Н., Каблукова М.С., Агапитов А.Е.</i> Повышение эффективности работы паровоздуховой электростанции металлургического предприятия при решении многоцелевых задач	48
<i>Грунтович Н.В., Капанский А.А., Федоров О.В.</i> Исследование влияния факторов на формирование удельных и общих расходов электрической энергии в технологической системе водоснабжения	54
ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА, АВТОМАТИКА И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ	60
<i>Андреев С.М., Ахметов Т.У., Нужин Д.В., Парсункин Б.Н.</i> Автоматизированная система управления топливосберегающим несимметричным нагревом непрерывнолитых заготовок перед прокаткой	60
КРАТКОЕ СООБЩЕНИЕ	66
<i>Аркулис М.Б., Велюс Л.М., Савченко Ю.И.</i> К вопросу управления процессом кристаллизации чугуна импульсным магнитным полем	66
СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ	69

CONTENT

THEORY AND PRACTICE OF AUTOMATED ELECTRIC DRIVE	4
<i>Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Arsent'ev G.O.</i> Modelling of Asynchronous Generators in Phase Coordinates	4
<i>Padalko D.A.</i> Phenomenon of Parametric Resonance in Induction Generators	10
ELECTRIC POWER SUPPLY	15
<i>Alekseeva I.Yu.</i> Improving The Reliability of Electric Energy Systems on The Basis of Neural Technologies	15
<i>Cherepanov V.V., Kalinina E.A.</i> Calculation of Mains Voltage Fluctuations during Operation of Asynchronous Motors with Variable Load	20
<i>Gazizova O.V., Kondrashova Yu.N., Malafeev A.V.</i> Increase of Effective Management of Modes of Electric Power Plants Due to Forecasting of Static and Dynamic Stability at Change of Network Configuration	27
MONITORING, DIAGNOSTICS AND CONTROL OF ELECTRIC EQUIPMENT	39
<i>Steklov A.S.</i> Neuro-fuzzy Modeling of the Degree of Efficiency of Transformers at Ship Electric Power Plants	39
<i>Bochkarev I.V.</i> Development of Diagnostic Devices for Friction Electromechanical Devices	44
ENERGY- AND RESOURCES-ECONOMY	48
<i>Agapitov E.B., Mikhaylovskiy V.N., Dautov R.N., Kablukova M.S., Agapitov A.E.</i> Improving the Efficiency of TBS Power Plant of Metallurgical Enterprise in Solving Multi-objective Problems	48
<i>Gruntovich N.V., Kapanskiy A.A., Fedorov O.V.</i> Study of Influence of Factors on Formation of Specific and General Consumption of Electrical Energy in Technology Water System	54
POWER ELECTRONICS, AUTOMATION AND CONTROL SYSTEMS	60
<i>Andreev S.M., Akhmetov T.U., Nuzhin D.V., Parsunkin B.N.</i> Automated Control System of Fuel Saving in Asymmetric Heating of Continuous Cast Billets Before Rolling	60
BRIEF COMMUNICATION	66
<i>Arkulis M.B., Velyus L.M., Savchenko Yu.I.</i> The Issue of Control of the Process of Iron Crystallization by Pulsed Magnetic Field	66
INFORMATION ABOUT THE AUTHORS	69

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

УДК 621.311 + 621.331

DOI: 10.18503/2311-8318-2016-3(32)-4-9

Закарюкин В.П., Крюков А.В., Арсентьев Г.О.

ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет сообщения»

МОДЕЛИРОВАНИЕ АСИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ В ФАЗНЫХ КООРДИНАТАХ

Предложена модель асинхронного генератора в фазных координатах. Рассмотрены вопросы применения установок распределенной генерации, реализованных на основе асинхронных генераторов, в системах электроснабжения магистральных железных дорог переменного тока. На основе компьютерного моделирования показано, что, кроме снижения затрат на энергообеспечение и повышение надежности электроснабжения на основе установок распределенной генерации с асинхронными генераторами, можно получить ряд дополнительных положительных эффектов, заключающихся в повышении энергоэффективности и улучшении качества электроэнергии.

Ключевые слова: системы электроснабжения железных дорог, нетрадиционные возобновляемые источники энергии, асинхронные генераторы, моделирование.

ВВЕДЕНИЕ

Современные технологии позволяют потребителям электроэнергии (ЭЭ) использовать собственные генерирующие установки, которые могут конкурировать с централизованным производством электроэнергии [1-3]. Такие установки, объединенные в микроэнергосистемы, являются основой активно внедряемых в настоящее время технологий распределенной генерации (РГ) [3-6]. С помощью РГ могут эффективно решаться экологические проблемы за счет использования нетрадиционных возобновляемых источников энергии (НВИЭ).

Вопросы внедрения технологий РГ на железнодорожном транспорте нашли отражение в нормативных документах, определяющих перспективы развития отрасли, например, в энергетической стратегии холдинга «Российские железные дороги» на перспективу до 2030 года. В ней, в частности, отмечается, что активное развитие собственной генерации энергии для обеспечения нетяговых потребителей является приоритетным направлением повышения энергоэффективности. Для внедрения технологий РГ в системы электроснабжения железных дорог (СЭЖД) необходима разработка методов и средств моделирования СЭЖД, оснащенных установками РГ. Такие модели могут быть созданы на базе методов моделирования режимов электроэнергетических систем (ЭЭС) в фазных координатах, предложенных в ИргУПС [7, 8].

Ниже приведены результаты исследований, направленных на разработку методов моделирования СЭЖД с установками РГ, реализованными на основе асинхронных генераторов (АСГ). Для привода АСГ могут использоваться паровые и газовые турбины, а также ветрогенераторы [5, 6]. Проведенный в работе [9] анализ позволил сделать вывод о том, что из всего многообразия НВИЭ для СЭЖД наиболее приемлемыми являются ветрогенераторы и ветропарки с установленной мощностью в несколько МВт. Энергия ветра характеризуется высоким потенциалом и является более привлекательной по экономическим соображениям, чем другие виды НВИЭ.

МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ АСИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

Модель асинхронного генератора может быть получена на базе модели асинхронного электродвигателя (АЭД), предложенной в работе [7]. Развитие методики моделирования АЭД дано в работе [8]. По сравнению со статическими элементами, такими как ЛЭП и трансформаторы, АЭД представляет более сложный объект. Матрица сопротивлений двигателя является несимметричной, что затрудняет ее использование при моделировании в фазных координатах на основе решетчатых схем замещения. Также возникают затруднения из-за наличия двух магнитных полей, которые вращаются в прямом и обратном направлениях. В несимметричных режимах в АЭД протекают процессы на трех частотах: $f_1 = 50$ Гц, $f_2 = sf_1$ и $f_3 \approx 100$ Гц.

В хорошо изученных симметричных режимах АЭД можно представить однолинейной схемой замещения. Для анализа несимметричных режимов необходимо учитывать параметры двигателя как при малых скольжениях s , так и при $s \approx 2$; при этом целесообразно использовать следующие положения:

- применяется вариант схемы замещения с ветвью намагничивания, вынесенной на первичные зажимы (рис. 1, а); при пуске и скольжении $2-s$, которое отвечает напряжению обратной последовательности, используются другие параметры цепи ротора (рис. 1, б);
- для режимов со скольжением $s \approx 2$ реактивные сопротивления значительно превышают активные;
- определение параметров схем, представленных на рис. 1, осуществляется на основе номинальных значений коэффициента полезного действия η , тока I_n , скольжения s_n и коэффициента мощности $\cos \varphi_n$;
- по величинам напряжений прямой и обратной последовательностей $\dot{U}_1, \dot{U}_2$ и заданной механической мощности АЭД определяются соответствующие токи; при этом АЭД моделируется тремя источниками тока (рис. 1, в), значения параметров которых корректируются на каждой итерации.

На рис. 1 обозначено: R_μ, X_μ – сопротивления ветви намагничивания; R_1, X_1 – сопротивления статора; $R_2/s, X_2$ – сопротивления ротора при скольжениях, близких к

номинальному; $R_{2P}/(2-s)$, X_{2P} – сопротивления ротора в режиме пуска; s – скольжение, положительное при работе машины в режиме двигателя и отрицательное при работе в режиме генератора.

В работе [8] показана адекватность представленной модели АЭД. Ниже приведены результаты исследований, направленных на выявление возможности ее применения для моделирования асинхронных генераторов (АСГ).

РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИТИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ И МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для подтверждения применимости модели АСГ, представленной на **рис. 1, а**, проведены сопоставительные расчеты режима простой схемы, показанной на **рис. 2**. Схема включает источник питания (шины 0,4 кВ подстанции потребителя), низковольтную линию электропередачи и АСГ, параметры которого приведены в **табл. 1 и 2**. Расчеты симметричных режимов работы АСГ проводились на основе схемы замещения, показанной на **рис. 3**.

Для расчетов использовались следующие соотношения:

$$\underline{Z}_{ASG} = \frac{\underline{Z}_\mu (\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2)}{\underline{Z}_\mu + \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2}, \quad \underline{Z}_S = \underline{Z}_L + \underline{Z}_{ASG}, \quad \dot{I} = \frac{U_F}{\underline{Z}_S},$$

$$\dot{U}_{ASG} = U_F - \dot{I} \underline{Z}_S, \quad \dot{S} = 3 \dot{U}_{ASG} \tilde{I},$$

$$P = \operatorname{Re} \dot{S}, \quad Q = \operatorname{Im} \dot{S},$$

где $\dot{S}$, P , Q – полная, активная и реактивная мощности АСГ, $X_k = X_1 + X_2$.

Моделирование на основе модели, представленной на **рис. 1, а**, проводилось с помощью комплекса программ Fazonord [7] по расчетной схеме, показанной на **рис. 2, б**. Результаты расчетов и моделирования сведены в **табл. 3, 4** и проиллюстрированы на **рис. 4**.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о хорошем совпадении аналитических расчетов с результатами моделирования в ПК Fazonord; максимальные различия не превышают: по мощностям – 2,5 %, по напряжениям – долей процента; по токам – 1,5 %.

ПРИМЕНЕНИЕ АСГ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Эффекты применения АСГ исследовались путем имитационного моделирования работы СЭЖД, схема которой показана на **рис. 5**. Параметры асинхронной машины приведены в **табл. 5, 6**. Перевод машины в режим генератора осуществлялся заданием скорости вращения 3010 об/мин, которая превышала синхронную, равную 3000 об/мин. Асинхронная машина, работающая в режиме генератора, потребляет реактивную мощность. Обеспечение АСГ реактивной мощностью осуществлялось источниками реактивной мощности (ИРМ), подключенными на зажимы АСГ. В качестве ИРМ можно использовать батареи статических конденсаторов, представленные при моделировании емкостными сопротивлениями.

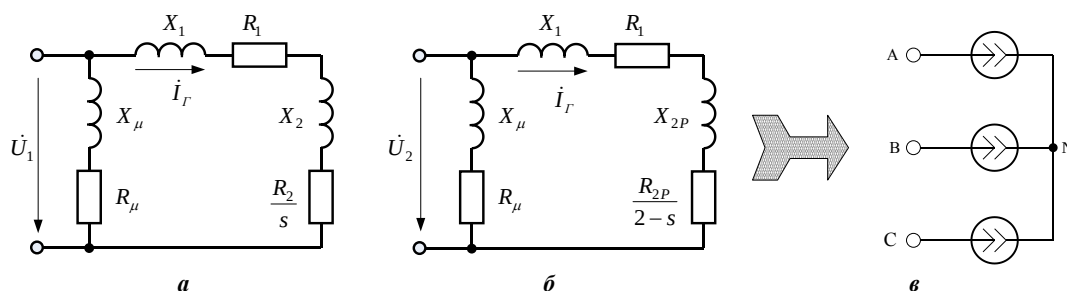


Рис. 1. Схемы замещения прямой (а), обратной (б) последовательностей и схема модели АЭД в фазных координатах (в)

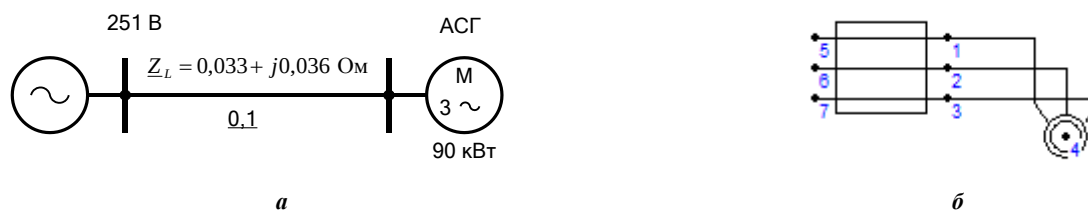


Рис. 2. Схемы подключения АСГ: а – исходная; б – расчетная схема, реализованная в программном комплексе Fazonord

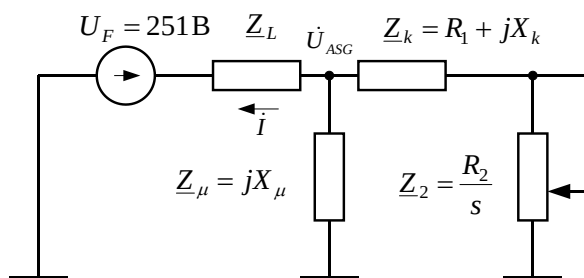


Рис. 3. Схема замещения для аналитических расчетов

Модели СЭЖД включали в свой состав системы внешнего и тягового электроснабжения. Питающая ЭЭС представлена балансирующими узлами с напряжением 230 кВ. Также в состав модели были включены ЛЭП 220 кВ, выполненные проводом АС-240, тяговые подстанции (ТП) с трансформаторами мощностью 40000 кВ·А и две межподстанционных зоны двухпутного участка протяженностями по 50 км с контактной подвеской ПБСМ95+МФ100. Имитационное моделирование проведено с помощью программного комплекса Fazonord [7]. Результаты моделирования сведены в табл. 7, 8 и проиллюстрированы на рис. 6, 7.

Полученные результаты показывают следующее:

1. Включение АСГ позволяет снизить потоки активной и реактивной мощности в питающей сети и существенно уменьшить потери (см. рис. 5, табл. 7). В расчетном примере средняя величина потерь в питающей ЛЭП 1 снижается при включении АСГ в два раза.

2. Применение АСГ позволяет заметно уменьшить активную мощность, потребляемую от ЭЭС (см. табл. 7). Использование АСГ в комплексе с ИРМ дает возможность стабилизировать напряжение в тяговой сети и районах электроснабжения нетяговых потребителей.

Таблица 1

Паспортные параметры АСГ

$U_{ном}$, В	$P_{ном}$, кВт	n_c , об/мин	КПД, %	$\cos\varphi$	k_m	k_{mp}	k_p
380	90	1500	93	0,91	2,8	1,2	7,2

Примечание. $U_{ном}$ – номинальное напряжение (линейное); $P_{ном}$ – номинальная мощность на валу; n_c – синхронная скорость вращения; k_m – кратность максимального момента; k_{mp} – кратность пускового момента; k_p – кратность пускового тока.

Таблица 2

Параметры схем замещения АСГ

Единица измерения	X_μ	R_1	R_2	X_k	R_{2p}	X_{kp}
Ом	6,67	0,06	0,02	0,33	0,03	0,21
Относительные единицы	4,91	0,04	0,01	0,24	0,02	0,15

Примечание. $X_k = X_1 + X_2$; $X_k = X_1 + X_2$; $X_{kp} = X_1 + X_{2p}$.

Таблица 3

Мощности, генерируемые АСГ

n , об/мин	s	Активная мощность, кВт			Реактивная мощность, квар		
		F	M	Различие, %	F	M	Различие, %
1505	-0,003	-35,3	-35,3	-0,09	30,5	30,5	0,02
1510	-0,007	-70,5	-71,2	-0,95	37,1	37,5	-1,06
1515	-0,010	-104,9	-106,8	-1,76	48,1	49,0	-1,79
1520	-0,013	-137,7	-140,9	-2,32	63,4	64,8	-2,24

Примечание. Символом F обозначены результаты, полученные в программном комплексе Fazonord, а символом M – результаты аналитического расчета в Mathcad.

Таблица 4

Токи и напряжения АСГ

n , об/мин	s	Напряжение, В			Ток, А		
		F	M	Различие, %	F	M	Различие, %
1505	-0,003	251,1	251,1	0,00	61,9	61,9	0,05
1510	-0,007	252,4	252,3	0,04	105,8	106,3	-0,43
1515	-0,010	253,4	253,2	0,08	153,3	154,7	-0,89
1520	-0,013	254,2	253,9	0,12	201,3	203,6	-1,13

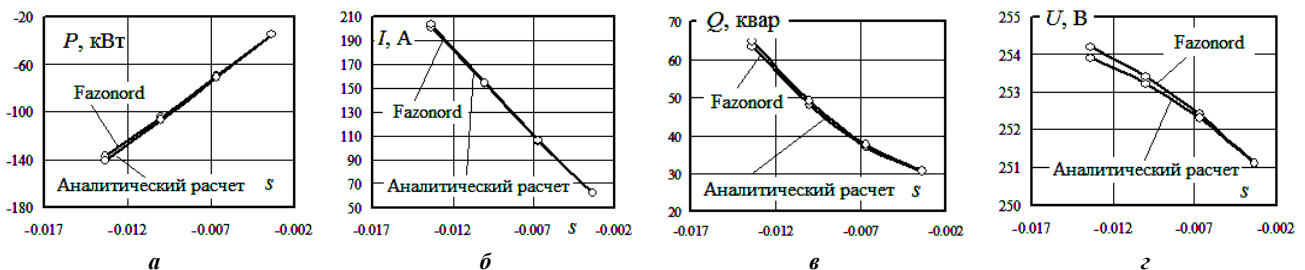


Рис. 4. Результаты расчетов и моделирования:

- а – зависимость активной мощности, генерируемой АСГ, от скольжения;
- б – зависимость фазного тока, посылаемого АСГ в сеть, от скольжения;
- в – зависимость реактивной мощности, генерируемой АСГ, от скольжения;
- г – зависимость напряжений на зажимах АСГ от скольжения

Таблица 5

Паспортные параметры АСГ

$U_{ном}$, кВ	$P_{ном}$, МВт	n_c , об/мин	КПД, %	$\cos\varphi$	k_{mp}	k_m	k_p
6	6	3000	94,7	0,88	1,2	2,8	7,2

Таблица 6

Параметры схем замещения АСГ

Единица измерения	X_{μ}	R_1	R_2	X_k	R_{2p}	X_{kp}
Ом	19,180	0,173	0,035	1,306	0,121	0,767
Относительные единицы	3,836	0,035	0,007	0,261	0,024	0,153

Таблица 7

Потоки мощности и потери в питающей ЛЭП1, МВт

Параметр	Потери активной мощности ΔP		Поток активной мощности P_{ij}	
	АСГ	Нет АСГ	АСГ	Нет АСГ
Mid	0,090	0,182	14,48	25,00
Max	0,345	0,490	27,02	37,13

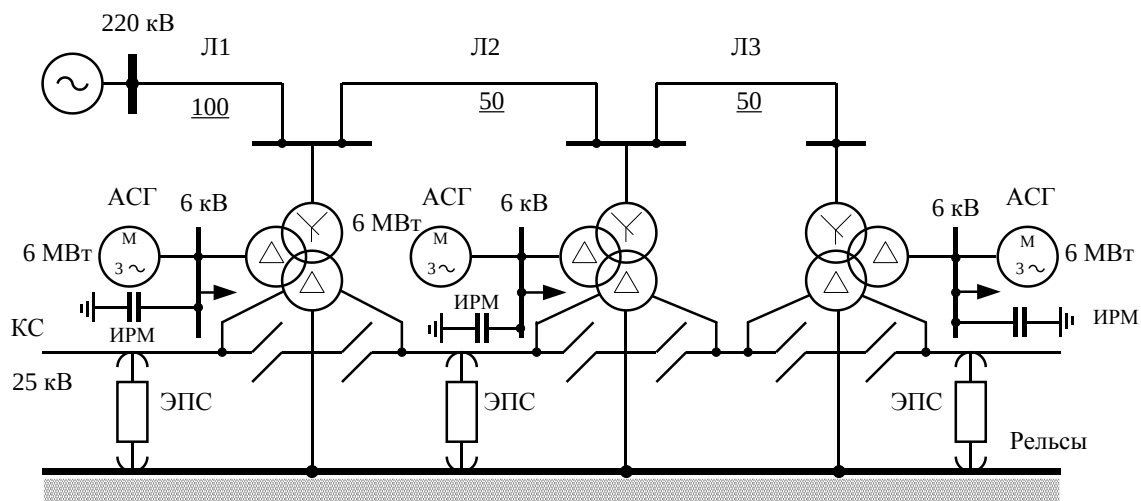


Рис. 5. Схема СЭЖД

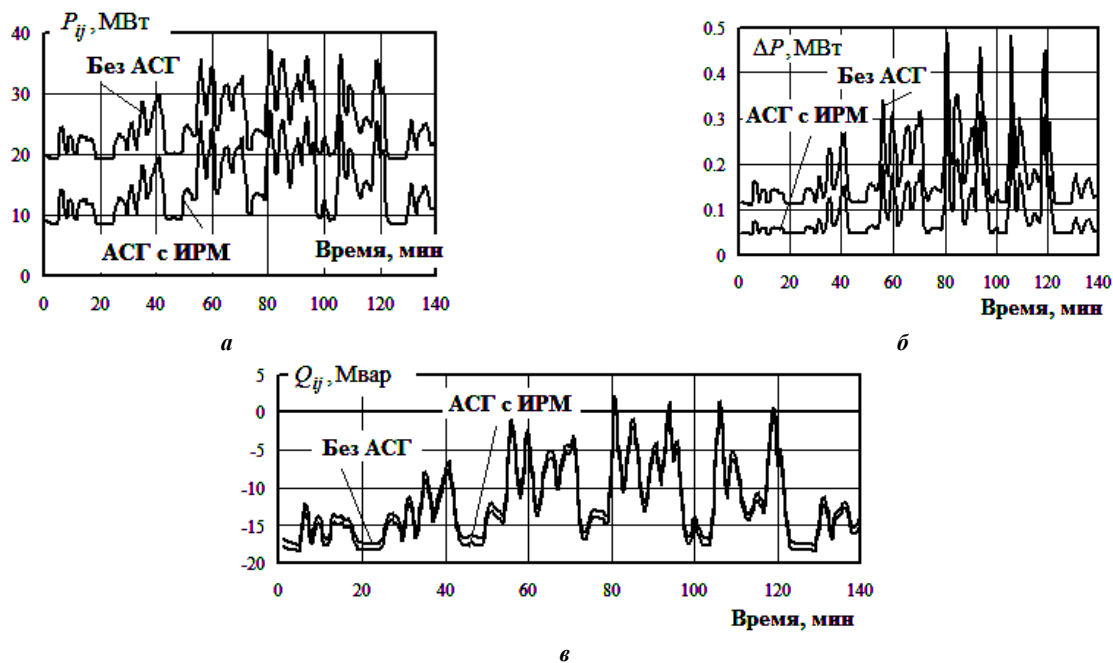


Рис. 6. Потоки мощности и потери в питающей ЛЭП 1:

а – поток активной мощности; б – потери активной мощности; в – поток реактивной мощности

Таблица 8

Генерация АСГ

Параметр	Активная мощность, МВт				Реактивная мощность, Мвар			
	АСГ 1	АСГ 2	АСГ 3	Сумма	АСГ 1	АСГ 2	АСГ 3	Сумма
Min	3,31	3,19	3,30	9,80	-0,14	-0,26	-0,15	-0,56
Mid	3,48	3,44	3,46	10,38	0,01	-0,08	-0,03	-0,09
Max	3,54	3,53	3,53	10,60	0,07	0,01	0,03	0,10

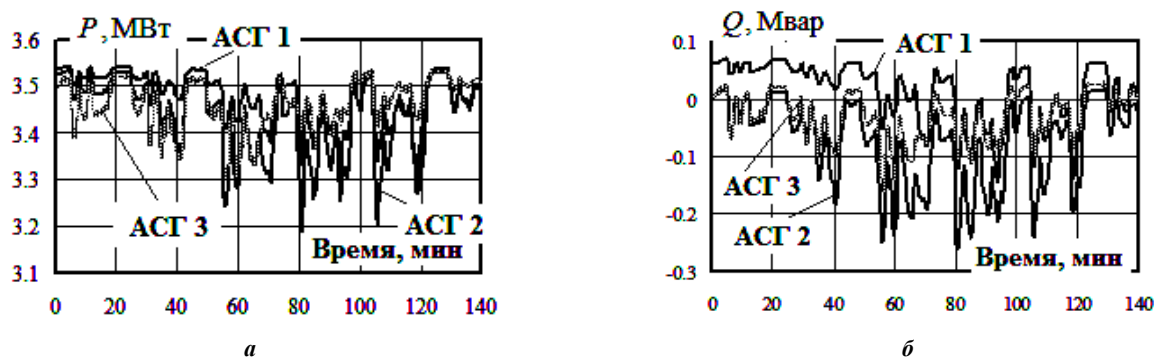


Рис. 7. Генерация активной и реактивной мощности АСГ:

а – генерация активной мощности; б – потребление (генерация) реактивной мощности комплексом АСГ и ИРМ

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основе модели асинхронного двигателя, разработанной в ИрГУПС, возможно проводить моделирование работы асинхронных генераторов в системах электроснабжения электрифицированных железных дорог.

2. Кроме снижения затрат на энергообеспечение и повышения надежности электроснабжения нетяговых потребителей железных дорог на основе АСГ можно получить ряд дополнительных положительных эффектов, заключающихся в повышении энергоэффективности и улучшении качества электроэнергетики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воропай Н.И., Стычинский З.А. Возобновляемые источники энергии: теоретические основы, технологии, технические характеристики, экономика. Magdeburg: Otto-von-Guericke-Universität, 2010. 223 с.
2. Алхасов А.Б. Возобновляемая энергетика. М.: Физматлит, 2012. 256 с.
3. Распределенная генерация в системах электроснабжения железных дорог / Арсентьев М.О., Арсентьев О.В., Крюков А.В., Чан Зюй Хынг. Иркутск: ИрГУПС, 2013. 164 с.
4. Беляков П.Ю., Панов Р.М. Анализ структур и примене-

- мости главных схем электрических соединений современных сетевых ветропарков // Электротехнические комплексы и системы управления. 2009. №4. С.39-44.
5. Беляков П.Ю., Панов Р.М. Анализ эффективности современных цепей преобразования энергии в ветроэлектрических установках большой мощности // Электротехнические комплексы и системы управления. 2011. №4. С.27-34.
6. Суслев К.В., Герасимов Д.О., Шамарова Н.А. Использование динамических характеристик для имитационного моделирования ветрогенератора // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири. В 2 т. Т.2. Иркутск: ИРНТУ, 2016. С.252-256.
7. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Методы совместного моделирования систем тягового и внешнего электроснабжения железных дорог переменного тока. Иркутск: Изд-во ИрГУПС, 2011. 170 с.
8. Закарюкин В.П., Крюков А.В., Ле Конг Зань. Математические модели узлов нагрузки электроэнергетических систем, построенные на основе фазных координат. Иркутск: ИрГУПС, 2013. 176 с.
9. Жуматова А.А. Проблема использования возобновляемых источников энергии для системы тягового электроснабжения: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М.: МГУПС (МИИТ). 2010. 24 с.

Поступила в редакцию 27 апреля 2016 г.

INFORMATION IN ENGLISH

MODELLING OF ASYNCHRONOUS GENERATORS IN PHASE COORDINATES

Vasiliy P. Zakaryukin

D.Sc. (Eng.), Professor, Transport Power Industry Department, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia.
E-mail: zakar49@mail.ru.

Andrey V. Kryukov

D.Sc. (Eng.), Professor, Power Supply and Electrical Equipment Department, Irkutsk National Research Technical University, Transport Electric Engineering Department, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia.
E-mail: and_kryukov@mail.ru.

Grigoriy O. Arsent'ev

Graduate student, Power Supply and Electrical Equipment Department, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia.

A model of an asynchronous generator in phase coordinates is offered. Issues of application of distributed generation installations realized on the basis of asynchronous generators in railroad power supply systems of alternating current are considered. On the basis of computer modeling it is shown that beside the decrease in costs of power supply and increase of

power supply reliability on the basis of distributed generation installations with asynchronous generators, it is possible to gain a number of the additional positive effects consisting in the increase of energy efficiency and improvement of electric power quality.

Keywords: Railroad power supply systems; nonconventional renewable energy sources; asynchronous generators; modeling.

REFERENCES

1. Voropay N.I., Stychinsky Z.A. *Vozobnovlyаемые источники энергии: теоретические основы, технологии, технические характеристики, экономика* [Renewable Energy Sources: Theoretical Bases, Technologies, Technical Characteristics, Economy]. Magdeburg, Otto-von-Guericke-universität, 2010. 223 p.
2. Alkhasov A.B. *Vozobnovlyаемая энергетика* [Renewable power]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2012. 256 p.
3. Arsentyev M.O., Arsentyev O.V., Kryukov A.V., Tran Duy Hung. *Raspredeleonnaya generaciya v sistemah elektrosnabzheniya zheleznih dorog* [Distributed Generation in Railroad Power Supply System]. Irkutsk, IrGUPS Publ., 2013. 164 p.
4. Beliakov P.Yu., Panov R.M. Structure and Applicability Analysis of Electric Connections Main Schemes of Modern Network Wind Farms. *Elektrotekhnicheskie komplekсы i sistemy upravleniya* [Electro technical complexes and control systems]. 2009, no.4, pp. 39-44. (in Russian).
5. Belyakov P.Yu., Panov R.M. Efficiency Analysis of Modern Chains of Energy Transformation in Big Power Wind Installations. *Elektrotekhnicheskie komplekсы i sistemy upravleniya* [Electro technical complexes and control systems]. 2011, no.4, pp. 27-34. (in Russian).
6. Suslov K.V., Gerasimov D.O., Shamarova N.A. Use of Dynamic Characteristics for Wind Generator Imitating Modeling. *Povyshenie effektivnosti proizvodstva i ispol'zovaniya energii v usloviyakh Sibiri* [Increase of production efficiency and use of energy in Siberia conditions]. 2016, vol.2, pp. 252-256. (in Russian).
7. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. *Metody sovmestnogo modelirovaniya sistem tyagovogo i vneshnego elektrosnabzheniya zheleznih dorog peremennogo toka* [Methods of Joint Modeling of Railroad Traction and External Power Supply Systems of Alternating Current]. Irkutsk, IrGUPS Publ., 2011. 170 p.
8. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Danh Le Cong. *Matematicheskie modeli uzlov nagruzki elektroenergeticheskikh sistem, postroennye na osnove faznykh koordinat* [Mathematical Models of Node Loading of Electrical Power Systems Constructed on the Basis of Phase Coordinates]. Irkutsk, IrGUPS Publ., 2013. 176 p.
9. Zhumatova A.A. *Problema ispolzovaniya vozobnovlyаемых источников энергии dlya sistem tyagovogo elektrosnabzheniya*. Kand. Diss. [Problem of Renewable Energy Sources Use for Traction Power Supply System. PhD(Eng.). Diss.]. Moscow, 2010. 24 p.

Информация о других журналах издательства

«Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова» – научный рецензируемый журнал, в котором публикуются результаты прогрессивных научных и проектных работ известных ученых, промышленников, молодых ученых России и зарубежья по широкому спектру исследований в области металлургии, машиностроения, металлообработки и в смежных отраслях. Тематика публикаций охватывает весь комплекс актуальных вопросов от разработки полезных ископаемых, получения чугуна, стали и проката до производства продукции с глубокой степенью переработки для различных отраслей экономики. Большое внимание в журнале уделяется современным тенденциям развития сырьевой базы, энергосбережения, автоматизации, экономики и экологии, стандартизации и управления качеством продукции, подготовки и обучения кадров в области металлургии, машиностроения и металлообработки.

Издается с 2003 г.

Журнал с 2007 года включен в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук, а также в Базы данных ВИНТИ и РИНЦ.

Сведения о журнале ежегодно публикуются в международной справочной системе по периодическим и продолжающимся изданиям «Ulrich's Periodicals Directory».

В редакционный совет журнала входят авторитетные ученые из России, Японии, Индии, Италии, Польши, Южно-Африканской Республики, Казахстана.

Электронная версия журнала доступна:

- на информационном портале ФГБОУ ВО «МГТУ» www.mgtu.ru (раздел «Журнал Вестник МГТУ»);
- на сайте журнала www.vestnik.mgtu.ru;
- на платформе eLIBRARY.

Падалко Д.А.

ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

ЯВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО РЕЗОНАНСА В АСИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРАХ

Раскрыты особенности работы асинхронного генератора. Исследован параметрический резонанс как причина возбуждения асинхронного генератора (АГ). Исследование выполнено путем математического описания и моделирования в среде визуального программирования Simulink пакета прикладных программ MATLAB. На основании проведенных исследований было подтверждено, что остаточная намагниченность не является обязательным фактором для перехода асинхронной машины в генераторный режим работы. Проведена оценка условий генерирования электроэнергии по частотным характеристикам схемы замещения АГ. Рассмотрено явление возбуждения АГ как параметрический резонанс.

Ключевые слова: параметрический резонанс, асинхронный генератор, условия самовозбуждения, частотные характеристики, математическое моделирование.

ВВЕДЕНИЕ

Исследованию асинхронных генераторов (АГ) посвящено большое количество работ как в зарубежной, так и в отечественной литературе. Большое внимание в исследовании АГ уделяется явлению самовозбуждения и раскрытию природы его физического процесса, где прослеживаются три основных трактовки: классическая – основанная на явлении остаточной намагниченности, классического резонанса и параметрического резонанса [1-4].

Классическая трактовка самовозбуждения АГ основывается на явлении остаточного намагничивания, сопоставляя процесс возбуждения АГ с процессом в генераторе постоянного тока параллельного возбуждения, где остаточный магнитный поток ротора при этом является первоначальным импульсом для начала процесса самовозбуждения. При такой трактовке остаточный поток ротора создает синхронное вращающееся магнитное поле статора, что противоречит теории энергетического преобразования в асинхронной машине, согласно которой скорость поля должна быть отлична от скорости ротора.

Как подтверждение вышеуказанного противоречия, А.В. Нетушил описывает эксперимент самовозбуждения АГ без остаточной намагниченности $\Phi_{ост} = 0$. В отмеченном эксперименте АГ возбуждался при гладком немагнитном роторе и не возбуждался при значительном остаточном намагничивании [5]. В работе утверждается, что остаточная намагниченность не является обязательным фактором для самовозбуждения АГ. Остаточный магнитный поток в значительной мере способствует процессу генерирования электроэнергии и позволяет существенно уменьшить требуемую для возбуждения энергию, вносимую в колебательный контур.

Следующая трактовка пыталась связать самовозбуждение с резонансом в индуктивно-емкостном контуре линейной цепи, для возникновения которого требуется наличие независимой возбуждающей ЭДС, работающей на резонансной частоте:

$$f_{рез} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C}}, \quad (1)$$

где L – индуктивность АГ; C – емкость на зажимах АГ.

Однако даже при отсутствии вынуждающей электродвижущей силы наблюдался процесс самовозбуждения АГ, что показывало ошибочность данного суждения.

Наиболее вероятно трактовка самовозбуждения как явления параметрического резонанса – колебательного процесса, вызываемого модуляцией какого-либо из параметров, принимающего нарастающий характер. Параметрический резонанс проявляется наиболее сильно при скачкообразном изменении реактивных элементов, при этом возможна как вариация отдельно индуктивности или емкости, так и их совместный скачок [6]. Для данного вида резонанса не требуется постоянный источник энергии, необходимо лишь присутствие небольшого количества первичной энергии. При этом глубина модуляции параметра влияет на эффективность вложенной энергии [7].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В случае математического представления параметрического резонанса в АГ, работающем на нагрузку, возникают характерные трудности, связанные с высокими требованиями к вычислительным ресурсам. В [5, 8] были попытки описать данный процесс, но лишь при работе на холостом ходу, в связи с ограниченной на тот момент вычислительной мощностью техники, т.к. при индуктивно-активной нагрузке математические выражения становятся слишком громоздкими для их интерпретации. В качестве исследования трактовки резонанса было решено выполнить математическое описание АГ с батареей конденсаторов и произвести проверку полученного решения в пакете прикладных программ MATLAB – Simulink. Данный подход позволяет определить первопричины явления генерирования электроэнергии в асинхронных машинах и выявить значимость факторов. Произведена попытка полного математического описания частного случая резонанса в АГ и его качественного анализа с помощью максимально простого математического аппарата. Найдены выражения передаточной функции и полного сопротивления АГ из схемы замещения при работе на нагрузку.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ

В АГ параметрами, изменение которых может привести к параметрическому резонансу, являются параметры цепи намагничивания. Полная индуктивность АГ зависит от взаимоположения α и потокоцепления статора и ротора. Таким образом, величина $L_{AG}(\alpha)$ может изменяться в некотором диапазоне. Для возникновения резонанса в цепи $L_{AG}(\alpha) - C$ необходимо некоторое внешнее воздействие. В качестве первичного источника энергии, дающего возможность для генерирования электроэнергии, может выступать как внешняя флуктуация, так и целенаправленный ввод возмущений в цепь. При использовании полупроводниковой техники возмущающим воздействием может послужить импульс напряжения. Как известно, спектр импульсного сигнала содержит бесконечное число гармоник. Из изложенного следует, что в импульсном сигнале однозначно имеется резонансная частота для индуктивно-емкостного контура, но для генерирования электроэнергии недостаточно самого факта присутствия гармоники необходимой частоты. Кроме этого, резонанс при данной частоте должен быть устойчив. Устойчивость процесса генерирования электроэнергии обусловлена энергией, накопленной реактивными элементами цепи, причем величина вносимой в контур энергии должна превосходить расходуемое значение, а поступление энергии должно происходить одновременно с ее расходом. Таким образом, должны выполняться условия баланса амплитуд и баланса фаз.

В работах [5, 9] при исследовании самовозбуждения АГ было выявлено, что самовозбуждение возможно, если среди корней уравнений найдутся корни с положительной вещественной частью. Данное заключение было положено в основу выполняемой работы.

Математическое описание АГ и моделирование выполнено в соответствии со схемой **рис. 1, а**. Параметры схемы замещения были найдены по алгоритму, предложенному в работе [10] для электрических машин средней мощности с учетом рекомендаций [11, 12]. Значения параметров асинхронного генератора, принятые в данной работе, представлены в **таблице**.

Мощность P_1 , кВт	15
R_s , Ом	0,2761
R_r , Ом	0,1645
$L_s = L_r$, Гн	0,00219
R_m	0
L_m , Гн	0,07614
C , мкФ	400

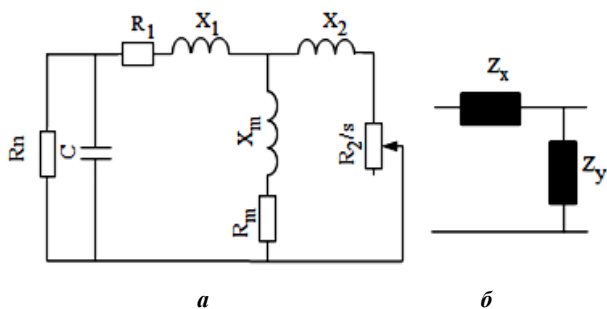


Рис. 1. Схема замещения АГ, работающего на активную нагрузку с емкостным возбуждением: а – исходная; б – преобразованная

Описание электромеханических процессов АГ с конденсаторным возбуждением выполнено при общепринятых допущениях:

- электрическая машина идеализирована: в равномерном воздушном зазоре имеем круговое поле, высшие гармоники отсутствуют, машина ненасыщенна и фазные обмотки полностью симметричны и обладают одинаковыми параметрами, пренебрегаем потерями в стали и т.д.;
- приводной двигатель имеет «бесконечно большую» мощность и постоянную скорость вращения;
- на процесс возбуждения оказывают влияние реактивные элементы – индуктивные сопротивления цепи намагничивания, рассеяния статора $X_{\sigma 1}$ и полного сопротивления нагрузки Z_n , емкостное сопротивление возбуждающих конденсаторов X_C ;
- нагрузка генератора значительно ниже критического значения.

Для получения передаточной функции и входного сопротивления приведем схему, изображенную на **рис. 1, а**, к виду на **рис. 1, б**, где Z_x и Z_y определяются выражениями:

$$Z_x = R_2/s(R_n) + j\omega L_2, \quad (2)$$

$$Z_y = \frac{(R_m + jL_m\omega) \left(R_1 + \frac{R_n}{jC\omega \cdot (R_n - \frac{j}{C\omega})} + jL_1\omega \right)}{R_m + R_1 + jL_m\omega + \frac{R_n}{jC\omega \cdot (R_n - \frac{j}{C\omega})} + jL_1\omega}. \quad (3)$$

Для повышения точности требуется учитывать функцию скольжения генератора $s(R_n)$ от величины нагрузки. Данная корреляция была определена из обратной зависимости полного сопротивления нагрузки $Z_n(s)$ от скольжения, представленной в работе [13]. Полученная функция

$$s(R_n) = - \frac{R_2 \left(R_n - \sqrt{R_n^2 - 4X_s^2 \cos \varphi + 2R_1 \cos \varphi} \right)}{2 \left(\cos \varphi \cdot R_1^2 + R_n R_1 + \cos \varphi X_s^2 \right)}, \quad (4)$$

где X_s – суммарное сопротивление рассеяния рабочей цепи.

Для исследования процессов требуется оценить частотные характеристики, по которым возможно не только определить резонансную частоту, но и описать поведение схемы в частотном диапазоне. Для этого были построены частотные характеристики реальной и мнимой частей, амплитудно-фазовая частотная характеристика (АФЧХ) входного сопротивления и передаточная функция. Пересечение АФЧХ с мнимой осью соответствует условию резонанса – условию баланса фаз. В этих точках пересечения фазовый сдвиг $\varphi = \arctan(\text{Im}/\text{Re}) = 0^\circ$, а это, в свою очередь, означает, что вносимая в контур и накопленная энергия синфазны, т.е. расход и поступление энергии происходит одновременно.

Расчёт действительной, мнимой части входного сопротивления и передаточной функции АГ, работающего на индуктивно-активную нагрузку, требует

большой вычислительной мощности и значительного времени вычисления. При этом расчет схемы в режиме холостого хода не представляет никаких трудностей. В связи с этим для получения требуемых выражений при работе АГ на нагрузку приходится пренебрегать значениями активного сопротивления статора и цепи намагничивания в представленной схеме замещения АД. Стоит отметить, что данное упрощение не вносит существенную погрешность в найденный результат.

В качестве примера, показывающего громоздкость полученных выражений, приведем выражения входного сопротивления и передаточной функции. Данные уравнения получены при указанных выше упрощениях модели.

$$Z_{vh} = Z_x + Z_y = R_2/S_k + X_2 i - \frac{(R_m + X_m i)(R_n X_c - R_n X_1 + X_1 X_c i)i}{R_n(R_m - i(X_c + X_m + X_1)) - X_c(R_m i + X_1 + X_m)}, \quad (5)$$

$$W_{per} = Z_y / Z_{vh}. \quad (6)$$

Действительные и мнимые части приведенных выражений Z_{vh} и W_{per} представляют собой гораздо более сложные полиномы высокого порядка, из-за чего не представлены в данной работе. Графики этих частотных характеристик представлены на рис. 2, 3.

Из полученных характеристик Z_{vh} (см. рис. 2) следует, что условие баланса фаз будет выполняться в окрестностях двух точек пересечения с мнимой осью. Первая точка пересечения с координатами (103;0) получена на частоте $f_1 = 28$ Гц. Вторая точка пересечения с координатами (13,8;0) – на частоте $f_2 = 127$ Гц. По зависимости действительной части входного сопротивления видно, что происходит резонанс второго рода, так как колебания сначала нарастают быстрее, затем медленнее. Стоит отметить, что в окрестности первой точки, кроме минимума мнимой части, наблюдается максимум действительной части входного сопротивления, при этом данные значения тем ближе, чем больший вклад вносит емкостная составляющая.

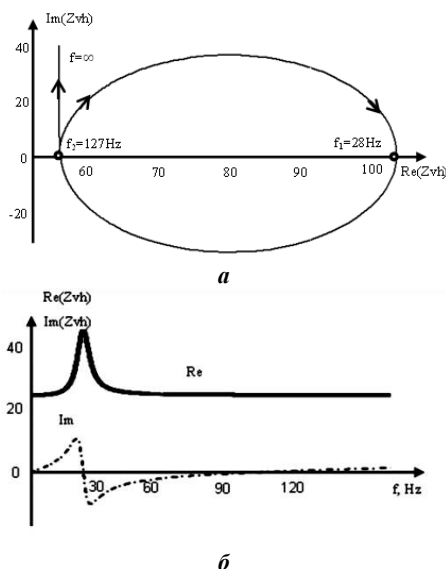


Рис. 2. Частотные характеристики Z_{vh} :
а – АФЧХ полного входного сопротивления;
б – действительной и мнимой части

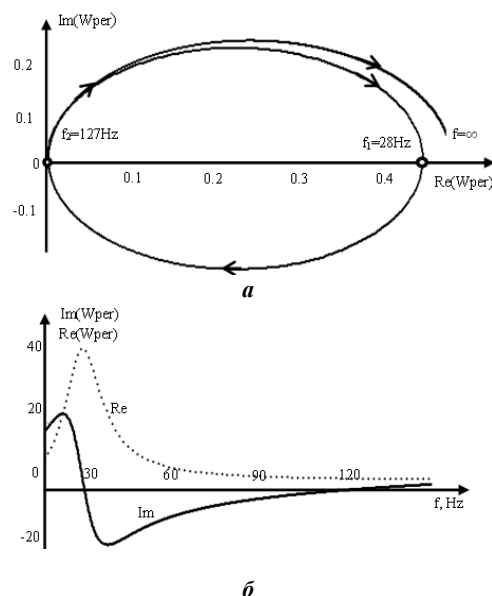


Рис. 3. Частотные характеристики W_{per} :
а – АФЧХ полного входного сопротивления;
б – действительная и мнимая часть Z_{vx}

По характеристикам передаточной функции W_{per} (см. рис. 3) получаем аналогичный результат: имеются две точки пересечения на частотах 28 и 127 Гц. Помимо этого, пересечение действительной и мнимой части происходит вблизи точки перегиба, что характерно для процесса резонанса.

Для определения выражений резонансных частот был исследован знаменатель мнимой части входного сопротивления и передаточной функции. Несмотря на то, что знаменатель $Im(Z_{vh})$ и $Im(W_{per})$ представляет собой полином с большим количеством высокостепенных слагаемых, окончательные выражения частот точек пересечения с мнимой осью имеют следующий вид:

$$f_1 = \frac{1}{2\pi\sqrt{C \cdot L_m}}, \quad (7)$$

$$f_2 = \frac{1 + \frac{L_1 + L_2}{L_m}}{2\pi\sqrt{C(L_1 + L_2)}}.$$

Из этих выражений можно сделать вывод о том, что резонанс в первой точке пересечения определяется индуктивным сопротивлением намагничивающего контура, а во второй точке определяется индуктивными сопротивлениями рассеяния статора и ротора. Полученные результаты позволяют не только определить частоту возникновения резонанса в АГ, но и полно описать происходящие физическо-математические процессы при варьировании сопротивления нагрузки.

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ РЕЗОНАНС

Для возникновения любого вида резонанса необходимо присутствие колебаний определенной частоты, но параметрический резонанс не нуждается во внешнем источнике переменного сигнала. Появление синусоидального сигнала требуемой гармоники объясняется простым физическим явлением. Как известно, в индуктивно-емкостном контуре происходит свободный

процесс перекачивания запасённой энергии из емкости в индуктивность и наоборот, при этом часть электромагнитной энергии расходуется в активном сопротивлении, преобразуясь в тепло. Присутствием потерь объясняется затухающий закон изменения тока (8) и напряжения, частота которых соответствует собственным колебаниям.

$$i = I_m e^{-Kt} \cos(\omega_c t), \quad (8)$$

где ω_c – частота свободных колебаний; K – коэффициент затухания.

При условии статичного контура процесс колебаний всегда несет затухающий характер. Если же реактивные элементы изменяются во времени по периодическим законам, то колебания могут быть как нарастающими, так и затухающими в зависимости от коэффициента затухания, определяемого активным сопротивлением. Явление параметрического резонанса зависит от глубины модуляции реактивных элементов, наиболее сильное проявление происходит при скачкообразном изменении емкости или индуктивности.

Из математического анализа были получены условия возникновения параметрического резонанса, изменение индуктивности или емкости должно быть больше величины обратно пропорциональной добротности [7]:

$$\frac{\Delta C}{C} > \frac{\pi}{Q}, \quad \frac{\Delta L}{L} > \frac{\pi}{Q}. \quad (9)$$

Применим приведенные выкладки к асинхронному генератору с емкостным возбуждением при работе на холостом ходу. Данный режим работы соответствует первой точке, где мнимая часть $\text{Im}(W_{\text{per}})$ равна нулю. Для этого используем схему, приведенную на **рис. 4**, параметры модели приняты из **таблицы**. В качестве первичного источника энергии может выступать заряженный конденсатор.

Для уменьшения значения индуктивности L_m на 20% требуется коммутация в четыре раза большей индуктивностью L_{m2} . Уменьшение индуктивности должно происходить при максимальной запасенной энергии. Возможно несколько вариантов коммутации индуктивности: два и четыре раза за период (**рис. 5**). В каждом из вариантов энергия в контуре будет увеличиваться два раза за период, в момент максимума индуктивной энергии за счет уменьшения величины самой индуктивности. В точках, где энергия равна нулю, изменение индуктивности не вносит энергии в контур, а лишь создает возможность для большего ее накопления через четверть периода.

При выполнении вышеуказанных условий получим результат, представленный на **рис. 6**.

Как видно, происходит увеличение амплитуды напряжения. Прирост энергии будет происходить до момента равенства энергий, вкладываемой за период и преобразующейся в тепло. Частота полученного синусоидального сигнала определяется выражением (7) для первой точки пересечения АФЧХ с мнимой осью. Таким образом, полученные математические выражения подтверждаются выполненным моделированием в среде MATLAB Simulink.

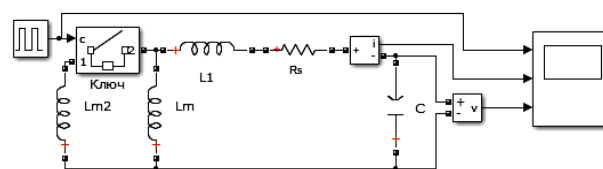


Рис. 4. Модель схемы замещения АГ с емкостным возбуждением при холостом ходу

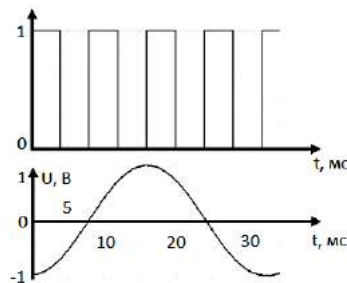


Рис. 5. Графики зависимости от времени переключения ключа и напряжения на конденсаторе

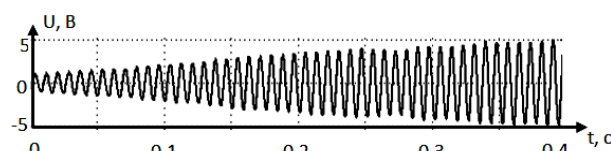


Рис. 6. График зависимости от времени напряжения при параметрическом резонансе

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные теоретические исследования демонстрируют, что возбуждение АГ асинхронного генератора можно трактовать как резонансное явление.

Однако присутствие остаточной намагниченности может значительно упростить процесс самовозбуждения, повысив его устойчивость путем внесения в контур дополнительной энергии. Впервые было найдено полное математическое описание резонанса, происходящего в АГ с емкостным возбуждением, определены уравнения действительной и мнимой частей полного сопротивления и передаточной функции асинхронного генератора, работающего на нагрузку.

Используя результаты моделирования, можно сделать следующие выводы: в контуре L - C возникает синусоидальное напряжение, частота которого соответствует частоте собственных колебаний; при достаточной глубине модуляции колебания могут иметь нарастающий характер; скорость нарастания колебаний и предельная величина будут определяться частотой изменения реактивного элемента и неравенства (9).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Новиков А.В., Кюрегян С.Г. Емкостное самовозбуждение асинхронного генератора // Изв. вузов. Электромеханика. 1967. №2. С.173-179.
- Джэндубаев А.-З.Р., Математическое моделирование асинхронного вентильного генератора // Электричество. 2003. №4. С.47-51.
- Dong Wang, Weiming Ma, Member, Fei Xiao, Botao Zhang, Dezhi Liu, An Hu A Novel Stand-Alone Dual Stator-Winding Induction Generator With Static Excitation Regulation // IEEE Transactions on Energy Conversion, vol.20, no.4, December 2005.
- Garganeev A.G., Padalko D.A. Principles of electric power

- generation based on the self-excited electrical machines using the perspectives of the automatic control theory [Electronic resources] // Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM) : 14th International Conference of Young Specialists, 1-5 July 2013, Novosibirsk. [S.l.]: IEEE, 2013, pp. 319-321.
5. Нетушил А.В., Бояр-Соконович С.П., Китаев А.В. Само-возбуждение асинхронного генератора // Изв. вузов. Электромеханика. 1981. №6. С.613-617.
 6. Падалко Д.А. Методология способов анализа электромеханических систем // Вестник Кузбасского государственного технического университета: научно-технический журнал. 2016. №1. С. 104-110.
 7. Бирюк Н.Д., Нечаев Ю.Б., Финько В.Н. Физическое толкование параметрического резонанса // Вестник ВГУ: Физика, Математика. 2005. №1. С.20-25.
 8. Мишин В.И., Каплун В.В., Макаревич С.С. Асинхронный

- электромеханический комплекс в автономной системе // Электротехника и электромеханика. 2008. №1. С.30-35.
9. Беспалов В.Л., Алиев И.И., Клоков Ю.Б. Асинхронный генератор с гарантированным самовозбуждением // Электричество. 1997. №7. С.43-45.
 10. Макеев М.С., Кувшинов А.А. Алгоритм расчета параметров схемы замещения асинхронного двигателя по каталожным данным // Вектор Науки ТГУ. 2013. №1(23). С.108-112.
 11. Вольдек А.И. Электрические машины. Л.: Энергия, 1974. 640 с.
 12. Асинхронные двигатели серии 4А: справ. М.: Энергоиздат, 1982. 503 с.
 13. Лищенко А.И., Лесник В.А. Асинхронные машины с массивным ферромагнитным ротором. Киев: Наукова думка, 1984. 168 с.

Поступила в редакцию 13 апреля 2016 г.

INFORMATION IN ENGLISH

PHENOMENON OF PARAMETRIC RESONANCE IN INDUCTION GENERATORS

Dmitriy A. Padalko

Post-graduate student, Teaching Assistant, Department of Electromechanical Plants and Materials, National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia. E-mail: padalko.da@gmail.com.

Operation features of an induction generator are revealed in the paper. Parametric resonance as a cause of induction generator excitation is investigated. The study was performed by the mathematical description and modeling in the block diagram environment Simulink pack of MatLab software application. It was confirmed on the basis of the studies that residual magnetization is not a mandatory factor for the transition of the induction machine in the generator mode. The power generation conditions are estimated on the frequency characteristics of the induction generator equivalent circuit.

Keywords: Parametric resonance, induction generator, self-excitation conditions, frequency characteristics, mathematical modeling.

REFERENCES

1. Novikov A.V., Kyureghyan S.G. Capacitive Self-excitation of Induction Generator. *Izv. vuzov. Elektromekhanika* [Bulletin of higher education. Electromechanics]. 1967, no.2, pp.173-179. (in Russian).
2. Dzhendubaev A.-Z.R., Mathematical Modeling of Alternator. *Elektrichestvo* [Electricity]. 2003, no.4, pp.47-51. (in Russian).
3. Dong Wang, Weiming Ma, Member, Fei Xiao, Botao Zhang, Dezhi Liu, An Hu A Novel Stand-Alone Dual Stator-Winding Induction Generator With Static Excitation Regulation. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol.20, no.4, December 2005.
4. Garganeev A.G., Padalko D.A. Principles of electric power generation based on the self-excited electrical machines using the perspectives of the automatic control theory [Electronic resources]. Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM), 14th International Conference of Young Specialists, 1-5 July 2013, Novosibirsk. [S.l.]: IEEE, 2013, pp. 319-321.

5. Netushil A.V., Boyar-Sozonovich S.P., Kitaev A.V. Self-excitation of Induction Generator. *Izv. vuzov. Elektromekhanika* [Bulletin of higher education. Electromechanics]. 1981, no. 6, pp. 613-617. (in Russian).
6. Padalko D.A., Methodology of electromechanical system analysis. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta: nauchno-tekhnicheskii zhurnal* [Vestnik of the Kuzbass State Technical University: Science and Technology Journal]. 2016, no.1, pp.104-110. (in Russian).
7. Biryuk N.D., Nechayev Y.B., Finko V.N. Physical Interpretation of Parametric Resonance. *Vestnik VGU: Fizika, Matematika* [Bulletin of Voronezh State University: Physics, Mathematics]. 2005, no.1, pp.20-25. (in Russian).
8. Mishin V.I., Kaplun V.V., Makarevich S.S. Asynchronous Electromechanical Complex in Autonomous System. *Elektrotehnika i elektromekhanika* [Electrical engineering and electromechanics]. 2008. no.1 pp. 30-35. (in Russian).
9. Bespalov V.L., Aliev I.I., Klovok Yu.B. Induction Generator with Guaranteed Self-excitation. *Elektrichestvo* [Electricity]. 1997. no.7. pp.43-45. (in Russian).
10. Makeev M.S., Jars A.A. Algorithm for Calculating of Induction Motor Equivalent Circuit Parameters by Catalog Data. *Vektor Nauki TGU* [TSU Science Vector]. 2013, no.1(23), pp.108-112. (in Russian).
11. Voldek A.I. *Elektricheskie mashiny* [Electrical machines]. Leningrad, Energy Publ., 1974. 640 p.
12. *Asinkhronnye dvigateli serii 4A: spravochnik* [4A Induction motors: handbook]. Moscow, Energoizdat Publ., 1982. 503 p.
13. Lischenko A.I., Lesnik V.A. *Asinkhronnye mashiny s massivnym ferromagnitnym rotorom* [Asynchronous Machines with Massive Ferromagnetic Rotor]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1984. 168 p.

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ НЕЙРОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

В статье описана методика краткосрочного прогнозирования электропотребления региональной электроэнергетической системы (ЭЭС) на основе искусственной нейронной сети (ИНС). Данная процедура на базе нейронных технологий дает прогнозную оценку электроэнергии для преобразования ее в конечный продукт потребителями при минимальном участии людей и обеспечивает повышение надежности энергоснабжения с точки зрения бесперебойного питания электроэнергией, снижения срывов производства и аварий в электрической и технологической части. Для практического применения метода прогнозирования потребления электроэнергии на основе ИНС разработана компьютерная программа расчета прогнозных значений электропотребления энергосистемы. Программный продукт обеспечивает автоматизированный выбор оптимального набора входных параметров нейронной сети, позволяющий повысить точность прогноза нейросетевой модели и электропотребления в любой региональной энергосистеме.

Ключевые слова: электроэнергетическая система, потребление электроэнергии, искусственная нейронная сеть, краткосрочное прогнозирование электропотребления.

ВВЕДЕНИЕ

В условиях рыночной экономики актуальной является задача разработки методов и соответствующих программ для прогнозирования электропотребления высокой степени точности с целью повышения точности планирования оптимального режима и надежности ЭЭС [1-3]. В настоящее время с развитием теории искусственного интеллекта решение задачи прогнозирования потребления электроэнергии предложено с помощью ИНС. Метод краткосрочного прогнозирования нагрузки на основе ИНС является наиболее точным и перспективным. Преимуществом ИНС по сравнению с «классическими методами» является описание сложных нелинейных зависимостей между входными переменными [2, 4, 5]. Важнейшее свойство нейронной сети – параллельная обработка информации одновременно всеми нейронами. Известно множество способов объединения нейронов в нейронную сеть [1, 6]. Наиболее точный прогноз нагрузки выполняется ИНС прямого распространения.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Построение модели ИНС требует выполнения следующих этапов: выбор оптимального набора входных переменных; выбор архитектуры и обучение ИНС; тестирование полученной модели.

Первый этап – это выбор переменных, описывающих изучаемый процесс. В настоящее время отмечается сложность определения оптимального набора входных параметров для первоначального обучения нейронной сети. Входные переменные выбираются на основе экспертных оценок, т.е. чисто интуитивно, на основании опыта эксплуатации данной энергосистемы [1-5]. В то же время уровень качества прогнозной модели напрямую зависит от выбора и установления зависимостей между переменными на входе. Таким образом, еще до начала обучения ИНС необходимо вы-

полнить выбор оптимального набора входных данных, чтобы значительно сократить время обучения и диагностики модели и повысить достоверность прогноза обученной модели.

В [7] с помощью разработанной программы реализован автоматизированный выбор оптимального набора входных данных ИНС. Целью автоматизации выбора является обеспечение способности модели до начала обучения автоматически учитывать необходимые входные параметры, содержащие наиболее существенную и значимую информацию о выходном сигнале. Автоматизированный выбор оптимального набора входных переменных осуществляется в модели ИНС по следующим основным критериям.

Модель должна учитывать:

- статистику потребления электроэнергии - фактические данные по электропотреблению, которые имеют наиболее сильную корреляционную зависимость с выходным значением, т.е. оказывают наиболее сильное влияние на суточный график потребления электроэнергии в регионе;
- набор входных данных должен содержать необходимый минимальный объем ретроспективной информации, обеспечивающей требуемый уровень точности прогноза;
- влияние температуры наружного воздуха;
- влияние сезонности;
- тип дня.

С помощью программы определен оптимальный набор входных переменных ИНС при краткосрочном прогнозировании потребления электроэнергии региональной ЭЭС. Он состоит из пяти дискретных значений фактического электропотребления ЭЭС, в МВт·ч, и уравнения зависимости электропотребления от температуры наружного воздуха для учета влияния метеофакторов [7-9]. Методика учета температуры в представленной модели отличается от предыдущих работ [1, 2, 4, 5, 10-13] тем, что в качестве входного параметра в модели ИНС выступает уравнение ап-

проксимирующей кривой - зависимость электропотребления от температуры, т.е. непрерывная величина.

Зависимость электропотребления от температуры описана в работе [7] с помощью построения упорядоченного графика (рис. 1).

Для построения графика использовались статистические данные по электропотреблению и температуре наружного воздуха Самарской энергосистемы. Аппроксимация зависимости указанных переменных выполнена с помощью полиномиального тренда. Это уравнение аппроксимирующей кривой на входе нейронной сети обеспечивает учет влияния температуры воздуха в прогнозной модели. При нормировании этого уравнения в скрытый слой нейронов для нелинейной обработки подается диапазон значений потребления электроэнергии в зависимости от конкретных зна-

чений температуры для каждого из сезонов года данного региона с соответствующим весовым коэффициентом. Это позволяет вместе с влиянием температуры одновременно учитывать влияние сезонности на новом, более точном уровне [7]. В качестве дополнительных входных параметров ИНС-модели приняты номер недели в году, номер дня недели, признак праздничных суток. Эти факторы входят в структуру ИНС как дополнительная уточняющая информация, они не являются отдельными входными элементами и неразрывно связаны с каждым из входных нейронов сети в представленной модели.

На втором этапе построена архитектура и выполнено обучение ИНС. На рис. 2 представлена нейросетевая структура для краткосрочного прогнозирования электропотребления в энергосистеме.

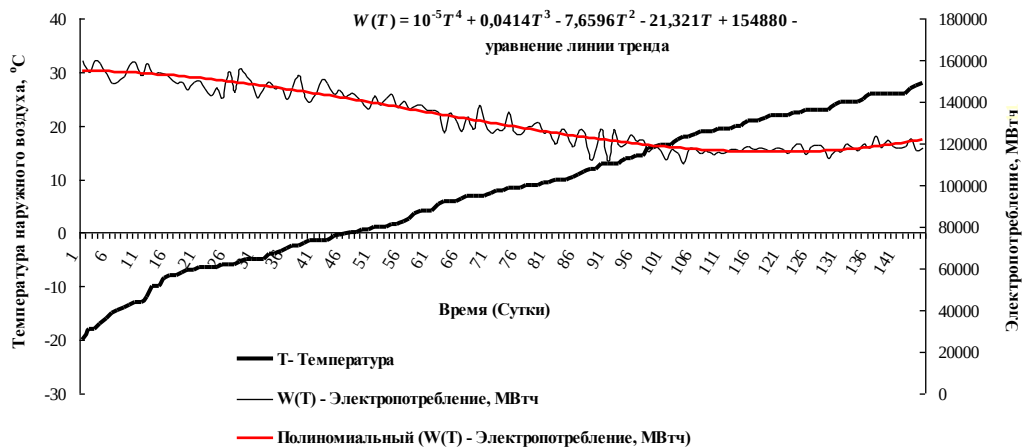


Рис. 1. График зависимости электропотребления от температуры воздуха в энергосистеме

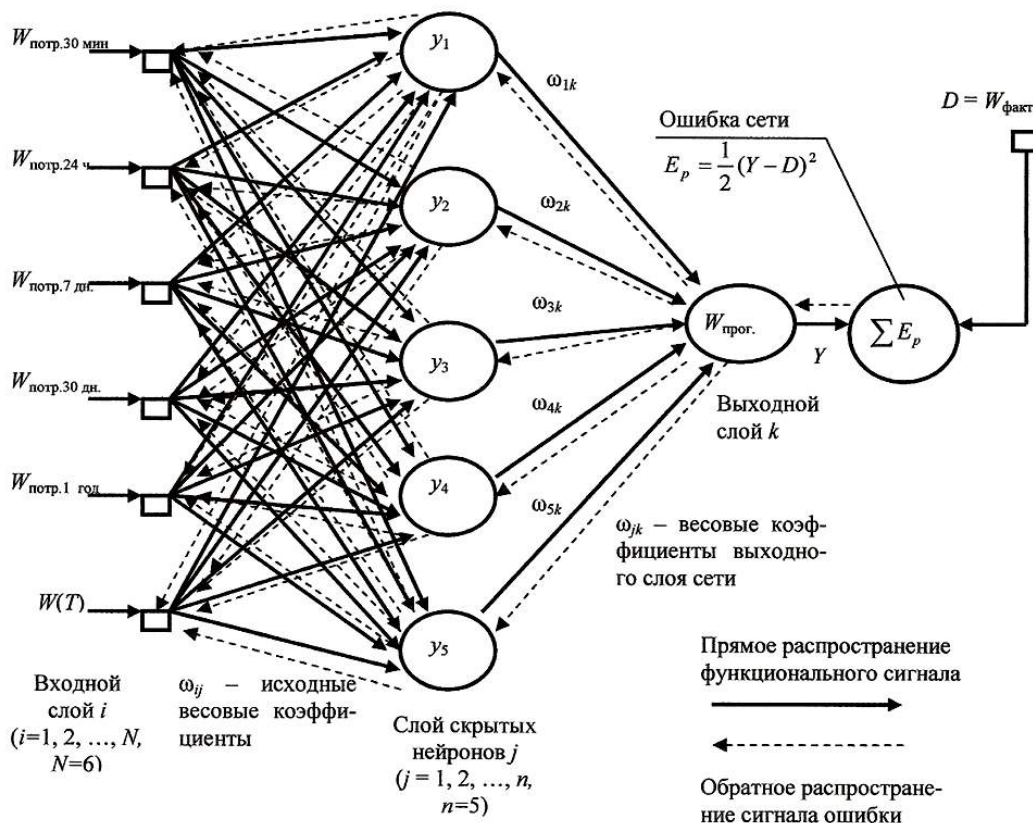


Рис. 2. Нейросетевая структура для краткосрочного прогнозирования электропотребления в энергосистеме

Архитектура ИНС состоит из трех слоев. На входе – 6 нейронов. С помощью разработанной программы в [7] проводилось исследование нейросетевых структур с разным количеством слоев и нейронов для оценки влияния изменения структуры ИНС на качество прогнозирования (табл. 1, 2). Сеть с пятью нейронами в скрытом слое и шестью нейронами – на входе показала наилучшие результаты. Установлено, что ввод температуры на вход ИНС в качестве шестого параметра уменьшает ошибку прогноза примерно в 1,5 раза [7]. На выходе – один нейрон, который представляет собой искомое прогнозное значение электропотребления.

Эта трехслойная нейромодель дает минимальное значение средней ошибки за период обучения (см. табл. 2) и является оптимальной для прогнозирования потребления электроэнергии в ЭЭС, выполняя расчет прогнозных значений «на сутки вперед» на основании ретроспективных данных по электропотреблению с учетом влияния температуры наружного воздуха, сезонности и типа дня недели [7].

Обучение ИНС выполнено с помощью алгоритма обратного распространения ошибки с «учителем». В качестве «учителя» выступали известные ретроспективные значения фактического электропотребления $W_{\text{факт}}$ (см. рис. 2).

Для успешного обучения сети выборка данных разделена на две части: обучающая и проверочная (тестовая). В [7] обучающая выборка представлена в виде фактических значений электропотребления энергосистемы Самарского региона за 2005-2006 гг. Для преодоления проблемы переобучения ИНС часть данных из обучающей выборки принимались в качестве контрольной выборки для независимого контроля результата. Проверочная выборка – фактические значения потребления электроэнергии за 2007 г. Такое представление входной информации при обучении ИНС в виде трех множеств данных – обучающее, контрольное, тестовое позволило обеспечить должную надежность представленной модели.

На третьем этапе выполнено тестирование построенной модели. Сравнение результатов прогнозирования представлено в табл. 3.

Проведена диагностика модели – оценка способности ИНС к обобщению накопленных знаний. В качестве критерия этой оценки в работе [7] принята относительная погрешность прогноза электропотребления. По результатам расчетов на примере Самарской ЭЭС по методу с использованием ИНС получены наименьшие значения погрешности прогноза (см. табл. 3).

Таблица 1

Нейронная сеть с двумя скрытыми слоями

Количество нейронов на входе ИНС	Количество нейронов в скрытом слое ИНС		Длительность обучения (количество эпох)	Средняя ошибка, МВт·ч
	Слой № 1	Слой № 2		
5	2	2	20000	10470
5	3	3	20000	10115
5	4	4	20000	9525
5	5	5	20000	9180
6	5	5	20000	6135
6	6	6	20000	6500
6	7	7	20000	6300
6	8	8	20000	6920

Таблица 2

Нейронная сеть с одним скрытым слоем

Количество нейронов на входе ИНС	Количество нейронов в скрытом слое ИНС	Длительность обучения (количество эпох)	Средняя ошибка, МВт·ч
5	2	20000	6980
5	3	20000	6743
5	4	20000	6350
5	5	20000	6125
6	5	20000	4083
6	6	20000	4340
6	7	20000	4265
6	8	20000	4620

Сравнение результатов прогнозирования электропотребления ЭЭС

Месяц 2007 г.	Погрешность прогнозирования от фактического значения, %		
	Метод Сааренда	Метод экспоненциального сглаживания	Метод ИНС
Январь	5,50	15,0	2,30
Февраль	9,00	11,4	1,97
Март	0,02	10,5	3,30
Апрель	6,00	12,2	1,95
Май	2,30	6,0	2,10
Июнь	1,10	14,5	1,96
Июль	3,20	8,3	1,94
Август	5,60	4,8	1,90
Сентябрь	6,10	7,6	1,95
Октябрь	9,20	20,4	1,80
Ноябрь	6,60	14,2	2,20
Декабрь	11,20	13,7	1,87
Среднее значение	5,50	11,5	2,10

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе [7] выполнено сравнение метода прогнозирования потребления электроэнергии на основе ИНС с традиционными методами [14, 15]. Значение относительной погрешности прогнозирования по методу ИНС составляет 2,1 % (см. табл. 3). Полученная погрешность является минимальной и оптимальной для энергосистемы.

Таким образом, метод на основе ИНС с автоматизированным выбором оптимального набора входных переменных позволяет повысить достоверность и качество прогноза электропотребления. Следовательно, применение этого метода целесообразно для повышения точности планирования оптимального режима энергосистемы, энергоэффективности и энергосбережения, а также повышения надежности ЭЭС с точки зрения бесперебойного питания электроэнергией, снижения срывов производства и аварий в электрической и технологической части. Результаты работы успешно внедрены и реализованы в филиале ОАО «СО ЕЭС» Самарское РДУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Шумилова Г.П., Готман Н.Э., Старцева Т.Б. Прогнозирование электрических нагрузок при оперативном управлении электроэнергетическими системами на основе нейросетевых структур. Екатеринбург: УрО РАН, 2008. 88 с.
- Макоклюев Б.И. Анализ и планирование электропотребления. М.: Энергоатомиздат, 2008. 296 с.
- Папков Б.В. Надежность и эффективность электроснабжения: учеб. пособие. Н. Новгород: Нижегород. гос. техн. ун-т, 1996. 210 с.
- Бэнн Д.В., Фармер Е.Д. Обзор методов краткосрочного прогнозирования в электроэнергетике // Сравнительные модели прогнозирования электрической нагрузки энергосистем. М.: Энергоатомиздат, 1987. 260 с.
- Бэнн Д.В., Фармер Е.Д. Сравнительные модели прогнозирования электрической нагрузки. М.: Энергоатомиздат, 1987. 200 с.
- Хайкин Саймон Нейронные сети: полный курс: пер. с англ. 2-е изд. М.: Вильямс, 2006. 1104 с.
- Алексеева И.Ю. Краткосрочное прогнозирование электропотребления в электроэнергетических системах с использованием искусственных нейронных сетей: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Иваново: ИГЭУ им. В.И. Ленина, 2014. 20 с.
- Алексеева И.Ю., Ведерников А.С., Скрипачев М.О. Прогнозирование электропотребления с использованием метода искусственных нейронных сетей // Вестник СамГТУ. Сер. Технические науки. 2010. №4(27). С. 135-138.
- Алексеева И.Ю., Ведерников А.С. Определение набора входных данных искусственной нейронной сети при краткосрочном прогнозировании электропотребления // Электроэнергетика глазами молодежи: науч. труды междунар. науч.-техн. конференции. Самара: СамГТУ, 2011. Т.1. С. 253-255.
- Шнейдер А.М., Такенава Т., Шиффман Д.А. Суточное прогнозирование нагрузки ЭЭС с учетом прогнозов температуры // Сравнительные модели прогнозирования электрической нагрузки энергосистем. М.: Энергоатомиздат, 1987. 260 с.
- Кендалл М., Стьюарт А. Многомерный статистический анализ и временные ряды: пер. с англ. М.: Наука, 1976. 540 с.
- Родыгина С.В. Краткосрочное прогнозирование электрических нагрузок промышленных предприятий с применением интеллектуальных информационных технологий: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Новосибирск: ФГОУ ВПО НГАСУ, 2010. 20 с.
- Воронов И.В. Прогнозирование электропотребления промышленных предприятий с помощью искусственных нейронных сетей: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Кемерово: КГТУ, 2010. 20 с.
- Алексеева И.Ю., Степанов В.П., Ведерников А.С. Метод Сааренда в исследовании динамики бытового электропотребления населением г. Чапаевска Самарской губернии // Электротехнические системы и комплексы. 2008. №15. С. 196-201.
- Алексеева И.Ю., Степанов В.П., Ведерников А.С. Метод экспоненциального сглаживания линии тренда временного ряда в сочетании с методом индексов сезонности при краткосрочном прогнозировании электропотребления // Вестник СамГТУ. Сер. Технические науки. 2008. №1(21). С. 137-143.

Поступила в редакцию после доработки 12 апреля 2016 г.

INFORMATION IN ENGLISH

IMPROVING THE RELIABILITY OF ELECTRIC ENERGY SYSTEMS ON THE BASIS OF NEURAL TECHNOLOGIES

Inna Yu. Alekseeva

Ph.D. (Eng.), Teaching Assistant, Department of industrial electric power supply, branch of Samara State Technical University in Syzran, Syzran, Samara region, Russia. E-mail: alekseewa.inna2012@yandex.ru.

The article describes the technique of short-term prediction of electricity consumption of regional electric energy system (EES) based on an artificial neural network (ANN). This procedure developed on the basis of neural technologies gives prognosis evaluation of electrical energy for its transformation into the final product with minimum participation of people and provides improving the reliability of energy supply from the standpoint of uninterrupted supply of electrical energy, the decrease in the number of the breakdowns of production and the failures in electrical and technological part. For practical application of the method of prediction of electrical energy consumption on the basis of ANN, a computer program was developed to the calculate the forecast values of electricity consumption of the energy system. The program product provides automatic choice of optimum composition of input variables of the ANN that make it possible to raise the exactness of the prediction of the neural network model and to predict electricity consumption in any regional energy system.

Keywords: Electric energy system, consumption of electrical energy, artificial neural network, short-term prediction of electricity consumption.

REFERENCES

- Shumilova G.P., Gotman N.E., Startseva T.B. *Prognozirovanie elektricheskikh nagruzok pri operativnom upravlении elektroenergeticheskimi sistemami na osnove neirosetevykh struktur* [Prediction of Electrical Loads for Operative Management of Electrical Energy Systems Based on Neural Network Structures]. Yekaterinburg, UrO RAS Publ., 2008. 88 p.
- Makoklyuev B.I. *Analiz i planirovanie elektropotrebleniya* [Analysis and Planning of Electricity Consumption]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 2008. 296 p.
- Papkov B.V. *Nadezhnost i effektivnost elektroснабжениya* [Reliability and Efficiency of Electrical Supply]. Textbook. – Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod State Technical University, 1996. 210 p.
- Benn D.V., Farmer E.D. Review of Methods of Short-term Prediction in Electrical Power Engineering. *Sravnitel'nye modeli prognozirovaniya elektricheskoy nagruzki energosistem* [Comparative models of prediction of electrical load of energy systems]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1987. 260 p.
- Benn D.V., Farmer E.D. *Sravnitelnye modeli prognozirovaniya elektricheskoy nagruzki* [Comparative Models of Prediction of Electrical Load]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1987. 200 p.
- Haykin Simon. *Neyronnye seti: polnyy kurs* [Neural networks. Complete course.]. 2nd ed. Moscow, Viliyams Publ., 2006. 1104 p.
- Alekseeva I.Y. *Kratkosrochnoe prognozirovanie elektropotrebleniya v elektroenergeticheskikh sistemakh s ispolzovaniem iskusstvennykh neironnykh setey*. Kand. Diss. [Short-term Prediction of Electricity Consumption in Electrical Energy Systems with Application of Artificial Neural Networks. PhD(Eng.). Diss.]. Ivanovo, 2014. 20 p.
- Alekseeva I.Y., Vedernikov A.S., Skripachev M.O. Prediction of Electrical Consumption by the Method of Artificial Neural Networks. *Vestnik SamGTU. Ser. Tekhnicheskie nauki* [Vestnik of Samara State Technical University. Technical Sciences Series], 2010, no.4(27), pp. 135-138. (in Russian).
- Alekseeva I.Y., Vedernikov A.S. Definition of the Set of Input Variables of Artificial Neural Network for Short-term Predicting of Electricity Consumption. *Elektroenergetika glazami molodezhi: nauch. trudy mezhdunar. nauch.-tekhn. konferentsii* [Electrical power engineering in eyes of young people. Scientific works of international scientific and technical conference]. Samara, 2011, vol.1, pp. 253-255. (in Russian).
- Shneyder A.M., Takenava T., Shiffman D.A. Daily Load Predicting of EES Based on Projected Temperature. *Sravnitel'nye modeli prognozirovaniya elektricheskoy nagruzki energosistem* [Comparative models of the prediction of electrical load of energy systems]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1987. 260 p.
- Kendall M., Stiyart A. Multi-dimensional statistic analysis and time series. Moscow, Science Publ., 1976. 540 p.
- Rodiygina S.V. *Kratkosrochnoe prognozirovanie elektricheskikh nagruzok promyshlennykh predpriyatiy s primeneniem intellektualnykh informatsionnykh tehnologiy*. Kand. Diss. [Short-term Prediction of Electrical Loads of Industrial Enterprises with Application of Intelligent Information Technologies. PhD(Eng.). Diss.]. Novosibirsk, 2010. 20 p.
- Voronov I.V. *Prognozirovanie elektropotrebleniya promyshlennykh predpriyatiy s pomoschyu iskusstvennykh neyronnykh setey*. Kand. Diss. [Prediction of Electricity Consumption of Industrial Enterprises with the Help of Artificial Neural Networks. PhD(Eng.). Diss.]. Kemerovo, 2010. 20 p.
- Alekseeva I.Y., Stepanov V.P., Vedernikov A.S. Saarand's Method in the Study of Dynamics of Household Energy Consumption the Population of the City of Chapayevsk in the Samara Region. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical systems and complexes], 2008, no.15, pp. 196-201.
- Alekseeva I.Y., Stepanov V.P., Vedernikov A.S. Method of Exponential Smoothing of Trend Lines of Time Series in Combination with the Method of Seasonality Indices for Short-term Predicting of Electricity Consumption. *Vestnik SamGTU. Ser. Tekhnicheskie nauki* [Vestnik of Samara State Technical University. Technical Sciences Series], 2008, pp.137-143.

Черепанов В.В., Калинина Е.А.

ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет»

РАСЧЕТ КОЛЕБАНИЙ НАПРЯЖЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ ПРИ РАБОТЕ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С РЕЗКОПЕРЕМЕННОЙ НАГРУЗКОЙ

Целью исследования является создание методики расчета колебаний напряжения, возникающих при работе асинхронных двигателей с резкопеременной нагрузкой. Результаты расчета колебаний напряжения необходимы для определения дозы фликера, с помощью которого согласно [1] оценивается качество электрической энергии. Для достижения цели, были выполнены экспериментальные исследования на предприятии ООО «Вятский фанерный комбинат» и получены графики изменения электрической нагрузки механизмов, работающих с резкопеременной нагрузкой. Анализ результатов экспериментальных исследований показал, что графики нагрузок для решения данной задачи следует представлять решетчатыми моделями, интерполируемыми сплайн-функциями первой степени. В качестве примера приведены полигоны математического ожидания и среднеквадратических отклонений активной и реактивной мощности электродвигателя одного из исследуемых механизмов. Предложены формулы по определению числовых характеристик напряжения в узлах решетчатой модели, которую также предлагается описывать сплайн-функциями. По предлагаемой методике выполнен расчет изменения напряжения сети для одного из обследуемых механизмов. Сравнение результатов расчета дозы фликера, полученных с применением разработанной методики, с экспериментальными показало, что погрешность расчетов составляет 8%. Созданная методика является универсальной и может использоваться при проектировании других объектов, имеющих электроприемники с резкопеременными нагрузками.

Ключевые слова: колебания напряжения, резкопеременные нагрузки, доза фликера, асинхронный двигатель, математическое ожидание, дисперсия, случайный процесс, решетчатая модель, сплайн-функция.

ВВЕДЕНИЕ

Работа электроприводов с резкопеременной нагрузкой вызывает колебания напряжения электрической сети, которые нарушают нормальную работу электрооборудования, уменьшают срок службы электронной аппаратуры и отрицательно сказываются на зрении работников [2, 3].

Колебания напряжения нормируют и оценивают дозой фликера [1].

На стадии эксплуатации электрооборудования дозу фликера можно измерить с помощью специальных приборов, а при их отсутствии можно измерить колебания напряжения сети, а затем рассчитать дозу фликера по методике [4]. На стадии проектирования колебания напряжения и доза фликера должны определяться расчетным путем.

Колебания напряжения возникают при работе различных потребителей, например дуговой сталеплавильной печи (ДСП), сварочной установки, прокатного стана и асинхронного двигателя с резкопеременной нагрузкой. Каждый источник колебаний напряжения имеет свой специфический график изменения электрической нагрузки, тесно связанный с технологией производства. В связи с этим определение дозы фликера, создаваемого различными источниками колебаний напряжения, требует разработки различных подходов к расчету колебаний напряжения, создаваемых этими источниками [5]. В настоящее время разрабатываются новые методы расчета дозы фликера. Например, для ДСП предложена методика, изложенная в [6].

МЕТОДИКА РАСЧЕТА КОЛЕБАНИЙ НАПРЯЖЕНИЯ,
ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ РАБОТЕ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ
С РЕЗКОПЕРЕМЕННОЙ НАГРУЗКОЙ

В данной статье описывается предлагаемая методи-

ка расчета колебаний напряжения, возникающих при работе асинхронного двигателя с резкопеременной нагрузкой.

Исходными данными для выполнения расчетов колебаний напряжения служат сведения о параметрах электрической сети и графике электрической нагрузки электродвигателя. Поскольку резкопеременная нагрузка электродвигателя меняется, как правило, случайным образом, то для определения параметров графика нагрузки необходимо предварительно выполнить экспериментальные исследования на производствах, аналогичных проектируемому.

Для разработки методики нами исследованы электрические нагрузки электродвигателей механизмов фанерного производства (дробилки карандашей, корорубки, спиральной рубильной машины, дробилки шпона, лущильной машины, окорочной машины, пил), [7]. В качестве примера в данной статье приведены результаты исследований и расчетов для одного из перечисленных электроприемников - барабанной рубильной машины «Дробилка шпона». На **рис. 1** представлена схема питания данного электроприемника.

Анализ результатов исследований показал, что во всех случаях электрические нагрузки изменяются циклично и случайным образом. Следовательно, активную $P(t)$ и реактивную $Q(t)$ нагрузки электродвигателей следует рассматривать как случайные процессы и характеризовать их функциями математического ожидания $M[P(t)]$, $M[Q(t)]$ и дисперсии $D[P(t)]$ и $D[Q(t)]$ или среднеквадратического отклонения $\sigma[P(t)]$ и $\sigma[Q(t)]$.

Случайные функции $P(t)$ и $Q(t)$ являются исходными данными для расчета размахов колебаний напряжения. Для удобства дальнейших расчетов функции $M[P(t)]$ и $M[Q(t)]$ предлагается описывать решетчатыми моделями. Решетчатые модели $M[P(t)]$ и $M[Q(t)]$ представляются в виде полигонов и интерполируются сплайн-функциями первой степени.

В качестве примера на **рис. 2** и **3** представлены по-

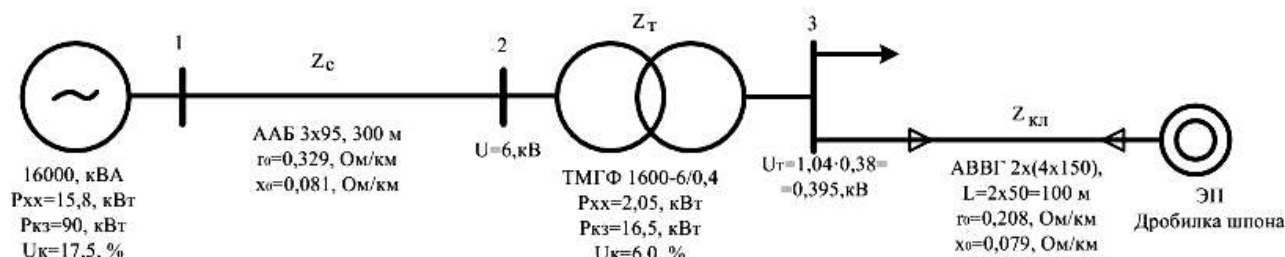


Рис. 1. Схема питания электроприемника барабанной рубильной машины «Дробилка шпона» фанерного производства

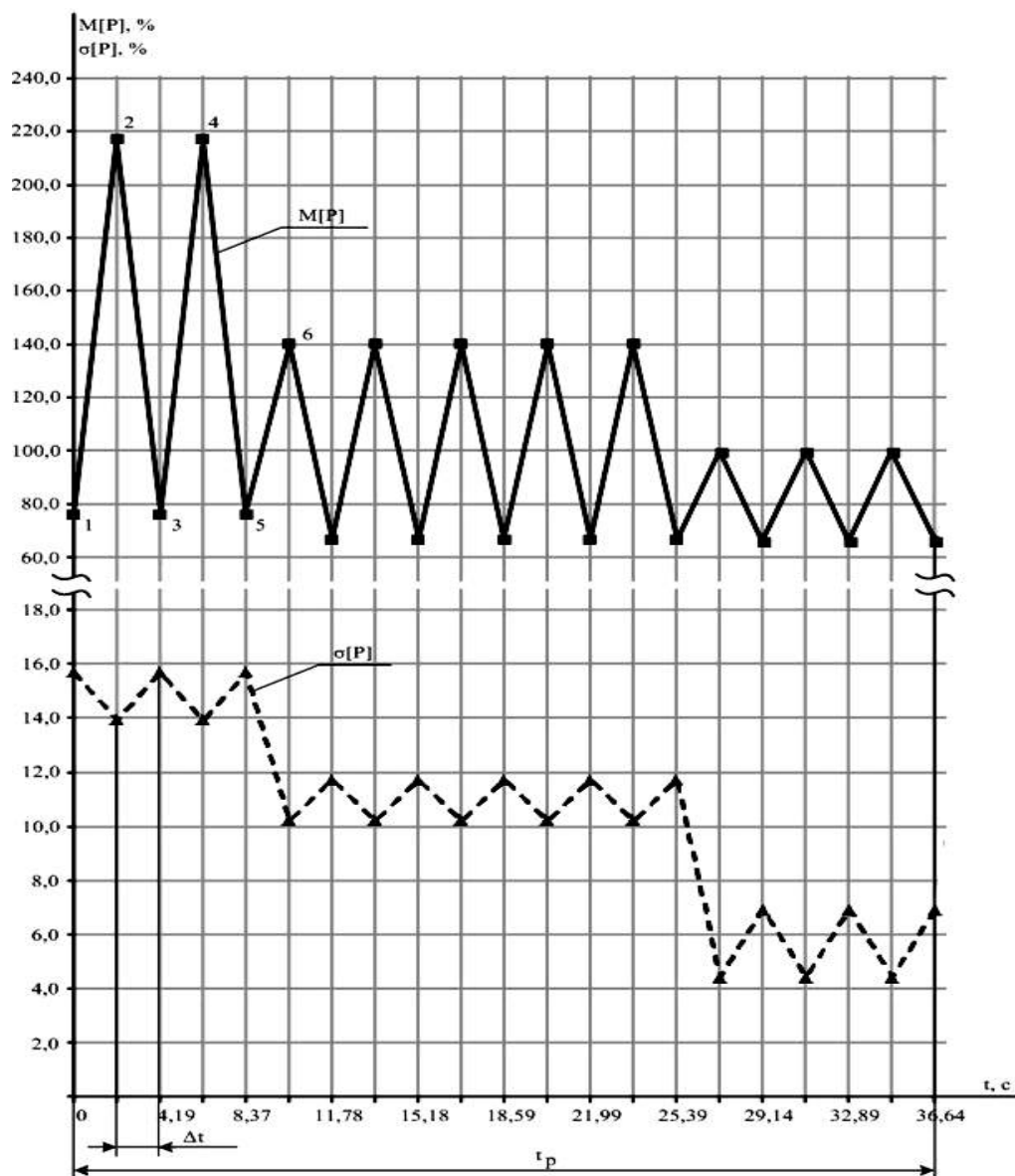


Рис. 2. Полигоны математического ожидания и среднеквадратического отклонения активной мощности рабочего цикла нагрузочной диаграммы электроприемника барабанной рубильной машины «Дробилка шпона» фанерного производства

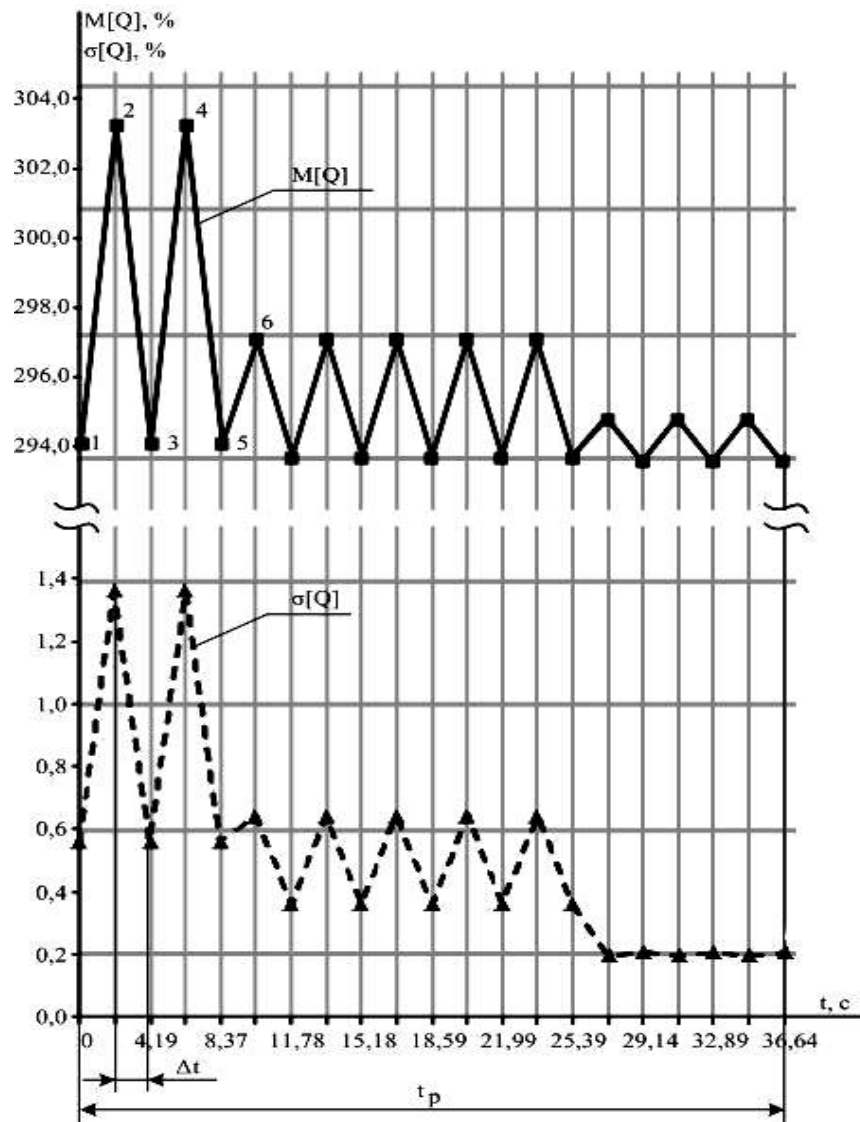


Рис. 3. Полигоны математического ожидания и среднеквадратического отклонения реактивной мощности рабочего цикла нагрузочной диаграммы электроприемника барабанной рубильной машины «Дробилка шпона» фанерного производства

лигоны математического ожидания и среднеквадратических отклонений активной и реактивной мощности электродвигателя электроприемника барабанной рубильной машины «Дробилка шпона».

Приведенные на рис. 2 и 3 графики построены в процентах от средней активной мощности за рабочий цикл $P_{ср}$.

Напряжения сети в какой-либо момент времени $t=t_i$ определяют по известному выражению

$$U(t_i) = U_0 - \Delta U(t_i), \quad (1)$$

где

$$\begin{aligned} \Delta U(t_i) &= \frac{P(t_i)r + Q(t_i)x}{U_0} = \\ &= \Delta U_p + \Delta U_Q = L_p P(t_i) + L_Q Q(t_i). \end{aligned} \quad (2)$$

Таким образом, случайные функции $P(t)$ и $Q(t)$ связаны с потерей напряжения $\Delta U(t_i)$ линейными операторами L_p и L_Q , и напряжение $U(t_i)$ также является слу-

чайным процессом, который предлагается описывать решетчатой моделью. Числовые характеристики напряжения в узлах решетчатой модели предлагается определять по формулам:

$$M[\Delta U(t_i)] = L_p M[P(t_i)] + L_Q M[Q(t_i)], \quad (3)$$

$$\begin{aligned} D[\Delta U(t_i)] &= L_p^2 D[P(t_i)] + \\ &+ L_Q^2 D[Q(t_i)] + 2K[P(t_i), Q(t_i)], \end{aligned} \quad (4)$$

где $K[P(t_i), Q(t_i)]$ – корреляционная функция аргументов $P(t)$ и $Q(t)$.

Поскольку $P(t)$ и $Q(t)$ связаны функционально [8], то

$$\begin{aligned} D[\Delta U(t_i)] &= L_p^2 D[P(t_i)] + L_Q^2 D[Q(t_i)] + \\ &+ 2L_p L_Q \sigma[P(t_i)] \sigma[Q(t_i)], \end{aligned} \quad (5)$$

где t_i – моменты времени, соответствующие вершинам сплайна, $\sigma[P(t_i)]$, $\sigma[Q(t_i)]$ – среднее квадратическое от-

клонение функций $P(t)$ и $Q(t)$ в узлах сплайна.

По формулам (3) и (5) определяют числовые характеристики потери напряжения $\Delta U(t_i)$ в узлах сплайна. Количество экстремумов в графике напряжения равно количеству экстремумов в графике активной мощности, а продолжительность импульсов напряжения Δt равна продолжительности импульсов активной мощности.

По графику изменения напряжения определяются числовые характеристики размахов напряжения $\delta U(t_i)$:

$$\delta U(t_i) = U_i - U_{i+\Delta t}, \quad (6)$$

$$M[\delta U(t_i)] = M[\Delta U(t_i)] - M[\Delta U(t_i + \Delta t)], \quad (7)$$

$$D[\delta U(t_i)] = D[\Delta U(t_i)] + D[\Delta U(t_i + \Delta t)] - 2K[\Delta U(t_i), \Delta U(t_i + \Delta t)]. \quad (8)$$

Поскольку случайные величины $\Delta U(t_i)$ и $\Delta U(t_i + \Delta t)$ являются независимыми, то корреляционная функция $K[\Delta U(t_i), \Delta U(t_i + \Delta t)] = 0$. Окончательно формула (8) примет вид

$$D[\delta U(t_i)] = D[\Delta U(t_i)] + D[\Delta U(t_i + \Delta t)], \quad (9)$$

По методике [4, 9] для каждого размаха $\delta U(t_i)$ вычисляют дозу фликера P_{Sti} , а затем результирующую дозу фликера P_{St} на интервале 10 мин.

ПРИМЕР РАСЧЕТА

В качестве примера выполнен расчет колебания напряжения для одного из исследуемых механизмов - барабанной рубильной машины «Дробилка шпоны», схема электроснабжения которой представлена на рис. 1.

Расчеты выполняются в именованных единицах, поэтому значения координат вершин, представленных на графиках рис. 2 и 3 в процентах от средней мощности за рабочий цикл, должны быть приведены к именованным единицам:

активная мощность, кВт

$$P = \frac{P_{\%}}{100} \cdot P_{cp}; \quad (10)$$

реактивная мощность, квар

$$Q = \frac{Q_{\%}}{100} \cdot P_{cp}, \quad (11)$$

где для электропремника «Дробилка шпоны» $P_{cp} = 26,88$ кВт.

Так, например, для точки экстремума 2 (см. рис. 2, 3):

активная мощность

$$M[P(t_2)] = \frac{216,88}{100} \cdot 26,88 = 58,29 \text{ кВт};$$

реактивная мощность

$$M[Q(t_2)] = \frac{1,85}{100} \cdot 26,88 = 0,497 \text{ квар}.$$

Подробный расчет приведен для первого импульса с экстремумами в точках 1-2-3 (см. рис. 2, 3) выполнен в именованных единицах.

Потери напряжения в точке экстремума 2

$$\Delta U(t_2) = \frac{1}{380} \cdot 0,0067 \cdot 58,29 \cdot 10^3 + \frac{1}{380} \cdot 0,00989 \cdot 2,88 \cdot 10^3 = 1,103 \text{ В}.$$

Напряжения сети в точках 2

$$U(t_2) = 380 - 1,103 = 378,89 \text{ В}.$$

Напряжение базисного узла принято $U_0 = 380$ В.

На рис. 4 в виде полигона математического ожидания приведена огибающая кривой напряжения сети $U(t_i)$, при работе электроприемника «Дробилка шпоны».

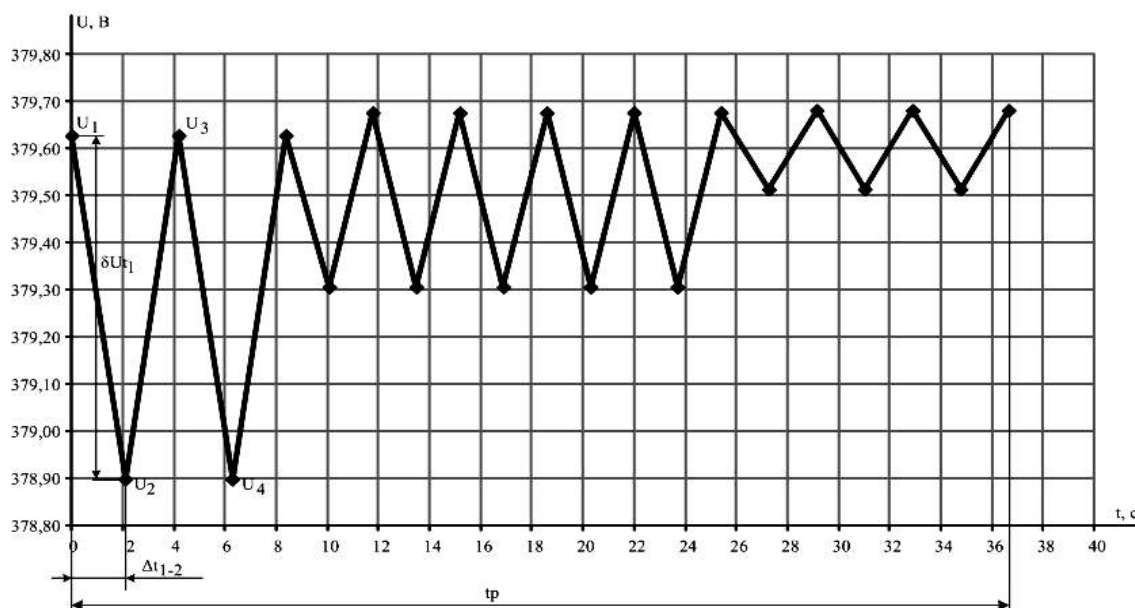


Рис. 4. График математического ожидания огибающей кривой напряжения сети $U(t_i)$, питающего электродвигатель механизма барабанная рубильная машина «Дробилка шпоны»

На **рис. 4** t_p – период времени работы электродвигателя механизма «Дробилка шпона» за цикл, с.

Расчет числовых характеристик напряжения в точке экстремума 2 решетчатой модели **рис. 2, 3**:

– математическое ожидание потери напряжения

$$M[\Delta U(t_2)] = \Delta U(t_2) = 1,103 \text{ В};$$

– дисперсия потери напряжения

$$D[\Delta U(t_2)] = \left(\frac{1}{380} \cdot 0,0067\right)^2 52,09 \cdot 10^6 + \left(\frac{1}{380} \cdot 0,00989\right)^2 0,497 \cdot 10^6 + 2\left(\frac{1}{380} \cdot 0,0067\right) \times$$

$$\times \left(\frac{1}{380} \cdot 0,00989\right) 7,217 \cdot 10^3 \cdot 0,71 \cdot 10^3 = 0,02 \text{ В}^2.$$

Результаты расчета характеристик остальных точек экстремума представлены в **табл. 1**.

По графику изменения напряжения определяются числовые характеристики размахов колебания напряжения $\delta U(t_i)$:

– математическое ожидание

$$M[\delta U(t_1)] = 379,63 - 378,90 = 0,73 \text{ В};$$

– дисперсия

$$D[\delta U(t_1)] = 0,0274 + 0,0212 = 0,0439 \text{ В}^2.$$

В **табл. 2** приведены числовые характеристики для всех размахов колебания напряжения $\delta U(t_i)$, изображенных на **рис. 4**.

Таблица 1

Результаты расчета характеристик точек экстремума решетчатой модели в именованных единицах

Номер точки экстремума	t_i , с	$M[P]$, кВт	$D[P]$, кВт ²	$\sigma[P]$, кВт	$M[Q]$, квар	$D[Q]$, квар ²	$\sigma[Q]$, квар	$M[\Delta U(t_i)]$, В	$D[\Delta U(t_i)]$, В ²	$M[U(t_i)]$, В
1	0	20,544	66,034	8,126	0,407	0,084	0,289	0,373	0,02274	379,63
2	2,093	58,286	52,089	7,217	2,879	0,497	0,705	1,103	0,02120	378,90
3	4,186	20,544	66,034	8,126	0,407	0,084	0,289	0,373	0,02274	379,63
4	6,279	58,286	52,089	7,217	2,879	0,497	0,705	1,103	0,02120	378,90
5	8,37	20,544	66,034	8,126	0,407	0,084	0,289	0,373	0,02274	379,63
6	10,07	37,614	27,987	5,290	1,204	0,111	0,334	0,695	0,01040	379,31
7	11,78	17,937	36,826	6,068	0,299	0,035	0,187	0,324	0,01251	379,68
8	13,48	37,614	27,987	5,290	1,204	0,111	0,334	0,695	0,01040	379,31
9	15,18	17,937	36,826	6,068	0,299	0,035	0,187	0,324	0,01251	379,68
10	16,88	37,614	27,987	5,290	1,204	0,111	0,334	0,695	0,01040	379,31
11	18,59	17,937	36,826	6,068	0,299	0,035	0,187	0,324	0,01251	379,68
12	20,29	37,614	27,987	5,290	1,204	0,111	0,334	0,695	0,01040	379,31
13	21,99	17,937	36,826	6,068	0,299	0,035	0,187	0,324	0,01251	379,68
14	23,69	37,614	27,987	5,290	1,204	0,111	0,334	0,695	0,01040	379,31
15	25,39	17,937	36,826	6,068	0,299	0,035	0,187	0,324	0,01251	379,68
16	27,27	26,723	5,296	2,301	0,600	0,011	0,103	0,487	0,00187	379,51
17	29,14	17,703	12,916	3,594	0,272	0,012	0,107	0,319	0,00438	379,68
18	31,02	26,723	5,296	2,301	0,600	0,011	0,103	0,487	0,00187	379,51
19	32,89	17,703	12,916	3,594	0,272	0,012	0,107	0,319	0,00438	379,68
20	34,77	26,723	5,296	2,301	0,600	0,011	0,103	0,487	0,00187	379,51
21	36,64	17,703	12,916	3,594	0,272	0,012	0,107	0,319	0,00438	379,68

Таблица 2

Числовые характеристики размахов напряжения $\delta U(t_i)$

Номер точки экстремума	$M[\delta U(t_i)]$, В	$D[\delta U(t_i)]$, В ²	Номер точки экстремума	$M[\delta U(t_i)]$, В	$D[\delta U(t_i)]$, В ²
1	0,73	0,0439	11	0,37	0,0229
2	0,73	0,0439	12	0,37	0,0229
3	0,73	0,0439	13	0,37	0,0229
4	0,73	0,0439	14	0,37	0,0229
5	0,32	0,0331	15	0,16	0,0144
6	0,37	0,0229	16	0,17	0,0062
7	0,37	0,0229	17	0,17	0,0062
8	0,37	0,0229	18	0,17	0,0062
9	0,37	0,0229	19	0,17	0,0062
10	0,37	0,0229	20	0,17	0,0062

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Для расчета дозы фликера, создаваемой работой асинхронных двигателей с резкопеременным режимом работы, целесообразно использовать решетчатые модели графиков электрических нагрузок и напряжения сети, интерполированные сплайн-функциями первой степени.

2. Предложенную методику расчета колебаний напряжения можно использовать для расчета дозы фликера, возникающего при работе приемников с резкопеременным режимом работы любых производств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- ГОСТ 32144-2013. Межгосударственный стандарт. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 2013-03-25. М.: Стандартинформ, 2014. 20 с.
- Влияние силового оборудования на изменение колебаний напряжения в системе электроснабжения / Бессолицын А.В., Бакшаева Н.С., Вотинцев А.В., Калинина Е.А. // Перспективы науки. 2012. №11(38). С. 109-116.
- John DeDad, Flicker: Causes, Symptoms, and Cures. Electrical Construction and Maintenance. Jan 1, 2007.
- Жежеленко И.В., Саенко Ю.Л. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 2000. 252 с.
- Olczykowski Z. Methods of determination of the voltage

fluctuations and light flicker at simultaneous operation of three-phase arc furnaces. Electrical Power Quality and utilisation, vol. IX, № 1, 2003.

- Новоселов Н.А., Николаев А.А., Корнилов Г.П. Методика расчета кратковременной дозы фликера в сетях с дуговыми сталеплавильными печами // Промышленная энергетика. 2014. №1, С. 27-31.
- Калинина Е.А. Исследование электрических нагрузок фанерного производства // Фёдоровские чтения - 2015. XLV Международная научно-практическая конференция с элементами научной школы, Москва, 11-13 ноября 2015 г. М., 2015. С. 242-244.
- Черепанов В.В., Калинина Е.А. Определение реактивных нагрузок асинхронных двигателей, работающих в повторно-кратковременном режиме, на стадии проектирования // Автоматизация в электроэнергетике и электро-технике: материалы международной научно-технической конференции г. Пермь, 24-25 сентября 2015 г. Пермь, 2015. С. 229-231.
- ГОСТ Р 51317.3.3-2008. Совместимость технических средств электромагнитная. Ограничение изменений напряжения, колебаний напряжения и фликера в низковольтных системах электроснабжения общего назначения. Технические средства с потребляемым током не более 16 А (в одной фазе), подключаемые к электрической сети при несоблюдении определенных условий подключения. Нормы и методы испытаний. Введ. 2008-12-25. М.: Стандартинформ, 2009. 24 с.
- Вентцель Е.С. Теория вероятностей: учебник для вузов. 4-е изд., стер. М.: Наука, 1969. 576 с

Поступила в редакцию 29 апреля 2016 г.

INFORMATION IN ENGLISH

CALCULATION OF MAINS VOLTAGE FLUCTUATIONS DURING OPERATION OF ASYNCHRONOUS MOTORS WITH VARIABLE LOAD

Vyacheslav V. Cherepanov

D.Sc. (Engineering), Professor, Department of Electric Power Supply, Federal State Budget Institution of Higher Education «Vyatka State University», Kirov, Russia. E-mail: stud2398@yandex.ru.

Ekaterina A. Kalinina

Teaching Assistant, Department of Electric Power Supply, Federal State Budget Institution of Higher Education «Vyatka State University», Kirov, Russia. E-mail: kalininakaterina@bk.ru.

The research objective is creation of a method of calculation of voltage fluctuations arising during operation of asynchronous motors with variable loading. Calculation results of voltage variation necessary for determining the flicker by means of which, according to [1], power quality is estimated. To achieve the goal, pilot studies were executed at the enterprise LLC "Vyatka Plywood Factory" and schedules of change of electric load of the mechanisms working with variable load were obtained. Analysis of the results of the experimental studies showed that loadings graphs solving this problem should be represented by lattice models interpolated spline - functions of the first degree. As an example, the polygons of the expectation and standard of active and reactive power variations of one of the study motor mechanisms are given. Formulas for determining the amounts of voltage characteristics in knots of the lattice model, which is also described by the spline – functions, were offered. According to the proposed method, voltage change calculation was made for one of the mechanisms. Comparison of the results of calculation of flicker were obtained using the developed method, the experiments showed that the calculation error is 8%. The technique is versatile and can be used in the design of other facilities with power-consuming equipment with variable loads.

Keywords: Voltage oscillations, abruptly variable load, flicker dose, asynchronous motor, mathematical expectation, dispersion, random process, trellised model, spline function.

REFERENCES

- State Standard 32144-2013. Interstate standard. Electric Energy. Compatibility of technical equipment. Electric power quality standards in public power-supply systems. Moscow, Standartinform Publ., 2014. 20 p. (In Russian).
- Bessolitsyn A.V., Bakshayeva N. S., Votintsev A.V., Kalinina E.A. Influence of power equipment on change of voltage fluctuations in system of power supply. *Perspektivy nauki* [Prospects of science], 2012, no.11(38), pp. 109-116.
- John DeDad, Flicker: Causes, Symptoms, and Cures. Electrical Construction and Maintenance. Jan 1, 2007.
- Zhezhelenko I.V., Saenko Yu.L. *Pokazateli kachestva elektroenergii i ih control na promyshlennyykh predpriyatiyakh* [Power Quality Ratings and Their Monitoring in Industrial Enterprises], 3rd ed., rev. and ext. Moscow, Energoatomisdat Publ., 2000. 252 p.
- Olczykowski Z. Methods of determination of the voltage fluctuations and light flicker at simultaneous operation of

- three-phase arc furnaces. Electrical Power Quality and utilisation, vol. IX, no.1, 2003.
6. Novoselov N. A., Nikolaev A.A., Kornilov G. P. Method of Calculation of Short-term Flicker in Networks of Electric Arc Furnaces. *Promyshlennaya energetika* [Industrial power], 2014, no.1, pp. 27-31. (In Russian).
 7. Kalinina E.A. Study of Electrical Loads in Plywood Production. *Fedorovskie chteniya - 2015. XLV Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya s elementami nauchnoy shkoly* [Fyedorovskiye Readings 2015, XLV International scientific-practical conference with elements of scientific school], Moscow, 2015, pp. 242-244. (In Russian).
 8. Cherepanov V.V., Kalinina E.A. Determination of Reactive Loads in Asynchronous Motors Working in Recursive Short-time Mode at Design Stage. *Avtomatizatsiya v elektroenergetike i elektrotekhnike: materialy mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Automation in power engineering and electrical engineering, materials of the international scientific conference. Conference Proceedings, Perm (2015)], 2015, pp. 229-231.
 9. State Standard 51317.3.3-2008. Compatibility of technical equipment. Limitation of voltage changes, voltage oscillations and flicker fluctuations in low-voltage general-purpose power supply systems. Technical equipment with input current not exceeding 16A (per phase), connected to the mains of under non-compliance of certain connection conditions. Standards and test methods. Moscow, Standartinform Publ., 2009. 20 p. (In Russian).
 10. Wentzel E.S. *Teoriya veroyatnosti* [Probability Theory]. Moscow, Nauka Publ., 1969. 576 p.

Информация о других журналах издательства

«Автоматизированные технологии и производства» – это рецензируемое научное издание, предназначенное для публикации результатов научно-исследовательских работ, обобщающих исследования в технических отраслях знаний в высших учебных заведениях, научно-исследовательских институтах, крупных промышленных предприятиях, научно-производственных объединениях Российской Федерации, а также зарубежных авторов, и результатов исследований, выполненных по личной инициативе авторов. Журнал публикует научные статьи на русском и английском языках, с результатами научных исследований и практических достижений в области автоматизированных систем по следующим разделам: автоматизированные системы управления технологическими процессами; системы контроля и управления качеством и экологичностью продукции; математическое моделирование и программное обеспечение производственных процессов; технические средства автоматизации технологических процессов и производств; автоматизированные технологии в образовании; информационные системы в автоматизированном производстве.

Научно-технический и производственный журнал «Автоматизированные технологии и производства» включен в российский индекс научного цитирования (РИНЦ) и размещается в научной электронной библиотеке.

Электронная версия журнала доступна:

- на информационном портале ФГБОУ ВО «МГТУ» www.magtu.ru (раздел «Автоматизированные технологии и производства»);
- на платформе eLIBRARY.

Журнал «Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах» основан в 2011 году на базе сборников, которые издавались в период работы кафедры вычислительной техники и прикладной математики (с 2013 кафедры вычислительной техники и программирования): 2003 и 2004 годах – сборник трудов «Новые программные средства для предприятий Урала», в 2005 и 2007 годах – «Создание и внедрение корпоративных информационных систем (КИС) на промышленных предприятиях Российской Федерации»; в 2006 – «Разработка новых программных средств для предприятий Урала».

Журнал публикует научные работы по следующим рубрикам: технические средства обеспечения информационных процессов; обыкновенные дифференциальные уравнения и дифференциальные уравнения с частными производными; математические модели естественных и технических наук; уравнения математической физики; теория систем автоматического управления; теория моделирования; теория информации; искусственный интеллект; системный анализ; общие вопросы автоматики и вычислительной техники; теория автоматического управления; теоретические основы программирования; вычислительные сети; программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и сетей; системы автоматического управления, регулирования и контроля; автоматизированные системы управления технологическими процессами; автоматизация проектирования; автоматизация научных исследований; педагогика и методика подготовки кадров высшей квалификации в области математики, программирования, разработки автоматизированных систем и информационных технологий.

Электронная версия журнала доступна:

- на информационном портале ФГБОУ ВО «МГТУ» www.magtu.ru (раздел «Журнал «Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах»);
- на платформе eLIBRARY.

Газизова О.В., Кондрашова Ю.Н., Малафеев А.В.

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

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМАМИ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ ПРОМЫШЛЕННОГО ЭНЕРГОУЗЛА ЗА СЧЕТ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СТАТИЧЕСКОЙ И ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ КОНФИГУРАЦИИ СЕТИ

Развитие объектов распределенной генерации в промышленных системах электроснабжения приводит к усложнению возможных установившихся эксплуатационных и аварийных режимов. При аварийном или плановом отключении питающих линий или мощных трансформаторов собственных электростанций статическая устойчивость генераторов может снизиться по отношению к нормативным показателям. На основе модифицированного метода последовательного эквивалентирования и метода последовательного утяжеления разработан алгоритм анализа статической устойчивости промышленных генераторов при параллельной работе с энергосистемой. В качестве параметра утяжеления принимается угол ротора генератора. Данный алгоритм положен в основу программного комплекса расчета установившихся режимов и анализа статической устойчивости промышленных систем электроснабжения КАТРАН 9.0. На основе модифицированного метода последовательного эквивалентирования и метода последовательных интервалов разработан алгоритм расчета переходных процессов. Разработанные алгоритмы и программный комплекс позволяют прогнозировать послеаварийные установившиеся режимы, оценивать статическую и динамическую устойчивость промышленных генераторов и при необходимости разрабатывать соответствующие мероприятия. Приведен анализ статической и динамической устойчивости синхронных генераторов на примере системы электроснабжения действующего крупного промышленного предприятия. Замкнутая система электроснабжения содержит генераторы различной мощности и различной электрической удаленности друг относительно друга и энергосистемы. Сделаны выводы о влиянии конфигурации системы электроснабжения на запас статической устойчивости в послеаварийных режимах и динамической устойчивости при изменении конфигурации сети. Даны рекомендации по повышению статической устойчивости узла в послеаварийных режимах. К таким рекомендациям, прежде всего, отнесены коррекция загрузки синхронных генераторов по активной и реактивной мощности в послеаварийных режимах. Определена наилучшая по динамической устойчивости конфигурация сети. Разработанный программный комплекс может быть использован на этапе планирования нормальных, аварийных и послеаварийных режимов оперативно-диспетчерским персоналом электростанций или группами режимов электротехнических лабораторий.

Ключевые слова: распределенная генерация, статическая и динамическая устойчивость, промышленное предприятие, установившийся режим, переходный режим, программное обеспечение, система электроснабжения, линия электропередачи, трансформатор, синхронный генератор.

ВВЕДЕНИЕ

При планировании режимов промышленных электростанций одним из основных условий надежной работы системы электроснабжения является обеспечение статической и динамической устойчивости генераторов и нагрузки в нормальных и послеаварийных режимах [1-4]. Исследованию статической и динамической устойчивости генераторов посвящено большое число работ [5-8]. Однако они ориентированы на крупные энергосистемы, имеющие генераторы большой мощности, соединенные с энергосистемами линиями электропередачи большой пропускной способности [9-13]. Такие исследования допускают эквивалентирование генераторов в пределах одной электростанции или нескольких, расположенных электрически близко по отношению друг к другу, а также учитывают распределенность параметров питающих линий электропередачи [14-16].

При исследовании статической устойчивости промышленных генераторов условия становятся принципиально иными [17, 18]. Прежде всего генераторы электрически удалены друг от друга через трансформаторы и реакторы, имеют различные технические характеристики и питают электродвигатели переменного тока большой мощности. Объединение в этих

условиях не всегда допустимо, поскольку помимо изложенного на устойчивость оказывают влияние автоматические регуляторы возбуждения и скорости, которые могут иметь различные настроечные параметры. Кроме того, в определенных условиях появляется возможность выхода электростанции на раздельную с энергосистемой работу, что требует особого подхода при исследовании подобных режимов. Исследование статической устойчивости также является неотъемлемой частью планирования оптимальных режимов [19, 20]. В связи с этим возникает необходимость исследования статической устойчивости промышленных синхронных генераторов в нормальных и послеаварийных режимах по алгоритму, отличающемуся от алгоритма анализа генераторов крупных энергосистем.

При исследовании динамической устойчивости следует отметить, что проблема обеспечения динамической устойчивости наиболее актуальна в первую очередь для синхронных машин, в частности при возникновении короткого замыкания в линиях электропередачи, и для двигателей при понижении напряжения в питающей сети [21-25].

Исследование проблемы динамической устойчивости синхронной машины состоит как в проверке сохранения синхронизма при заданном нарушении режима, так и в определении предельно допустимого возмущения, при котором машина выпадет из синхро-

низма, т.е. в определении границы динамической устойчивости [26-31].

Вопросы исследования динамической устойчивости электроэнергетических систем можно разделить на три группы [1, 3]: определение параметров режимов, предельных по условиям устойчивости; настройка регулирующих устройств и автоматики; проверка динамической устойчивости при заданных исходных условиях [32, 33].

МЕТОДИКИ

Существующие программные комплексы, упомянутые в [9, 14], ориентированы на крупные энергосистемы и не всегда учитывают особенности промышленных электростанций. На кафедре электроснабжения промышленных предприятий МГТУ им. Носова создан программный комплекс «КАТРАН 9.0», позволяющий оценивать статическую и динамическую устойчивость синхронных генераторов в различных режимах работы.

В основу программного комплекса для исследования статической устойчивости положен алгоритм, основанный на сочетании методов последовательного эквивалентирования и последовательного утяжеления [34-36]. Метод последовательного эквивалентирования применен для расчета установившихся режимов промышленных систем электроснабжения, содержащих большое число генераторов и несколько точек связи с электроэнергетической системой. Метод последовательного утяжеления применен для анализа статической устойчивости генераторов с учетом условий связи с энергосистемой. Так, при параллельной работе с энергосистемой в расчетную схему вводится узел неизменного напряжения и увеличивать нагрузку для определения предельного режима работы не имеет смысла. Поэтому при параллельной работе сначала рассчитывается установившийся режим, из которого определяются углы роторов и ЭДС генераторов исследуемой электростанции. После этого выбирается синхронный генератор, у которого увеличивают с заданным шагом угол ротора. Для каждого нового угла производят свой расчет установившегося режима. По полученным результатам строится угловая характеристика генератора и делается вывод о коэффициенте запаса статической устойчивости. При необходимости учитываются ограничения по вырабатываемой активной и реактивной мощности. Максимальную электромагнитную мощность генератора определяют при помощи угловых характеристик. Мощность турбины принимают из исходного установившегося режима. Алгоритм анализа статической устойчивости при параллельной работе приведен на **рис. 1**.

Для исследования динамической устойчивости используется сочетание методов последовательного эквивалентирования и последовательных интервалов.

Исследование статической и динамической устойчивости проводилось на примере промышленных электростанций Магнитогорского энергетического узла. Схема его электрических соединений приведена на **рис. 2**.

Данный объект является удобным для исследований, поскольку содержит большое число электростанций, линии электропередачи напряжением 10-220 кВ и имеет кольцевую конфигурацию. Как показано на ри-

сунке, кольцо 110 кВ является разомкнутым с целью снижения токов короткого замыкания. Как показали расчеты, размыкание кольца не оказало существенного влияния на запас статической устойчивости. При этом образовались два замкнутых контура 110 кВ с перенесением связи ТЭЦ и ЦЭС в сети 220 кВ. Кольцо 220 кВ является замкнутым. В состав исследуемого энергетического узла входят три промышленных электростанции – центральная (ЦЭС), паровоздуховная (ПВЭС-2) и теплофикационная (ТЭЦ). Все электростанции имеют различные схемы выдачи мощности, что представляет интерес для исследования статической и динамической устойчивости. Генераторы включены в различные точки сети, имеют различные значения углов роторов и разнотипные (**табл. 1**). Результаты анализа статической устойчивости были в нормальном режиме работы приведены в **табл. 1**.

Как видно из **табл. 1**, коэффициент запаса статической устойчивости при заданной нагрузке генераторов лежит в нормативных пределах для всех генераторов, кроме генератора № 1 ПВЭС-2. Как будет показано ниже, этот генератор имеет наибольшую электрическую удаленность от электроэнергетической системы, чем объясняются полученные результаты. Как показали расчеты, повышения устойчивости можно добиться даже небольшим снижением загрузки по активной мощности, повышением по реактивной, а также использованием устройств РПН и ПБВ трансформаторов связи с энергосистемой.

Далее с целью анализа статической устойчивости рассчитывались режимы, при которых отключается одна из линий связи электростанций. На **рис. 3, 4** приведены упрощенные однолинейные схемы ТЭЦ, ЦЭС и ПВЭС-2, где указаны отключаемые линии.

Результаты расчетов представлены в **табл. 2**. Сравнивая данный режим с нормальным установившемся режимом для ТЭЦ, можно сделать вывод, что отключение линии практически не повлияло на статическую устойчивость, поскольку коэффициенты запаса остались прежними. Что касается генераторов ЦЭС, можно сделать вывод, что статическая устойчивость незначительно снижается. На ПВЭС-2 недостаточным запасом статической устойчивости обладает ТГ-1. Далее были исследованы режимы при одновременном отключении питающей линии и трансформатора электростанции. Результаты расчета сведены в **табл. 3**.

При одновременном отключении силового трансформатора и питающей линии на ТЭЦ у большинства генераторов запас по статической устойчивости практически не меняется, тогда как генератор ТГ-2 близок к нарушению устойчивости, а у генератора ТГ-3 запас статической устойчивости снизился, но остался в пределах нормы. На ЦЭС малым запасом устойчивости обладают генераторы ТГ-2, ТГ-5, ТГ-6, а у остальных генераторов запас по устойчивости находится в допустимых пределах. Генератор ТГ-1 на ПВЭС-2 неустойчив. На ЦЭС у генераторов ТГ-5, ТГ-8 коэффициент запаса по статической устойчивости близок к минимальному значению. На ТЭЦ устойчивость сохраняется на всех генераторах, а на ПВЭС-2 ухудшается устойчивость генераторов ТГ-1 и ТГ-4. Таким образом, в послеаварийных режимах статическая устойчивость генераторов снижается.

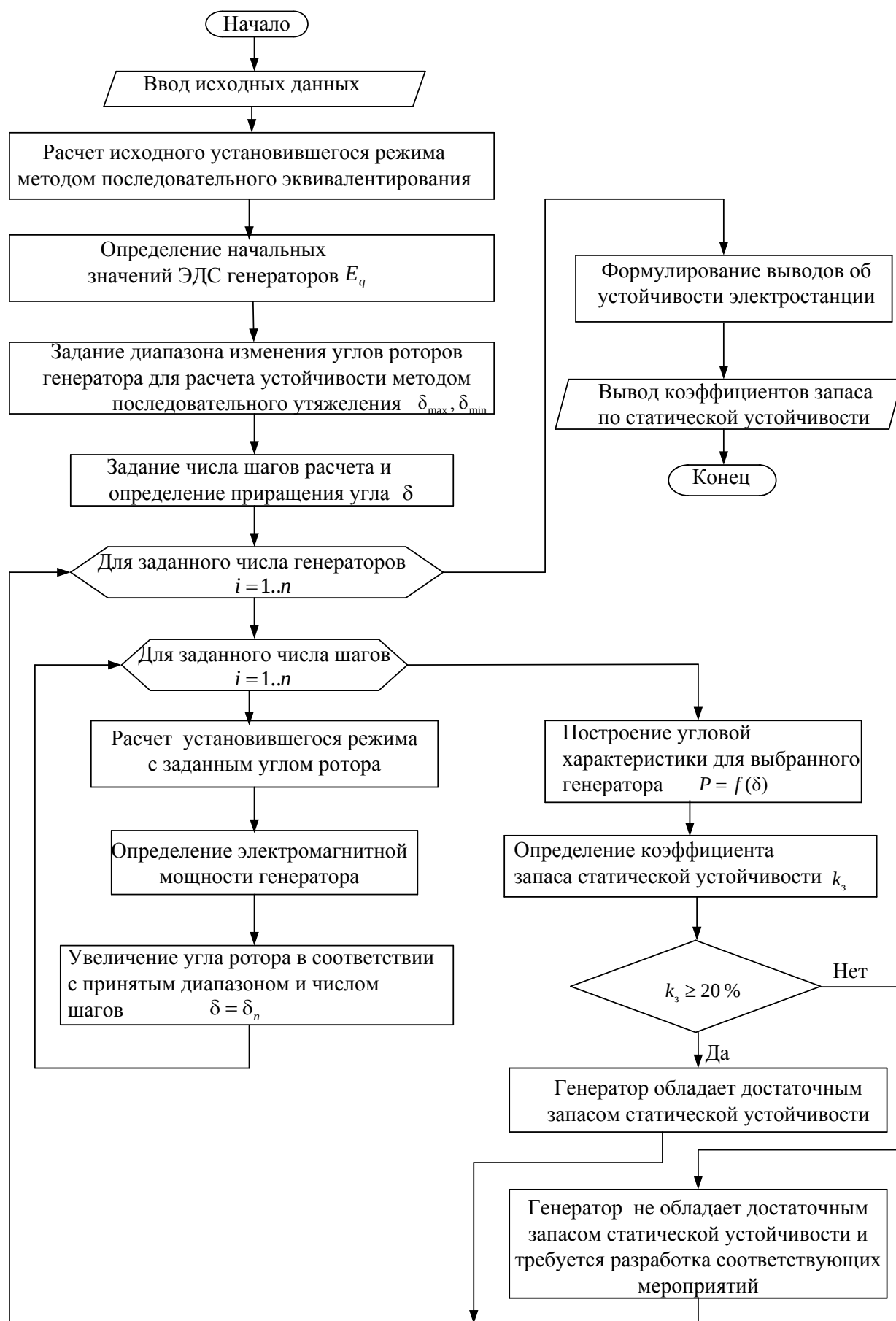


Рис. 1. Алгоритм анализа статической устойчивости синхронных генераторов при параллельной работе с энергосистемой



Нормальный режим работы генераторов

30

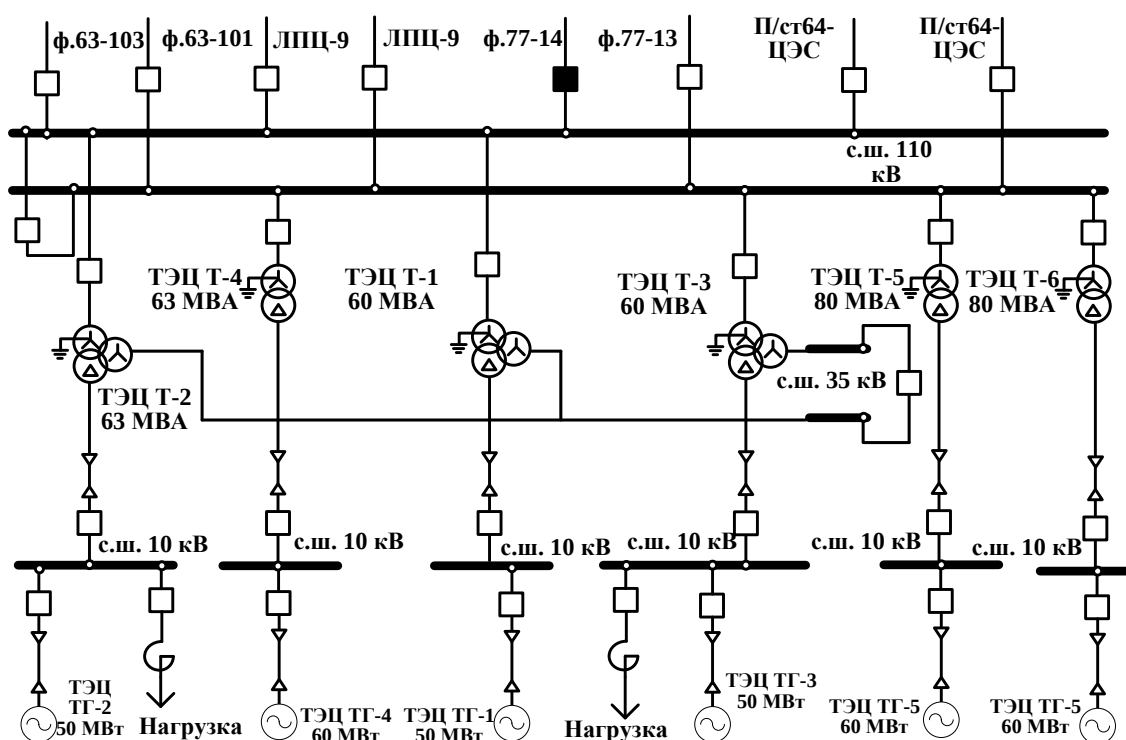


Рис. 3. Упрощенная однолинейная схема ТЭЦ с отключенным фидером ф.77-14

Таблица 2

Результаты расчета при отключении линий связи

Электростанция	ТЭЦ			ЦЭС		
Отключаемый фидер	Отключен ф.14, ПС 77			Отключен ф.14, ПС 30		
Искомые параметры	$P_{\max}$, МВт	P_T , МВт	k_3 , %	$P_{\max}$, МВт	P_T , МВт	k_3 , %
ТГ-1	94,98	49,839	90,5	19,9	11,84	68,0
ТГ-2	90	51,896	73,4	21,23	12,25	73,3
ТГ-3	92,22	52,585	75,4	71,4	41,24	73,1
ТГ-4а	85,41	62,406	36,8	12,71	5,68	123,8
ТГ-4б	-	-	-	12,67	5,63	125,0
ТГ-5	82,6	59,44	39	50,44	28,01	80
ТГ-6	89,22	58,881	51,5	47,3	27,4	72,6
ТГ-7	-	-	-	50,93	29,00	75,6
ТГ-8	-	-	-	67,74	42,2	60,5
Электростанция	ПВЭС - 2			ПВЭС - 2		
Отключаемый фидер	Отключен ф.160, ЦЭС			Отключен ф.22 ПС 30		
Искомые параметры	$P_{\max}$, МВт	P_T , МВт	k_3 , %	$P_{\max}$, МВт	P_T , МВт	k_3 , %
ТГ-1	33,5	31,04	5	-	-	-
ТГ-2	34,92	22,065	58,73	-	-	-
ТГ-3	-	-	-	22,22	12,085	84,1
ТГ-4	-	-	-	47,81	31,88	50

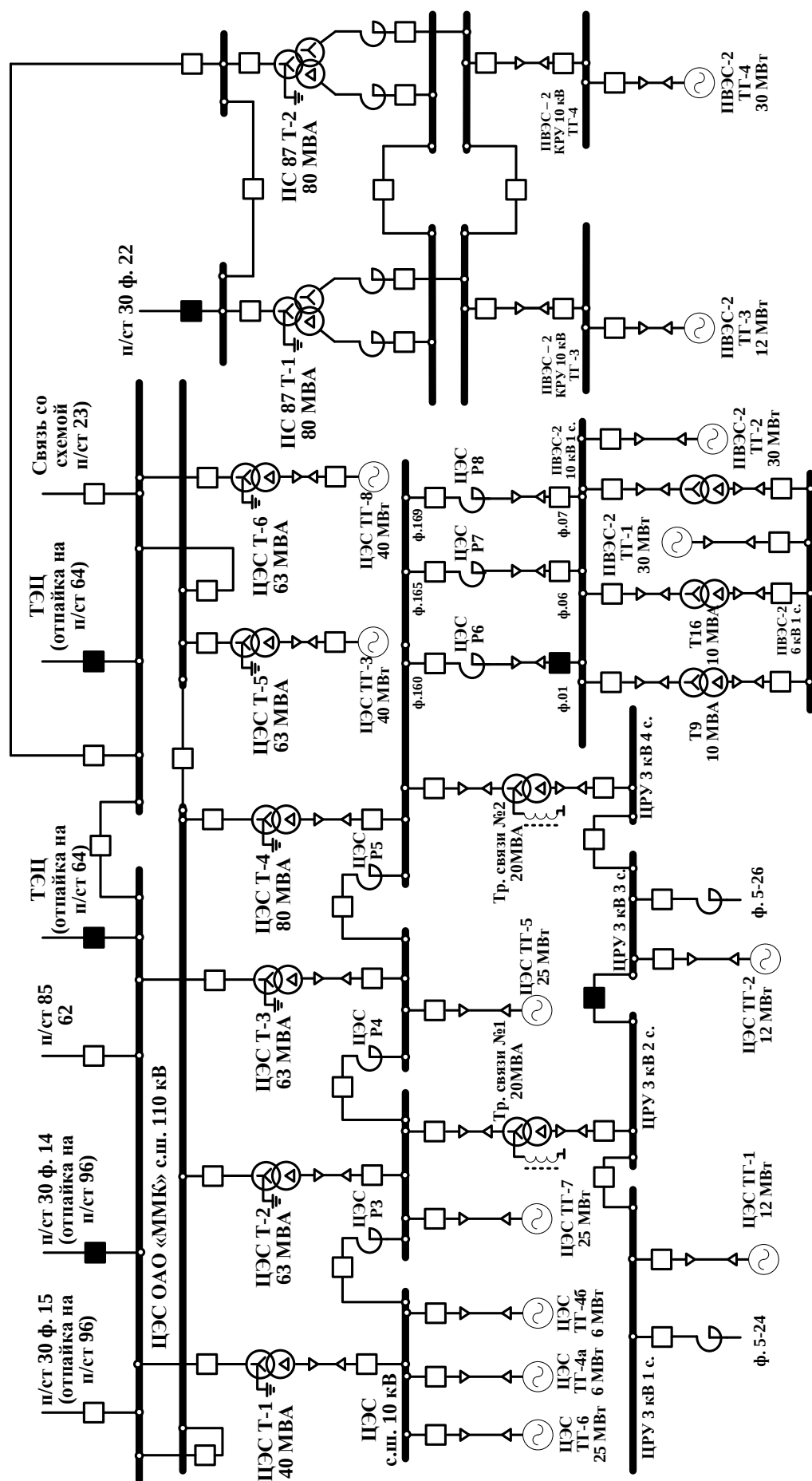


Рис. 4. Упрощенная однолинейная схема ЦЭС и ПВЭС-2 с отключенными фидерами

Таблица 3

Результаты расчета при отключении линий связи и трансформаторов

Электростанция	ТЭЦ			ЦЭС		
Отключаемый фидер	Отключен ф.14, ПС 77 + Отключен силовой трансформатор Т2			Отключен ф.14, ПС 30 + Отключены силовые трансформаторы Т1, Т3, Т4		
Искомые параметры	$P_{\max}$, МВт	P_T , МВт	k_3 , %	$P_{\max}$, МВт	P_T , МВт	k_3 , %
ТГ-1	99	49,839	98,6	19,17	11,84	62,0
ТГ-2	64,6	51,896	24,5	14,62	12,25	19,3
ТГ-3	76,75	52,585	46	72,15	41,24	75,0
ТГ-4а	85,8	62,406	37,4	9,82	5,68	72,9
ТГ-4б	-	-	-	9,79	5,63	73,9
ТГ-5	83,0	59,44	39,6	36,68	28,01	31,0
ТГ-6	89,64	58,881	52,2	33,75	27,4	23,1
ТГ-7	-	-	-	47,48	29,00	63,7
ТГ-8	-	-	-	68,36	42,2	62,0
Электростанция	ПВЭС - 2			ПВЭС - 2		
Отключаемый фидер	Отключен ф.160, ЦЭС + Отключен силовой трансформатор Т9			Отключен ф.22 ПС 30 + Отключен силовой трансформатор Т2 (ПС 87)		
Искомые параметры	$P_{\max}$, МВт	P_T , МВт	k_3 , %	$P_{\max}$, МВт	P_T , МВт	k_3 , %
ТГ-1	31,86	31,04	3,21	-	-	-
ТГ-2	34,78	22,065	58,23	-	-	-
ТГ-3	-	-	-	20,73	12,085	71,61
ТГ-4	-	-	-	42,75	31,9	34

Разработанный программный комплекс позволяет выполнить оценку не только пределов статической устойчивости, но и динамической устойчивости генераторов собственных электростанций, при этом существенное влияние на динамическую устойчивость оказывает структура построения системы электроснабжения ОАО «ММК». Поскольку она имеет сложную замкнутую конфигурацию электрической сети, то возможно большое количество оперативных состояний, каждое из которых будет характеризоваться различной степенью устойчивости.

В работе рассмотрены следующие варианты: вариант 1 – кольцевая сеть замкнута; вариант 2 – кольцевая сеть разомкнута по существующей схеме; вариант 3 – кольцевая сеть поделена на два параллельных кольца путем отключения шиносоединительных выключателей на всех РУ-110 кВ; вариант 4 – деление кольцевой сети на узлы ЦЭС-ПС 30-ПС 96; ПС 90-ПС 63; ПС 77-ТЭЦ, ПС 60, связанные только по напряжению 220 кВ.

Исследование режимов КЗ с точки зрения анализа устойчивости заключается в анализе поведения синхронных генераторов, а также синхронных и асинхронных двигателей собственных нужд непосредственно в процессе КЗ и после его ликвидации. Для комплексной оценки той или иной конфигурации схемы с учетом режимов работы коммутационных аппаратов и токоведущих частей в работе проведен расчет и анализ значений токов КЗ и величин остаточных напряжений в сети 110 кВ. Для каждой из точек КЗ было выявлено предельное время отключения, при превышении которого нарушается динамическая устойчивость работы синхронных или асинхронных машин. В табл. 4 с учетом конфигурации внешней сети при КЗ на шинах 110 кВ ТЭЦ показано поведение генераторов ТЭЦ, приведены предельные времена отключения КЗ, поте-

ри активной мощности. Очевидно, рассматриваемые варианты практически равноценны по показателям динамической устойчивости. Вариант 3 обладает большей устойчивостью для ТГ-4,5,6, что объясняется их меньшей электрической удаленностью от точки короткого замыкания (Т-4,Т-5,Т-6 имеют меньшее значение u_k – 11,5 вместо 11,78%).

Аналогичным образом была исследована устойчивость генераторов ЦЭС (табл. 5).

Как видно из табл. 5, рассматриваемые варианты практически равноценны по показателям динамической устойчивости. Наибольшим предельным временем обладает вариант 3, где изменение углов роторов генераторов ЦЭС носит затухающий характер, хотя в других вариантах наблюдается раскачивание. Наибольшей динамической устойчивостью обладают варианты 2 и 3. При ТКЗ на сборных шинах 110 кВ ЦЭС-ПВЭС-2 наименее динамически устойчивыми являются ТГ-5,6,7 ЦЭС за счет электрической приближенности к точке ТКЗ. В вариантах 2 и 3 за счет отключения ШСВ осуществляется разделение вышеперечисленных наименее динамически устойчивых генераторов по секциям сборных шин, что исключает одновременное раскачивание этих генераторов и улучшает динамическую устойчивость всей схемы.

Наилучшей динамической устойчивостью при ТКЗ на сборных шинах 110 кВ ЦЭС будет обладать вариант 3, поскольку имеет большее предельное время отключения ТКЗ 0,5-0,6 с и меньшее отклонение углов роторов генераторов по сравнению с другими вариантами, где предельное время отключения ТКЗ 0,4 с. Изменение углов роторов приведено на рис. 5.

Исследование режима ТКЗ на шинах 110 кВ при различной конфигурации сети показало, что наилучшей динамической устойчивостью обладает вариант 3,

т.к. предельное время отключения ТКЗ было наибольшим, а наихудшей – вариант 4, кроме случая ТКЗ на ПС 60 и ПС 30. Также было выяснено, что отключение ШСВ на узловых подстанциях и замыкание кольца 110 кВ улучшают динамическую устойчивость. Максимальные углы роторов синхронных генераторов при ТКЗ в различных точках системы при изменении конфигурациях сети 110 кВ существующей схемы МЭУ наблюдаются у ТГ-4, исключением является ТКЗ на

ТЭЦ на I секции шин 110 кВ в варианте 3, где наибольший угол имеет ТГ-6.

Для повышения надежности работы электрооборудования системы электроснабжения и увеличения срока службы кроме проверки устойчивости необходимо выполнить прогнозирование остаточного ресурса и разработать рекомендации по выполнению текущих и планово-предупредительных ремонтов [37-40].

Таблица 4

Критерии оценки конфигурации схемы сети 110 кВ на примере генераторов ТЭЦ при коротком замыкании на шинах РУ-110 кВ

Схема сети 110 кВ	Максимальный угол ротора турбогенератора, град.	Предельное время отключения короткого замыкания, с	Потери активной мощности в сетях МПУ, МВт
Вариант 1	92 (ТГ-5)	0,3	11,44
Вариант 2	93 (ТГ-4,5)	0,3	14,89
Вариант 3 1 с.ш.	88 (ТГ-1)	0,6	12,59
Вариант 4	105 (ТГ-4), процесс затухает; 112 (ТГ-5), процесс затухает; 97 (ТГ-6), процесс затухает и вновь начинается раскачивание	0,3	15,03

Таблица 5

Критерии оценки конфигурации схемы сети 110 кВ на примере генераторов ЦЭС при коротком замыкании на шинах РУ-110 кВ

Схема сети 110 кВ	Максимальный угол ротора турбогенератора, град.	Предельное время отключения короткого замыкания, с	Потери активной мощности в сетях МПУ, МВт
Вариант 1	98 (ТГ-5,7), процесс затухает	0,3	11,44
Вариант 2	98 (ТГ-7), процесс затухает	0,3	14,89
Вариант 3	124 (ТГ-8) процесс монотонно затухает; 94 (ТГ-5) процесс монотонно затухает	0,4	12,59
Вариант 4	98 (ТГ-5), процесс затухает и вновь начинается раскачивание; 98 (ТГ-8), процесс монотонно затухает	0,3	15,03

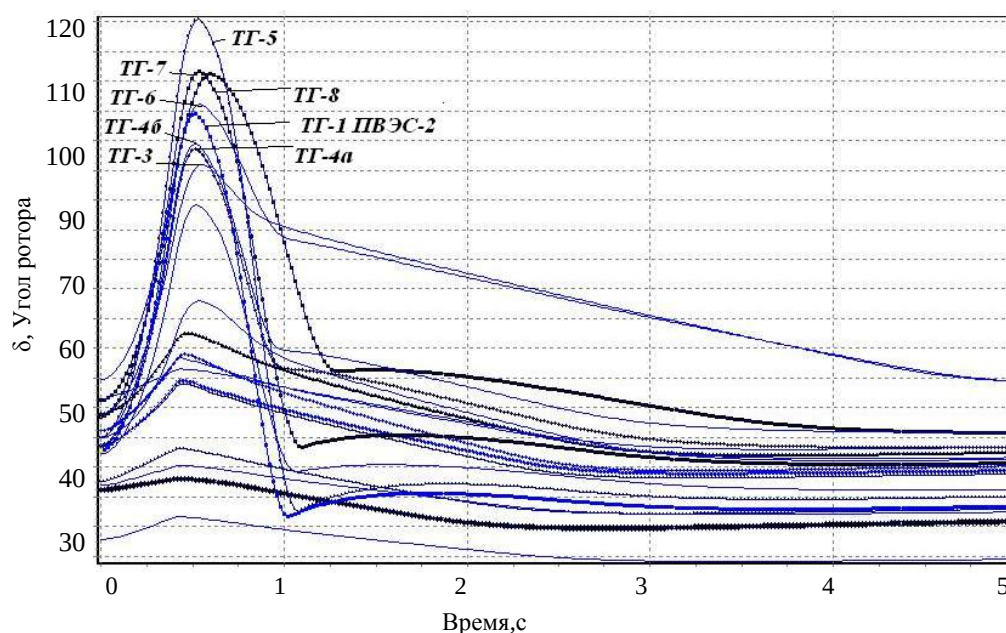


Рис. 5. Собственные углы роторов генераторов при коротком замыкании на I с.ш. РУ-110 кВ ЦЭС для $t_{\text{предел.откл.}}=0,5$ с (вариант 3)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, разработанные алгоритм и программное обеспечение позволяют исследовать статическую и динамическую устойчивость промышленных синхронных генераторов при параллельной работе с электроэнергетической системой применительно к различным конфигурациям сети любой сложности, наличию большого числа собственных генераторов и нескольких точек связи с энергосистемой. Результаты расчетов дают возможность выявлять в различных эксплуатационных режимах наименее устойчивые генераторы и разрабатывать мероприятия по повышению статической и динамической устойчивости в нормальных и послеаварийных режимах работы. Например, изменять загрузку синхронного генератора по активной и реактивной мощности с целью снижения угла ротора генератора в установившемся режиме, а также изменять, по возможности, положение отпаек трансформаторов связи с энергосистемой с целью изменения напряжения сети и, как следствие, повышения статической устойчивости генераторов. Кроме того, появляется возможность определять наилучшую по динамической устойчивости конфигурацию сети. Разработанный программный комплекс может быть использован на этапе планирования нормальных, аварийных и послеаварийных режимов оперативно-диспетчерским персоналом электростанций или группами режимов электротехнических лабораторий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жданов П.С. Вопросы устойчивости энергетических систем / под ред. Л.А. Жукова. М.: Энергия, 1979. 456 с.
2. Kothari D.P., Nagrath I.J. Power System Engineering. Second Edition. New Delhi: Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, 2008.
3. Кимбарк Э. Синхронные машины и устойчивость электрических систем. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1960. 392 с.
4. Андерсон П., Фуад А. Управление энергосистемами и устойчивость / пер. с англ. под ред. Я.Н. Лугинского. М.: Энергия, 1980. 568 с.
5. Xiufeng S., Shiguang M. Research on Measures to Improve Stability of the Power System. Applied Mechanics and Materials, vol. 742 (2015), pp 648-652.
6. 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, iss. 10, pp. 977-985.
7. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. 2-е изд. М.: Высшая школа, 1970. 472 с.
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. 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.
10. Boudour M., Hellal A. Power System Dynamic Security Mapping Using Synchronizing and Damping Torques Technique. The Arabian Journal for Science and Engineering, vol.30, no.1B.
11. Савалов С.А., Семенов В.А. Противоаварийное управление в энергосистемах. М.: Энергоатомиздат, 1988. 416 с.
12. Барзам А.Б. Системная автоматика. М.: Энергия, 1973. 392 с.
13. 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.
14. 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.
15. Zhang R., Xu Y., Dong Z.Y., Wong K.P. Post-disturbance transient stability assessment of power systems by a self-adaptive intelligent system. The Institution of Engineering and Technology IET Gener. Transm. Distrib., 2015, vol. 9, iss. 3, pp. 296-305.
16. 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, no.10-3, pp.276-291.
17. Анализ статической устойчивости генераторов / А.В. Малафеев, О.В. Газизова, А.В. Кочкина, Е.А. Гринчак // Главный энергетик. 2013. № 7. С. 17-25.
18. Ачитаев А.А., Удалов С.Н., Юманов М.С. Повышение запаса регулировочной способности генераторов в энергетических системах с распределенной генерацией // Электротехника. Электротехнология. Энергетика сборник научных трудов VII Международной научной конференции молодых ученых / Новосибирский государственный технический университет Межвузовский центр содействия научной и инновационной деятельности студентов и молодых ученых Новосибирской области. Новосибирск, 2015. С. 8-10.
19. 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.
20. 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. International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS). 2015.
21. Расчет динамических характеристик синхронных и асинхронных двигателей промышленных предприятий с целью анализа устойчивости систем электроснабжения / Игуменцев В.А., Малафеев А.В., Буланова О.В., Ротанова Ю.Н. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2006. №2. С.71.-75.
22. 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.
23. 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.
24. 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.
25. 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.
26. Xu Y., Dong Z.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.
 27. Удалов С.Н. Приступ А.Г., Ачитаев А.А. Исследование магнитной трансмиссии с переменным передаточным отношением в ветроэнергетической установке в целях повышения запаса динамической устойчивости // Известия Томского политехнического университета. 2015. Т. 326. № 10. С. 123-134.
 28. Удалов С.Н., Ачитаев А.А., Юманов М.С. Исследование режимов работы ветроэнергетической установки на базе электромагнитной трансмиссии в составе автономной системы электроснабжения // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2015. №5. С. 32-35.
 29. Shevchenko A.F., Pristup A.G., Novokreshchenov O.I., Toporkov D.M., Korneev V.V. Construction and Design Features of Permanent Magnet electric Motors for General Industrial Purposes. Russian Electrical Engineering, 2014, vol.85, no. 12, pp. 748-751.
 30. Гамазин С.И., Ставцев В.А., Цырук С.А. Переходные процессы в системах промышленного электроснабжения, обусловленные электродвигательной нагрузкой М.: Изд-во МЭИ, 1997. 424 с.
 31. 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.
 32. Малафеев А.В., Панова Е.А. Алгоритм расчета сложно-несимметричных режимов систем электроснабжения промышленных предприятий // Главный энергетик. 2011. №3. С.35-39.
 33. 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.
 34. 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.
 35. 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.
 36. Kornilov G.P., Panova E.A., Varganova A.V. The Algorithm of Economically Advantageous Overhead Wires Cross Section Selection Using Corrected Transmission Lines Mathematical Models. Procedia Engineering, 2015, vol.129, pp. 951-955.
 37. 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.
 38. Методика прогнозирования остаточного ресурса электрооборудования при эксплуатации / Одинцов К.Э., Ротанова Ю.Н., Карандаева О.И., Мостовой С.Е., Шилиев П.В. // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2010. №3-1. С.192-198.
 39. 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.
 40. Karandaev A.S., Khrumshin 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. Proceedings of 2014 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems, MEACS, 2014, pp. 1-6.

Поступила в редакцию 17 мая 2016 г.

INFORMATION IN ENGLISH

INCREASE OF EFFECTIVE MANAGEMENT OF MODES OF ELECTRIC POWER PLANTS DUE TO FORECASTING OF STATIC AND DYNAMIC STABILITY AT CHANGE OF NETWORK CONFIGURATION

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.

Yuliya N. Kondrashova

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.

Aleksey V. Malafeev

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.

Development of objects of distributed generation in industrial systems of power supply leads to the complication of the possible set of operational and emergency modes. At emergency or planned shutdown of the feeding lines or powerful transformers of internal power plants static stability of generators can decrease in relation to standard indicators. On the basis of the modified

method of a consecutive equivalent and a method of consecutive weighting the analysis algorithm of static stability of industrial generators is developed during parallel operation with a power supply system. Generator rotor angle is accepted as the parameter of weighting. This algorithm is the basis for a program complex of calculation of the set modes and the analysis of static stability

of industrial systems of power supply КАТРАН 9.0. On the basis of the modified method of a consecutive equivalent and a method of consecutive intervals, the algorithm of calculation of transition processes is developed. The developed algorithms and program complex make it possible to predict the postemergency set operation, to estimate static and dynamic stability of industrial generators and if necessary to develop the relevant activities. The analysis of static and dynamic stability of synchronous generators on the example of the system of power supply of the operating large industrial enterprise is provided. The closed system of power supply contains generators of various power and various electric remoteness from each other and power supply systems. Conclusions are drawn on the influence of a configuration of system of power supply on a stock of static stability in postemergency operation and dynamic stability at the change of the network configuration. Recommendations about the increase of static stability of the knot in the emergency operation are made. First of all, it is recommended to adjust the load of synchronous generators on active and reactive power in postemergency operation. The best network configuration on dynamic stability is defined. The developed program complex can be used at the stage of planning for normal, emergency and postemergency operation by the quick and dispatching personnel of power plants or groups of the modes of electrotechnical laboratories.

Keywords: Distributed generation, static and dynamic stability, industrial enterprise, set mode, transient regime, software, system of power supply, power line, transformer, synchronous generator.

REFERENCES

- Zhdanov, P.S. *Voprosy ustoychivosti energeticheskikh system* [Questions of Stability of Power Systems]. Moscow, Energy Publ., 1979. 456 p.
- Kothari D.P., Nagrath I.J. *Power System Engineering*. Second Edition. New Delhi: Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, 2008.
- Kimbark E. *Sinkhronnye mashiny i ustoychivost elektricheskikh system* [Synchronous Machines and Stability of Electrical Systems]. Moscow-Leningrad, Gosenergoizdat Publ., 1960. 392 p.
- Anderson P. Fuad A. *Upravlenie energosistemami i ustoychivost* [Control and Stability of Power Supply Systems]. Moscow, Energy Publ., 1980. 568 p.
- Xiufeng S., Shiguang M. Research on Measures to Improve Stability of the Power System. *Applied Mechanics and Materials*, vol. 742 (2015), pp 648-652.
- 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, iss. 10, pp. 977-985.
- Venikov V.A. *Perehodnye elektromekhanicheskie protsessy v elektricheskikh sistemah* [Transient Electromechanical Phenomena in Electrical Systems]. 2-nd ed. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1970. 472 p.
- Malafeev A.V., Bulanova O.V., Rotanova Yu.N. Research of Dynamic Stability of Industrial Power Systems with Internal Power Stations at Separation from the 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).
- 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.
- Boudour M., Hellal A. Power System Dynamic Security Mapping Using Synchronizing and Damping Torques Technique. *The Arabian Journal for Science and Engineering*, vol.30, no.1B.
- Sovalov S.A., Semenov V.A. *Protivoavariynoe upravlenie v energosistemah* [Antiemergency Control in Power Supply Systems]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1988. 416 p.
- Barzam A.B. *Sistemnaya avtomatika* [System Automatic Equipment]. Moscow, Energy Publ., 1973. 392 p.
- 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.
- 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.
- Zhang R., Xu Y., Dong Z.Y., Wong K.P. Post-disturbance transient stability assessment of power systems by a self-adaptive intelligent system. *The Institution of Engineering and Technology IET Gener. Transm. Distrib.*, 2015, vol. 9, iss. 3, pp. 296-305.
- 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, no.10-3, pp.276-291.
- Malafeev A.V., Gazizova O.V., Kochkina A.V., Grinchak E.A. Analysis of Static Stability of Synchronous Generators. *Glavnyy energetik* [Chief Power Engineer], 2013, no.7, pp.17-25. (In Russian).
- Achitaev A.A., Udalov S.N., Yumanov M.S. Increase of Adjusting Ability of Generators in Power Systems with Distributed Generation. *Elektrotekhnologiya. Energetika sbornik nauchnykh trudov VII Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii molodykh uchenykh. Novosibirskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiiy universitet Mezhvuzovskiy tsentr sodeystviya nauchnoy i innovatsionnoy deyatel'nosti studentov i molodykh uchenykh Novosibirskoy oblasti* [Electrical engineering. Electrotechnology. Power engineering collection of scientific works of the VII International scientific conference of young scientists. Novosibirsk state technical university Interuniversity center of assistance of scientific and innovative activities of students and young scientists of the Novosibirsk region], Novosibirsk, 2015, pp 8-10. (In Russian).
- Malafeev A.V., Khlamova A.V., Krasnov M.I. Optimization of Loading of Generators of Power Stations of OJSC MMK Taking into Account Losses of Active Power on Distributive Network by Decomposition of the General Task. *Glavnyy energetik* [Chief Power Engineer], 2011, no.3, pp. 54-57.
- 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. *International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS)*. 2015.
- Igumenshchev V.A., Malafeev A.V., Bulanova O.V., Rotanova Yu.N. Calculation of Response Characteristics of Synchronous and Asynchronous Motors of Industrial Enterprises for the Purpose of Analysis of Stability of Systems of Electrical Power Supply. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2006, no.2, pp.71-75.
- Malafeev A.V., Karandaeva O.I., Rotanova Yu.N., Bulanova O.V. Influence of High-voltage Motors of Internal Needs on Reliability of System of Electrical Power Supply of Internal Needs of CHPP JSC MMK. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical systems and complexes], 2009, no.17, pp.96-104.
- Kondrashova Yu.N., Gazizova O.V., Gladysheva M.M.,

- Galliulin I.M. Research of Influence of Implementation of the Perspective Air-line on Modes of the Industrial Energetic Hub. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal* [International scientific research journal], 2014, no.4-2(23), pp. 35-37.
24. Malafeev A.V., Bulanova O.V., Panova E.A., Grigor'eva M.V. Analysis of Modes of Asymmetrical Short Circuits in Complex Systems of Electrical Power Supply with Own Power Stations. *Promyshlennaya energetika* [Industrial Power Engineering], 2010, no.3, pp.26-31.
25. 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.
26. Xu Y., Dong Z.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.
27. Udalov S.N., Pristup A.G., Achitaev A.A. Research of Magnetic Transmission with Variable Gear Relation in Wind Power Installation for the Purpose of Increase of Dynamic Stability. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta* [News of Tomsk polytechnical university], 2015, vol.326, no.10, pp.123-134.
28. Udalov S.N., Achitaev A.A., Yumanov M.S. Research of Operation Modes of Wind Power Installation on the Basis of Electromagnetic Transmission as a Part of Autonomous System of Electric Power Supply. *Elektro. Elektrotehnika, elektroenergetika, elektrotekhnicheskaya promyshlennost'* [Electro. Electrical engineering, power industry, electrotechnical industry], 2015, no.5. pp.32-35.
29. Shevchenko A.F., Pristup A.G., Novokreshchenov O.I., Toporkov D.M., Korneev V.V. Construction and Design Features of Permanent Magnet electric Motors for General Industrial Purposes. *Russian Electrical Engineering*, 2014, vol.85, no. 12, pp. 748-751.
30. Gamazin S.I., Stavtsev V.A., Tsyruk S.A. *Perehodnye protsessy v sisyemah promyshlennogo elektrosnabzheniya, obuslovlennyye elektrodvigatel'noy nagruzkoi* [Transient Phenomena in Systems of Industrial Electric Power Supply Caused by Electromotive Loading]. Moscow, MEI Publishing House, 1997. 424 p.
31. Bulanova O.V., Malafeev A.V., Nikolaev N.A., Rotanova Yu.N., Panova E.A. Determination of Asynchronous Power of Synchronous Generators in Calculations of Electromechanical Transient Phenomena in Case of Asymmetrical Modes. *Elektrika* [Electrical Engineering], 2010, no.8, pp.24-26.
32. Malafeev A.V., Panova E.A. Algorithm of Calculation of Complex Asymmetrical Modes of Systems of Electric Power Supply of Industrial Enterprises. *Glavnyy energetik* [Chief Power Engineer], 2011, no.3, pp.35-39.
33. Igumenshchev V.A., Zaslavets B.I., Nikolaev N.A., Malafeev A.V., Bulanova O.V., Kondrashova Yu.N., Panova E.A. *Otsenka effektivnosti releynoi zashchity v setyah 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 their Own Power Plants]. Magnitogorsk, NMSTU Publ, 2011. 141 p.
34. Bulanova O.V., Igumenshchev V.A., Malafeev A.V., Rotanova Yu.N. Research of Convergence of Method of Calculation of Set Modes of Systems of Electric Power Supply by Operation Separately with Power Supply System. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical systems and complexes], 2005, no.10, pp.129-134.
35. Gazizova O.V., Malafeev A.V., Tarasov V.M., Izvol'skiy M.A. Research of Overall Performance of Dividing Automatic Equipment in System of Electric Power Supply of Industrial Enterprise of Ferrous Metallurgy. *Promyshlennaya energetika* [Industrial power engineering], 2012, no.10, pp.12-17.
36. Kornilov G.P., Panova E.A., Varganova A.V. The Algorithm of Economically Advantageous Overhead Wires Cross Section Selection Using Corrected Transmission Lines Mathematical Models. *Procedia Engineering*, 2015, vol.129, pp. 951-955.
37. Khramshin V.R., Odintsov K.E., Gubaydullin 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.
38. Odintsov K.E., Rotanova Yu.N., Karandaeva O.I., Mostovoy S.E., Shilyaev P.V. 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.
39. Kondrashova Yu.N., Gladysheva M.M., Nikolaev Art.A., Nikolaev A.A. Development of Technique of Failure Prediction of Complex Electrotechnical Systems on the Example of Electrical Networks. *Tekhnicheskie nauki: ot teorii k praktike* [Technical science: from the theory to practice], 2014, no.33, pp.101-108.
40. 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. *Proceedings of 2014 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems, MEACS*, 2014, pp. 1-6.

МОНИТОРИНГ, КОНТРОЛЬ И ДИАГНОСТИКА ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

УДК 621.314.21:681.518.5

DOI: 10.18503/2311-8318-2016-3(32)-39-43

Стеклов А.С.

ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева»

НЕЙРОНЕЧЁТКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТЕПЕНИ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ТРАНСФОРМАТОРОВ СУДОВЫХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Актуальной является задача разработки систем прогнозирования технического состояния трансформаторов судовых электроэнергетических установок. Одним из путей решения задачи является применение искусственных нейронных сетей. Впервые предложен комплексный подход к определению степени работоспособности трансформаторов судовых электроэнергетических установок на основе искусственных нейронных сетей. Полученные результаты могут быть основой для создания новой системы прогнозирования технического состояния трансформаторов судовых электроэнергетических установок.

Ключевые слова: нейронечёткая сеть, трансформатор, электроэнергетическая установка, диагностика, степень работоспособности.

ВВЕДЕНИЕ

Безопасная эксплуатация судна в значительной степени определяется уровнем надежности электрооборудования силовой электроэнергетической установки. Поэтому представляется целесообразным оценить степень работоспособности и спрогнозировать дальнейшую эксплуатацию трансформаторов судовых электроэнергетических комплексов, от уровня технического состояния которого зависит работоспособность электроэнергетической установки в целом [1-5].

Для определения технического состояния трансформатора применение аппарата нечёткой логики позволяет работать с существующей неопределенностью, неполнотой и нечеткостью информации. Выбор решения по числовой информации в условиях неопределенности (риска) возникает в том случае, когда с каждым принимаемым решением связано некоторое множество возможных результатов с известными условными вероятностями.

МЕТОДОЛОГИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ СТЕПЕНИ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Для реализации процесса нейронечёткого моделирования степени работоспособности трансформаторов судовых электроэнергетических установок предлагается использовать библиотеку нечеткой логики (Fuzzy Logic Toolbox) из пакета MatLab.

Параметры, используемые для контроля работоспособности: токи в фазах (I_1) первичной и вторичной обмоток, напряжение по фазам (U_2) первичной и вторичной обмоток, сопротивление изоляции на корпус (R_{iz}), температура первичной и вторичной обмоток (t_{perv} и t_{vtor}) [6].

Для обеспечения регистрации диагностических параметров в трансформаторе на каждую обмотку устанавливаются датчики: датчик температуры Pt-100 в каждую фазу, датчики тока, напряжения и сопротивления изоляции в каждую фазу.

Моделирование степени работоспособности трансформатора осуществим отдельно для электрической и

неэлектрической частей.

Нечеткий логический вывод можно осуществить в несколько этапов [7]:

1) этап фаззификации: определение принадлежности объекта к нечеткому множеству;

2) этап композиции: на данном этапе определяется уровень принадлежности объекта ко всему нечеткому правилу;

3) этап импликации: это оценка вывода нечеткой системы в соответствии с данным правилом в зависимости от уровня принадлежности объекта правилу и значения правила;

4) этап агрегации: объединение результатов импликации для каждого правила в единое нечеткое множество решений;

5) этап дефаззификации: установка в соответствие нечеткому значению числового эквивалента.

Для определения степени работоспособности электрической части трансформатора входными переменными являются сопротивление изоляции (R_{iz}), токи в фазах (I_1 , I_2) первичной и вторичной обмоток, напряжение по фазам (U_1 , U_2) первичной и вторичной обмоток трансформатора. Выходом является степень работоспособности электрической части трансформатора [8].

На рис. 1 представлена структурная схема определения степени работоспособности электрической части трансформатора.

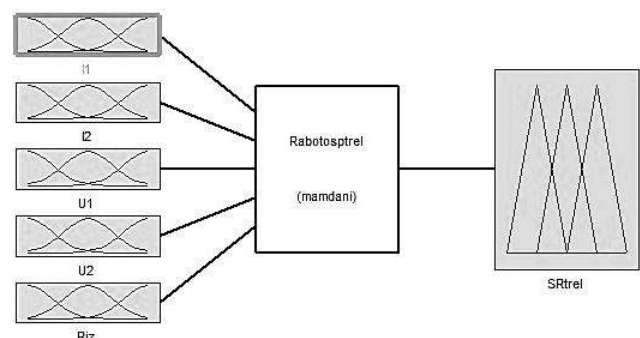


Рис. 1. Структурная схема определения работоспособности электрической части трансформатора

На **рис. 1** входные переменные: I_1 - токи в фазах первичной обмотки, I_2 - токи в фазах вторичной обмотки, U_1 - напряжения в фазах первичной обмотки, U_2 - напряжения в фазах вторичной обмотки, R_{iz} - сопротивление изоляции, выходная переменная: SR_{trel} - степень работоспособности электрической части трансформатора, $Rabotosp_{trel}$ (mamdani) – нечеткая система Мамдани-Заде.

Для определения степени работоспособности неэлектрической части трансформатора входными переменными являются два параметра: температура первичной обмотки ($tperv$) и температура вторичной обмотки ($tvor$), выходом является степень работоспособности неэлектрической части трансформатора. На **рис. 2** представлена структурная схема определения степени работоспособности неэлектрической части трансформатора.

На **рис. 2** входные переменные: $tperv$ - температура первичной обмотки, $tvor$ - температура вторичной обмотки, выходная переменная: SR_{tneel} - степень работоспособности неэлектрической части трансформатора, $Rabotosp_{tneel}$ (mamdani) – нечеткая система Мамдани-Заде.

ЭТАПЫ НЕЙРОНЕЧЕТКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Фазификация входных параметров

На данном этапе происходит преобразование вектора значений входных переменных X в вектор нечетких множеств X^1 , необходимых в дальнейшем для выполнения нечеткого логического вывода.

Лингвистическую оценку значения переменных I_1 , I_2 , $tperv$ и $tvor$ будем производить с помощью пяти термов: {«Очень низкое», «Ниже нормы», «Норма», «Выше нормы», «Очень высокое»}, а переменной R_{iz} – с помощью трёх {«Очень низкое», «Ниже нормы», «Норма»}.

Выходные переменные «Степень работоспособности электрической части трансформатора» и «Степень работоспособности неэлектрической части трансформатора» будем оценивать от 0 до 100 (где 0 – минимальное значение, 100 – максимальное значение степени работоспособности трансформатора).

Композиция

Множество допустимых значений переменной называется терм-множеством.

Функции принадлежности крайних терм-множеств были заданы трапецевидной функцией принадлежности.

Для всех остальных терм-множеств был задан треугольный закон изменения функции принадлежности. Функции принадлежности принимают значения в интервале от 0 до 1.

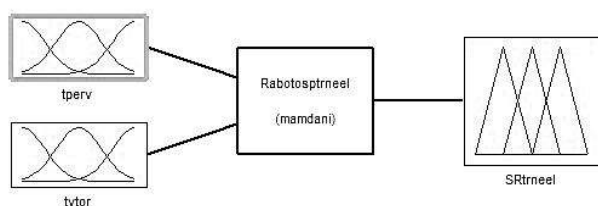


Рис. 2. Структурная схема определения работоспособности неэлектрической части трансформатора

На **рис. 3** представлен график функции принадлежности « I_1 ».

Функции принадлежности выходной переменной «Степень работоспособности неэлектрической части трансформатора» представлены на **рис. 4**.

Импликация

На этом этапе осуществляется нечеткий логический вывод, на основании задаваемой нечеткой базы знаний (набора правил), которая содержит информацию о зависимости между входными и выходными переменными в виде структуры правил «ЕСЛИ–ТО».

Правила задаются на основе экспертных оценок о причине неисправности. Информация о зависимости значений входных переменных от значений степеней работоспособности трансформатора может быть представлена в форме правил нечетких продукций. На **рис. 5** представлен фрагмент базы правил.

Агрегация

После этапа импликации идет этап агрегации, на котором на основе правил базы знаний определяется значение выходного вектора в виде вектора нечетких множеств, соответствующего нечетким значениям выходных переменных Y^1 .

Дефазификация

Дефазификатор выполняет последний этап нечеткого вывода – дефазификацию. Дефазификатор преобразует вектор нечетких множеств Y^1 в вектор значений выходных переменных Y .

Для анализа нейросетевой модели визуализируем поверхность нечеткого вывода. На **рис. 6** представлена зависимость между входными элементами (I_1 – «ток в фазах первичной обмотки»); (I_2 – «ток в фазах вторичной обмотки») и выходной переменной – SR_{trel} «Степень работоспособности электрической части трансформатора».

Степень работоспособности трансформатора в целом задается как среднее геометрическое степеней работоспособности объекта [9].

$$SR = \sqrt{SR_{\text{эл.часть}} \cdot SR_{\text{неэл.часть}}},$$

где SR – степень работоспособности трансформатора в целом; $SR_{\text{эл.часть}}$, $SR_{\text{неэл.часть}}$ – степени работоспособности электрической и неэлектрической части трансформатора.

Математическая модель вычисления работоспособности трансформатора приведена на **рис. 7**. Для наглядности вычислений предлагается использовать пакет Matlab Simulink.

Входными переменными являются значения, полученные с датчиков системы диагностирования.

Значения параметров подаются на нечеткие программируемые контроллеры, вычисляются работоспособности отдельно по каждой фазе для электрической части и для неэлектрической, далее вычисляются степени работоспособности электрической и неэлектрической частей. Затем определяется общая степень работоспособности трансформатора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена методология определения степени работоспособности трансформаторов судовых электроэнергетических установок на основе нечеткого

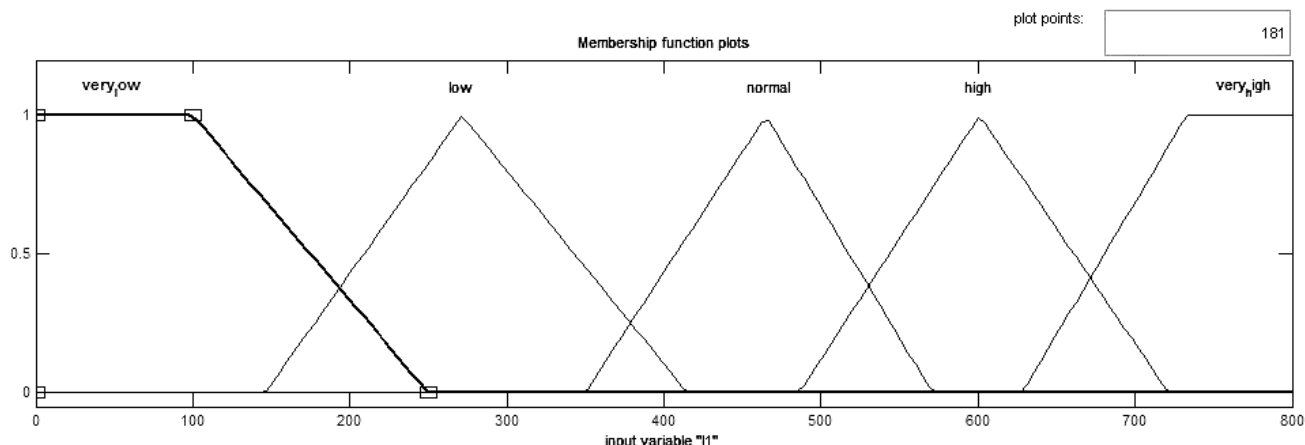


Рис. 3. Функции принадлежности переменной « I_1 »

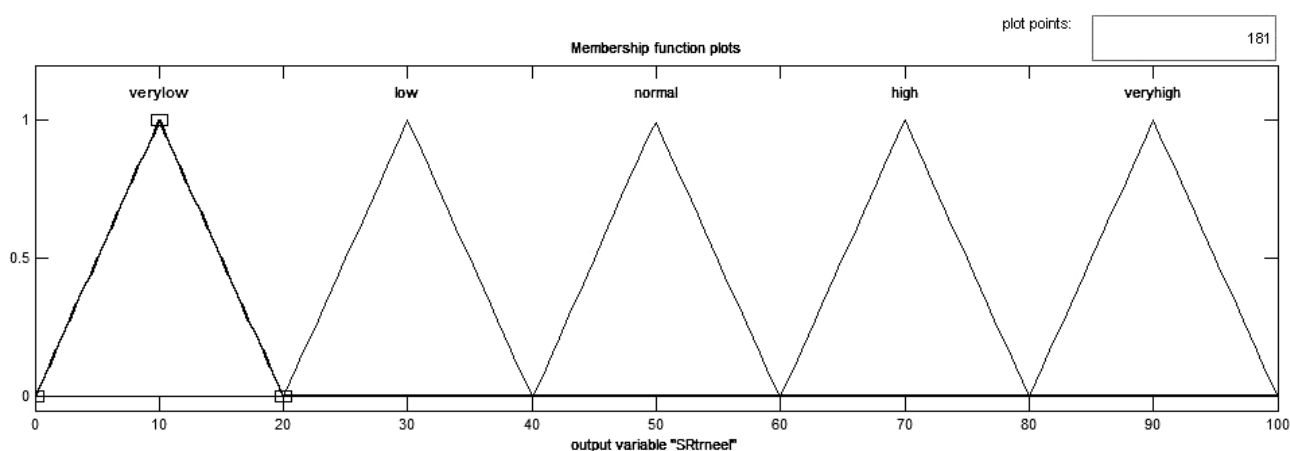


Рис. 4. Функции принадлежности выходной переменной «Степень работоспособности неэлектрической части трансформатора»

1. If (I1 is normal) and (I2 is normal) and (U1 is normal) and (U2 is normal) and (Riz is normal) then (SRtrneef is veryhigh) (1)
 2. If (I1 is normal) and (I2 is normal) and (U1 is normal) and (U2 is normal) and (Riz is verylow) then (SRtrneef is verylow) (1)
 3. If (I1 is normal) and (I2 is normal) and (U1 is normal) and (U2 is normal) and (Riz is low) then (SRtrneef is low) (1)
 4. If (I1 is very_low) and (I2 is verylow) and (U1 is verylow) and (U2 is verylow) and (Riz is verylow) then (SRtrneef is verylow) (1)
 5. If (I1 is low) and (I2 is low) and (U1 is low) and (U2 is low) and (Riz is low) then (SRtrneef is low) (1)
 6. If (I1 is high) and (I2 is high) and (U1 is high) and (U2 is high) and (Riz is normal) then (SRtrneef is high) (1)
 7. If (I1 is very_low) and (I2 is normal) and (U1 is normal) and (U2 is normal) and (Riz is normal) then (SRtrneef is verylow) (1)
 8. If (I1 is low) and (I2 is normal) and (U1 is normal) and (U2 is normal) and (Riz is normal) then (SRtrneef is low) (1)
 9. If (I1 is high) and (I2 is normal) and (U1 is normal) and (U2 is normal) and (Riz is normal) then (SRtrneef is high) (1)
 10. If (I1 is very_high) and (I2 is normal) and (U1 is normal) and (U2 is normal) and (Riz is normal) then (SRtrneef is veryhigh) (1)
 11. If (I1 is normal) and (I2 is verylow) and (U1 is normal) and (U2 is normal) and (Riz is normal) then (SRtrneef is verylow) (1)
 12. If (I1 is normal) and (I2 is low) and (U1 is normal) and (U2 is normal) and (Riz is normal) then (SRtrneef is low) (1)

III

If	and	and	and	and
I1 is	I2 is	U1 is	U2 is	Riz is
very_low	verylow	verylow	verylow	verylow
normal	normal	normal	high	normal
very_high	veryhigh	veryhigh	veryhigh	low
low	high	high	low	none
high	none	none	normal	
none			none	

☐ not

Рис. 5. Фрагмент базы правил

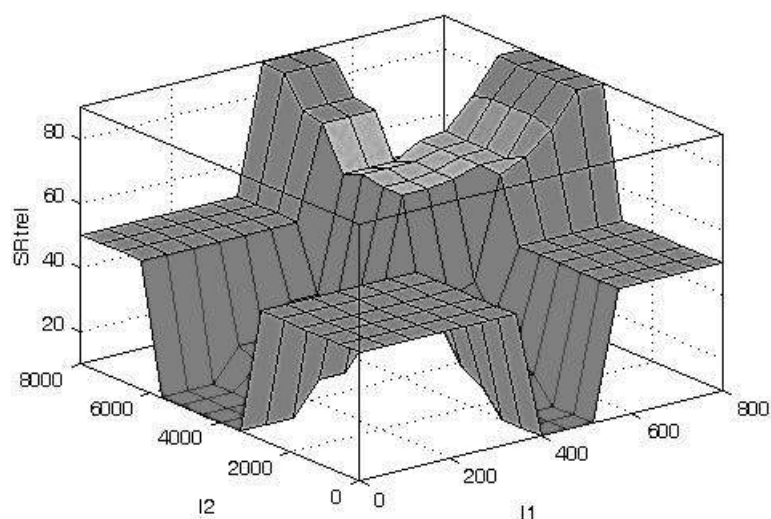


Рис. 6. Визуализация поверхности системы нечеткого вывода

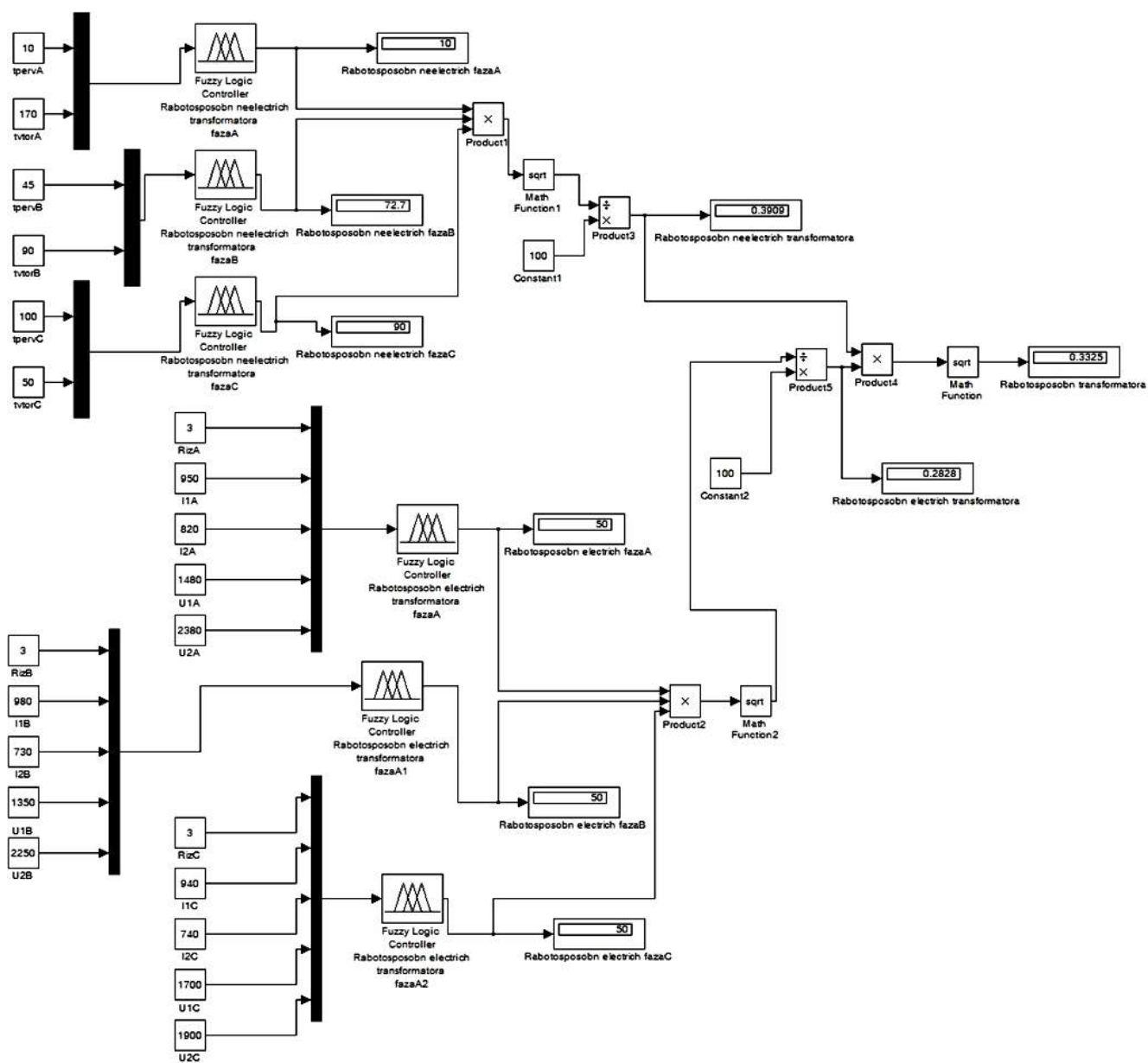


Рис. 7. Вычисление степени работоспособности трансформатора в Matlab Simulink

моделирования. Разработаны структурные схемы для определения работоспособностей электрической и не-электрической частей трансформатора. Разработана нейро-нечеткая модель в Matlab Simulink для определения степени работоспособности трансформаторов судовых электроэнергетических установок. Полученные результаты могут быть применены в экспертной системе прогнозирования технического состояния трансформаторов судовых электроэнергетических установок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крюков О.В., Серебряков А.В., Васенин А.Б. Диагностика электромеханической части ветроэнергетических установок // Электромеханічні і енергозберігаючі системи. 2012. №3. С. 549-552.
2. Крюков О.В., Серебряков А.В. Метод и система принятия решений по прогнозированию технического состояния электроприводных газоперекачивающих агрегатов // Электротехнические системы и комплексы. 2015. №4(29). С.35-38.
3. Серебряков А.В., Крюков О.В. Интеллектуальные ветроэнергетические установки для автономных систем электроснабжения. Нижний Новгород: Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексее-

ва, 2014. 120 с.

4. Серебряков А.В., Крюков О.В., Васенин А.Б. Нечеткие модели и алгоритмы управления ветроэнергетическими установками // Управление в технических, эргатических, организационных и сетевых системах: сб. науч. тр. СПб., 2012. С. 467-469
5. Дифференцирование нагрузки в системах электроснабжения автономных потребителей / А.В. Серебряков, В.Г. Титов, Е.А. Чернов, А.В. Шахов // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева 2015. № 2(109). С. 203-209.
6. Серебряков А.В. Оптимизация диагностирования электромеханической части ветроэнергетических установок // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2013. №3. С.39-46.
7. Штовба С.Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB. М.: Телеком 2007. 288 с.
8. Стеклов А.С., Подковырин Д.С. Нейронечеткая модель диагностирования технического состояния синхронного генератора // Главный энергетик. 2015. № 11-12. С. 55-60.
9. Стеклов А.С., Титов В.Г., Серебряков А.В. Определение степени работоспособности судовых синхронных генераторов с применением искусственных нейро-нечетких сетей // Вестник Чувашского университета. 2016. №1. С.97-104.

Поступила в редакцию 05 мая 2016 г.

INFORMATION IN ENGLISH

NEURO-FUZZY MODELING OF THE DEGREE OF EFFICIENCY OF TRANSFORMERS AT SHIP ELECTRIC POWER PLANTS

Aleksey S. Steklov

Post-Graduate Student, department of Electrical equipment, electric drive and automation, Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia. E-mail: steklov84@mail.ru.

An urgent task is to develop forecasting systems of technical condition of ship electric power plant transformers. One solution to the problem is to use artificial neural networks. For the first time a comprehensive approach based on artificial neural networks was offered to the determination of the degree of efficiency of transformers at shipboard electric power plants. The results can be the basis for a new system of forecasting of technical condition of ship electric power plant transformers.

Keywords: Neuro-fuzzy network, transformer, electricity installation, diagnosis, degree of efficiency.

REFERENCES

1. Kryukov O.V., Serebryakov A.V., Vasenin A.B. Diagnosis of Electromechanical Parts of Wind Power Plants. *Elektromekhanichni I energoz-berigayuchi sistemi* [Electromechanical and energy saving systems], 2012, no.3, pp.549-552. (In Russian).
2. Kryukov O.V., Serebryakov A.V. Method and System of Decision-making in Forecasting of Technical condition of Electrically Driven Gas Pumping Units. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekxy* [Electrical systems and complexes], 2015, no.4(29), pp.35-38. (In Russian).
3. Serebryakov A.V., Kryukov O.V. *Intellektualnye vetroenergeticheskie ustanovki dlya avtonomnykh sistem elektro-snabzheniya* [Intelligent Wind Turbines for Independent Power Supply Systems]. Nizhnii Novgorod: Nizhegorodskii gosudarstvennii tekhnicheskii universitet im. R.E. Alekseeva Publ., 2014. 120 p.

4. Serebryakov A.V., Kryukov O.V., Vasenin A.B. Fuzzy Model and Wind Turbine Control Algorithms. *Upravlenie v tekhnicheskikh, ergaticheskikh, organizatsionnykh i setevykh sistemakh: sb. nauchn. tr.* [Management of Engineering, ergatic, organizational and network systems. Collection of scientific papers], 2012, pp.467-469. (In Russian).
5. Serebryakov A.V., Titov V.G., Chernov E.A., Shakhov A.V. Differentiation Loads in Autonomous Consumer Power Systems. *Trudy Nizhegorodskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. R.E. Alekseeva* [Proceedings of the Nizhny Novgorod Alekseev State Technical University], 2015, no.2(109), pp.203-209. (In Russian).
6. Serebryakov A.V. Optimization of Diagnostics of Electromechanical Parts of Wind Power Plants. *Elektrooborudovanie: ekspluatatsiya i remont* [Electrical equipment: maintenance and repair], 2013, no.3, pp.39-46. (In Russian).
7. Shtovba S.D. *Proektirovanie nechetkikh sistem sredstvami MATLAB* [Design of Fuzzy Systems Using MATLAB tools]. Moscow, Telekom Publ., 2007. 288 p.
8. Steklov A.S., Podkovyrin D.S. Neuro-fuzzy Model of Diagnostics of Technical Condition of Synchronous Generator. *Glavnyi energetik* [Chief Power Engineer], 2015, no.11-12, pp.55-60. (In Russian).
9. Steklov A.S., Titov V.G., Serebryakov A.V. Determining the Degree of Efficiency of Marine Synchronous Generators Using Artificial Neural Fuzzy Networks. *Vestnik Chuvashskogo universiteta* [Bulletin of Chuvash University], 2016, no.1, pp.97-104. (In Russian).

РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВА ДИАГНОСТИКИ ФРИКЦИОННЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

Приведены результаты работ по созданию устройства контроля электромеханических устройств, обеспечивающего непосредственный контроль как за замыканием, так и за размыканием их фрикционного узла.

Ключевые слова: исполнительные электромагнитные устройства, фрикционный узел, постоянный магнит, полюса магнитопровода, якорь, блок контроля, датчик тока, ложные срабатывания реле.

ВВЕДЕНИЕ

Исполнительные электромагнитные устройства с постоянными магнитами (ЭМУ ПМ) [1] широко используются во многих отраслях, в частности в робототехнике, станкостроении, подъемно-транспортном машиностроении, авиации, а также в различных автоматизированных системах и технологическом оборудовании. Широкое применение ЭМУ ПМ объясняется тем, что они обеспечивают дистанционную коммутацию кинематических цепей и передачу механической энергии с одного вала на другой, быстрое торможение вращающихся валов и позиционирование рабочих органов механизмов, регулирование технологических процессов, протекающих с участием жидкостей и газов, и т.д. За счет этого повышается качество выполнения заданных операций, надёжность работы и безопасность обслуживания оборудования. Потребность в таких ЭМУ весьма значительна и постоянно возрастает в связи с широкой автоматизацией производства. Например, для обеспечения высокой точности позиционирования рабочих исполнительных органов единственным техническим решением является применение ЭМУ ПМ, работающих в режиме фрикционного тормоза, которые обеспечивают быструю остановку вращающихся валов и их последующую фиксацию в заторможенном состоянии [2]. Таким образом, очевидно, что от эффективности работы ЭМУ ПМ зависят не только эксплуатационные показатели и возможности, уровень автоматизации и механизации, производительность и безопасность обслуживания оборудования, но и характер и степень нагруженности его деталей и узлов, которые, в свою очередь, определяют надёжность и срок службы механизмов и систем в целом.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В связи с расширением областей применения устройств с постоянными магнитами значительно возрос интерес к практическим вопросам, связанным с безопасной эксплуатацией таких устройств. Очевидно, что в процессе эксплуатации оборудования необходимо иметь информацию о том, соответствует ли состояние фрикционного узла ЭМУ ПМ требуемому по условиям эксплуатации режиму работы. Например, использование в электроприводе промышленного робота тормозного устройства, не обеспечивающего по каким-либо

причинам торможение и фиксацию вала, приводит не только к браку или поломке изготавливаемого изделия, но и к разрушениям самого робота. По стоимости убытки в этом случае могут быть весьма значительными и во много раз превышать стоимость самого тормоза. Кроме того, в этом случае резко снижается безопасность работы обслуживающего персонала. Таким образом, очевидно, что в процессе эксплуатации ЭМУ ПМ необходимо контролировать его состояние. Следовательно, диагностика состояния ЭМУ ПМ является важной и актуальной проблемой и её успешное решение позволяет существенно улучшить эксплуатационные характеристики и увеличить надёжность работы оборудования.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Контроль состояния ЭМУ ПМ может осуществляться как контактными, так и бесконтактными способами. В первом случае можно использовать механические контактные датчики, например, в виде конечного выключателя или пьезодатчика, а во втором случае контроль может быть обеспечен, например, путем контроля формы кривой тока или изменения индуктивности обмотки при изменении положения якоря ЭМУ ПМ [2,3]. Анализ известных систем бесконтактного контроля позволил выявить следующие недостатки: во-первых, сигнализация состояния осуществляется по косвенным факторам, что значительно снижает достоверность самой системы контроля; во-вторых, при этом используются сложные схемы, увеличивающие стоимость и снижающие надёжность. Контактные способы по сравнению с бесконтактными обеспечивают более высокую достоверность контроля. Однако, известные устройства, реализующие этот способ контроля, имеют целый ряд недостатков, основными из которых являются следующие: увеличение габаритов ЭМУ ПМ за счет необходимости установки датчиков в активной зоне; значительное снижение надёжности работы, так как датчики испытывают значительные динамические ударные нагрузки; необходимость установки датчиков на стадии изготовления и сложность (а чаще и невозможность) их размещения в уже готовом ЭМУ ПМ.

Был проведен комплекс исследований по разработке устройства контроля, обладающего высокой достоверностью за счет реализации контактного способа и при этом свободного от перечисленных недостатков.

На **рис. 1** изображена принципиальная компоновка

основных активных частей фрикционного ЭМУ ПМ, предназначенного для работы в качестве муфты или тормоза.

Магнитная система состоит из магнитопровода, имеющего наружный 2 и внутренний 6 полюса и фланец 3, выполненные из магнитомягкой стали. Между полюсами размещена обмотка 5 и постоянный магнит 4. Диск якоря 7 закреплен на упругой мембране 8, которая устанавливается на приводном валу посредством узла крепления 9, выполненного в виде цапги. Блок контроля 1 подключен к полюсам 2 и 6 магнитопровода параллельно постоянному магниту 4.

В электромагнитных устройствах магнитное поле постоянного магнита используется для создания усилия между соответствующими конструктивными элементами, а обмотка управляющего электромагнита служит или для компенсации этого поля, или для изменения его направления. При отсутствии напряжения на обмотке 5 магнитный поток постоянного магнита 4 притягивает якорь 7 к полюсам 2 и 6 магнитопровода. Тем самым за счет сил трения между указанными элементами создается усилие сцепления. Это усилие может быть использовано или для передачи вращающего момента между ведущим и ведомым валами (если данная конструкция использована для муфты), или для торможения (если, например, магнитопровод закреплен неподвижно).

При подключении обмотки 5 к источнику питания она создает магнитный поток, направленный встречно потоку постоянного магнита 4. Тем самым усилие притяжения якоря 7 к полюсам исчезает и он под действием усилия упругой мембраны 8 отходит от магнитопровода. За счет этого фрикционный узел муфты (или тормоза) размыкается.

Особенности конструкции ЭМУ ПМ с постоянными магнитами реализованы в разработанном устройстве контроля, в котором с целью увеличения надежности контроля предлагается в качестве информации о состоянии ЭМУ ПМ использовать наличие или отсутствие электрического контакта между якорем и верхним полюсом. Устройство содержит блок контроля 1, состоящий из последовательно соединенных источника питания 2 и датчика тока 3. Эквивалентная электрическая схема замещения ЭМУ ПМ с устройством контроля приведена на рис. 2. На схеме использованы следующие обозначения: $R_{ПМ}$, $R_{Я}$, $R_{Н}$, $R_{ВН}$ – электрические сопротивления соответственно постоянного магнита, якоря, наружного и внутреннего полюсов магнитопровода.

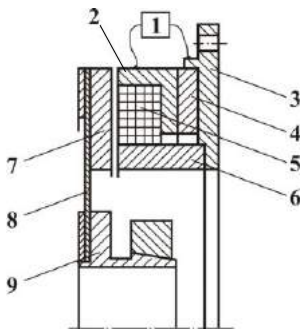


Рис. 1. Конструктивная компоновка фрикционного ЭМУ ПМ и устройства контроля состояния фрикционного узла

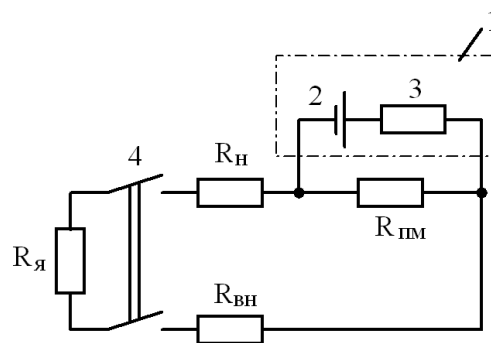


Рис. 2. Эквивалентная электрическая схема замещения ЭМУ ПМ с устройством контроля

В обесточенном состоянии якорь притянут к полюсам и между ними есть электрический контакт, что соответствует замкнутому положению ключа 4 на схеме. Следовательно, цепь « $R_{Н}$, $R_{ВН}$, $R_{Я}$ » шунтирует сопротивление $R_{ПМ}$ и суммарное электрическое сопротивление на входе устройства контроля незначительно. Поэтому по датчику тока 3 будет протекать ток.

При нормальной эксплуатации после подачи напряжения на обмотку растормаживающего электромагнита тормоз замыкается, то есть между якорем и полюсами появляется воздушный зазор δ_p . На эквивалентной схеме замещения наличие этого зазора соответствует разрыву электрической цепи между сопротивлением якоря $R_{Я}$ и сопротивлениями полюсов $R_{Н}$ и $R_{ВН}$ (т.е. разомкнутому состоянию ключа 4). Таким образом, в слаботочную цепь устройства контроля подключено только сопротивление постоянного магнита $R_{ПМ}$. Поскольку в ЭМУ ПМ обычно используют металлокерамические постоянные магниты, то величина $R_{ПМ}$ составляет, по меньшей мере, несколько килоом. За счет этого ток, протекающий по датчику тока 3, будет иметь при разомкнутом тормозе минимальное значение.

При отключении питания якорь притягивается к полюсам. Следовательно, в этом случае зазор $\delta_p=0$, что на схеме замещения соответствует замкнутому состоянию ключа 4. Тем самым сопротивление $R_{ПМ}$ шунтируется низкоомной цепью из сопротивлений $R_{Н}$, $R_{ВН}$ и $R_{Я}$ и суммарное электрическое сопротивление на выходе устройства контроля резко уменьшается. Это приводит к скачкообразному увеличению тока при замкнутом тормозе, регистрируемого датчиком тока 3.

Следовательно, величина тока однозначно зависит от положения якоря относительно полюсов, и по значению тока можно определить, замкнут или разомкнут ЭМУ ПМ в данный момент. Это позволяет исключить возможность аварийной работы последнего при его ошибочном замыкании или размыкании. Например, выполнив датчик тока в виде сигнальной лампочки, можно осуществлять визуальный контроль за состоянием ЭМУ ПМ: если лампочка светится, то он замкнут, если лампочка потухла, то он разомкнут. Имея постоянный контроль, оператор может своевременно выявить изменение режима ЭМУ ПМ и исключить тем самым его аварийную работу. При выполнении датчика тока в виде светодиодной части оптрона можно обеспечить автоматическое управление. В частности, при использовании предлагаемого устройства в приводе подач автоматизированных станков сигнал с фото-

приемника оптрона будет обрабатываться электроавтоматикой станка, и система числового программного управления в соответствии с заложенным алгоритмом работы будет или разрешать работу станка, или отключать его.

Таким образом, разработанное устройство позволяет с высокой степенью достоверности осуществлять контроль за положением якоря и, тем самым, за состоянием ЭМУ ПМ.

Для проверки работоспособности предлагаемого устройства была собрана схема, представленная на **рис. 3**.

В качестве объекта испытания был взят электромеханический тормоз типа ТПМ1 с постоянными магнитами, пристроенный к высокомоментному электродвигателю типа ВЭМ, предназначенному для привода подач станков с ЧПУ [2]. Поскольку обмотка данного тормоза рассчитана на номинальное напряжение 24 В, то для питания обмотки сигнального реле *P* было рационально использовать тот же источник питания. Для сглаживания выпрямленного напряжения в схему введен конденсатор *C*. Контакт *K* «якорь - верхний полюс» включен последовательно с обмоткой *P* реле.

В результате наблюдений, объем которых составил 10^4 включений тормоза, было выявлено, что происходят кратковременные ложные срабатывания реле при разомкнутом тормозе. Это можно объяснить наличием в зазоре металлической пыли, являющейся следствием износа фрикционных поверхностей тормоза. Эта пыль под действием магнитного поля ориентируется в направлении от верхнего полюса к якорю и образует тем самым электропроводящие мостики. Кроме того, при размыкании тормоза на обмотке реле возникают перенапряжения, из-за которых происходит искрение в зоне рабочего зазора, и процесс размыкания сигнального контакта затягивается.

Наблюдение и анализ осциллограмм ложных срабатываний (отказов) позволили определить, что их основными параметрами являются следующие вели-

ны: T – длительность (время отказа); t_1 – длительность отдельного ложного сигнала; t_2 – длительность отдельного достоверного сигнала. В течение времени T , равном примерно $5 \cdot 10^{-1} - 5 \cdot 10^{-2}$ с, происходит многократное изменение напряжения на контакте, причем t_1 , как правило, меньше, чем t_2 , а именно: $t_1 = 1 \cdot 10^{-3} - 5 \cdot 10^{-3}$ с, а $t_2 = 2 \cdot 10^{-3} - 10 \cdot 10^{-3}$ с.

С целью определения зависимости числа отказов от напряжения, приложенного к контакту, была проведена серия экспериментов при напряжениях 24, 18, 12, 6 В. При этом рабочий зазор выдерживали равным 0,5–0,6 мм, а режим работы тормоза не изменяли. Результаты эксперимента показали, что величина напряжения не влияет на надежность работы контакта.

Вторая серия экспериментов была направлена на определение зависимости числа отказов от величины зазора между якорем и полюсом тормоза. Выявлено, что при уменьшении указанного зазора ниже 0,4 мм число отказов резко увеличивается и при зазоре 0,2 мм устанавливается устойчивое состояние отказа (**рис. 4**).

При зазорах более 0,6 мм число отказов от величины зазора практически не зависит (наблюдения проводились при зазорах не более 1,5 мм, реально применяемых в ЭМУ ПМ). При этом следует отметить, что проведенный анализ показал, что в серийно выпускаемых ЭМУ ПМ минимальный воздушный рабочий зазор обычно составляет не менее 0,3 – 0,4 мм [3-5].

Для улучшения эксплуатационных характеристик устройства контроля ЭМУ ПМ был проведен комплекс исследований, на базе которого была получена его наиболее рациональная схема. Получено, что для отстройки от отказов в измерительную схему нужно ввести дополнительный конденсатор $C_{\text{доп}}$, подключенный параллельно обмотке *P* реле, а для снятия скачков напряжения при размыкании контакта параллельно обмотке *P* реле дополнительно включить диод *D* (**рис. 5**).

Проведенные эксперименты показали, что использование этой схемы позволяет полностью устранить ложные срабатывания.

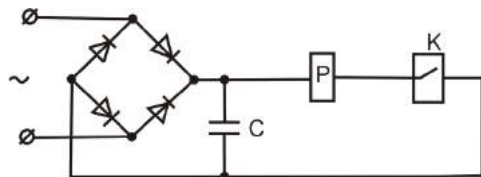


Рис. 3. Электрическая схема устройства контроля

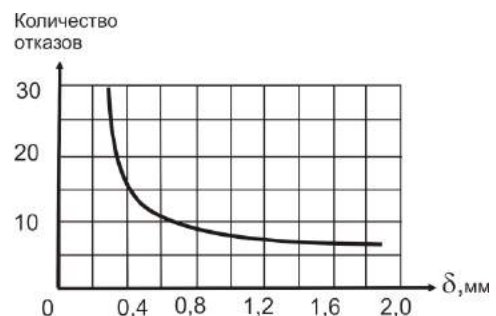


Рис. 4. Зависимость интенсивности отказов от величины воздушного рабочего зазора

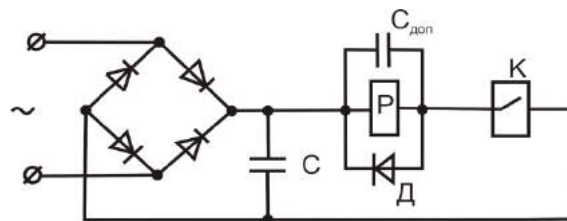


Рис. 5. Электрическая схема устройства контроля с защитой от ложных срабатываний

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенных исследований свидетельствуют об эффективности разработанного схемного решения устройства контроля состояния ЭМУ ПМ. При этом, как видно из рис. 5, предложенное решение обладает предельной простотой и не требует использования каких-либо сложных схем защиты от ложных срабатываний. Данное техническое решение обеспечивает высокую надежность работы системы контроля как за замыканием, так и за размыканием фрикционного узла ЭМУ ПМ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бочкарев И.В., Галбаев Ж.Т. Быстродействующие электромагнитные механизмы с постоянными магнитами для систем автоматики. Бишкек: Илим, 2008. 275 с.
2. Бочкарев И.В. Быстродействующие электромеханические тормозные устройства для электродвигателей. М.: Энергоатомиздат, 2001. 288 с.
3. Bochkarev I.V. Analysis of a doubly fed induction motor in electric drives of pumping stations. *Procedia Engineering*, 2015, no.129, pp.915-921. DOI 10.1016/j.proeng.2015.12.133.
4. Тормозные устройства: справочник / Александров М.П., Лысяков А.Г., Федосеев В.Н., Новожилов И.В.; под общ. ред. Александрова М.П. М.: Машиностроение, 1985. 312 с.
5. Ряховский О.А., Иванов С.С. Справочник по муфтам. Л.: Политехника, 1991. 384 с.

Поступила в редакцию 01 апреля 2016 г.

INFORMATION IN ENGLISH

DEVELOPMENT OF DIAGNOSTIC DEVICES FOR FRICTION ELECTROMECHANICAL DEVICES

Igor' V. Bochkarev

D.Sc. (Eng.), Professor, Department of Electrical Engineering, I. Razzakov Kyrgyz State Technical University, Bishkek, Kyrgyz Republic. E-mail: elmech@mail.ru.

The paper describes the results of the work on design of a control device for electromechanical devices providing direct control of both closure and opening of their friction assembly.

Keywords: Actuating electromagnetic device, friction assembly, permanent magnet, magnetic pole, armature of an electromagnet, control unit, current sensor, false response of a relay.

REFERENCES

1. Bochkarev I.V., Galbaev Zh.T. *Bystrodeystvuyushchie elektromagnitnye mekhanizmy s postoyannymi magnitami dlya sistem avtomatiki* [Fast Electromagnetic Mechanisms with Permanent Magnets Intended for Automatic Systems]. Bishkek: Ilim Publ., 2008. 275 p.
2. Bockarev I.V. *Bystrodeystvuyushchie elektromekhanicheskie*

tormoznye ustroystva dlya elektrodvigateley [Fast Electromechanical Brake Units for Electric Motors]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 2001. 288 p.

3. Bochkarev I.V. Analysis of a doubly fed induction motor in electric drives of pumping stations. *Procedia Engineering*, 2015, no.129, pp.915-921. DOI 10.1016/j.proeng.2015.12.133.
4. Aleksandrov M.P., Lysyakov A.G., Fedoseev V.N., Novozhilov I.V. *Tormoznye ustroystva: spravochnik* [Brake Mechanisms. Reference book]. Under the editorship of Aleksandrov M.P. Moscow, Machine Building Publ., 1985. 312 p.
5. Ryakhovskiy O.A., Ivanov S.S. *Spravochnik po muftam* [Coupling reference book]. Leningrad, Politekhnik Publ., 1991. 384 p.

Агапитов Е.Б.¹, Михайловский В.Н.¹, Даутов Р.Н.², Каблукова М.С.¹, Агапитов А.Е.¹

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

²ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат»

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ПАРОВОЗДУХОДУВНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРЕДПРИЯТИЯ ПРИ РЕШЕНИИ МНОГОЦЕЛЕВЫХ ЗАДАЧ

В работе проведен анализ работы паровоздуходувной электростанции в структуре энергохозяйства металлургического предприятия, определены пути повышения энергоэффективности. Предложены зависимости, связывающие мощность турбогенераторов от параметров паровой нагрузки для зимнего и летнего периодов работы станции, которые используются для построения математической модели работы ПВЭС.

Ключевые слова: паровоздуходувная электростанция, металлургическое предприятие, энергетические ресурсы, анализ данных.

ВВЕДЕНИЕ

Электростанции промышленных предприятий, в частности ОАО «ММК» выполняют одновременно несколько функций. Так, паровоздуходувная электростанция (ПВЭС) отпускает сжатый воздух для доменных печей, вырабатывает электроэнергию и технологический пар для паровых сетей и является буферным потребителем для использования вторичных энергоресурсов – доменного и коксового газа. В этих условиях задача минимизации удельных расходов топлива на выработанную единицу электроэнергии или произведенного котлами пара, что характерно для обычных электростанций, часто отходит на второй план по сравнению с задачами обеспечения энергоносителями потребностей технологии основного металлургического производства.

На фоне дополнительно возникающих экономических задач оптимальное управление работой станции приобретает признаки неопределенности и ориентируется лишь на решение локальных проблем.

Для поиска глобальных оптимумов необходима адекватная математическая модель, которая описывает текущее технико-экономическое поведение станции. Типовым приемом в этом случае является построение моделей на основе анализа статистической информации. При этом оценка качества этой информации является самостоятельной задачей. Информационные потоки в производственных условиях поступают одновременно, дискретность анализируемой информации также различна. Так, расходы пара от котлов и его параметры – температуру и давление можно диагностировать в онлайн-режиме, а вот объемы дымовых газов от котлов определяются лишь расчетным путем. При работе котлов на смесях природного, коксового и доменного газов – непрерывно измеряются их расходы, а текущая калорийность газов не диагностируется, что может давать погрешность в оценке теплового баланса котла до 10% [2].

Рассмотрим в качестве примера ПВЭС-1 ОАО «ММК» (рис. 1).

Пар, вырабатываемый котлами, подается в линию из двух паропроводов, при этом в эти же паропроводы подается пар с другого блока станции в количестве 50 т/ч (по 25 т/ч в каждый паропровод) летом и 60 т/ч зимой. Из имеющихся редукционно-охладительных установок (РОУ) одна находится в постоянной работе с пропуском пара в зимний период 10 – 15 т/ч. Основной задачей работы станции является подача воздушного доменного дутья с давлением $P=3$ кг/см², поэтому подача пара от котлов на 5 турбовоздуходувки является приоритетной задачей и выпадает из перечня параметров для оптимизации. При этом расход дутья определяется производственной программой доменного цеха. В связи с чем расход пара на турбовоздуходувки не является фиксированной величиной.

При поэтапном решении оптимизационных задач необходимо определить, что же является целью оптимизации – сокращение удельного расхода топлива на кВт/ч выработанной электроэнергии, снижение расхода покупного газа при работе на смеси с промышленными газами, снижение себестоимости отпущенного дутья или поиск режимов максимальной выработки электроэнергии.

МЕТОДИКИ

Турбогенераторы электростанции оснащены противодавленческими турбинами, работа которых связана с изменением работы паровых сетей предприятия. Рассмотрим работу турбоагрегатов станции в летний и зимний период.

Анализ выработки электроэнергии генераторами ТГ-1 и ТГ-2 представлен на рис. 2, 3.

Номинальная мощность ТГ-1 – 6 МВт, а ТГ-2 – 4 МВт. Оба турбогенератора не выходят на номинальный режим выработки электроэнергии, и одной из задач оптимизации работы станции является поиск возможностей роста производства электроэнергии [6].

В таблице представлены обработанные данные по работе турбины (ТГ №2 ПВЭС-1 в летний период).

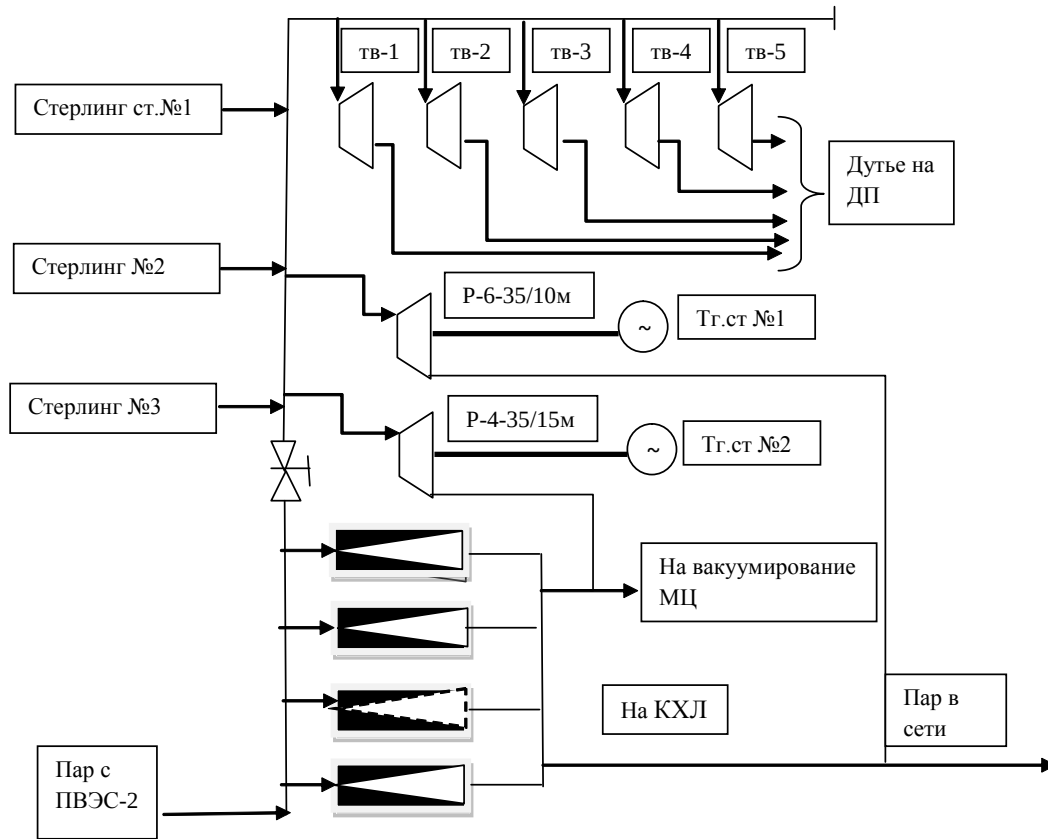


Рис. 1. Принципиальная схема ПВЭС – 1 ОАО ММК

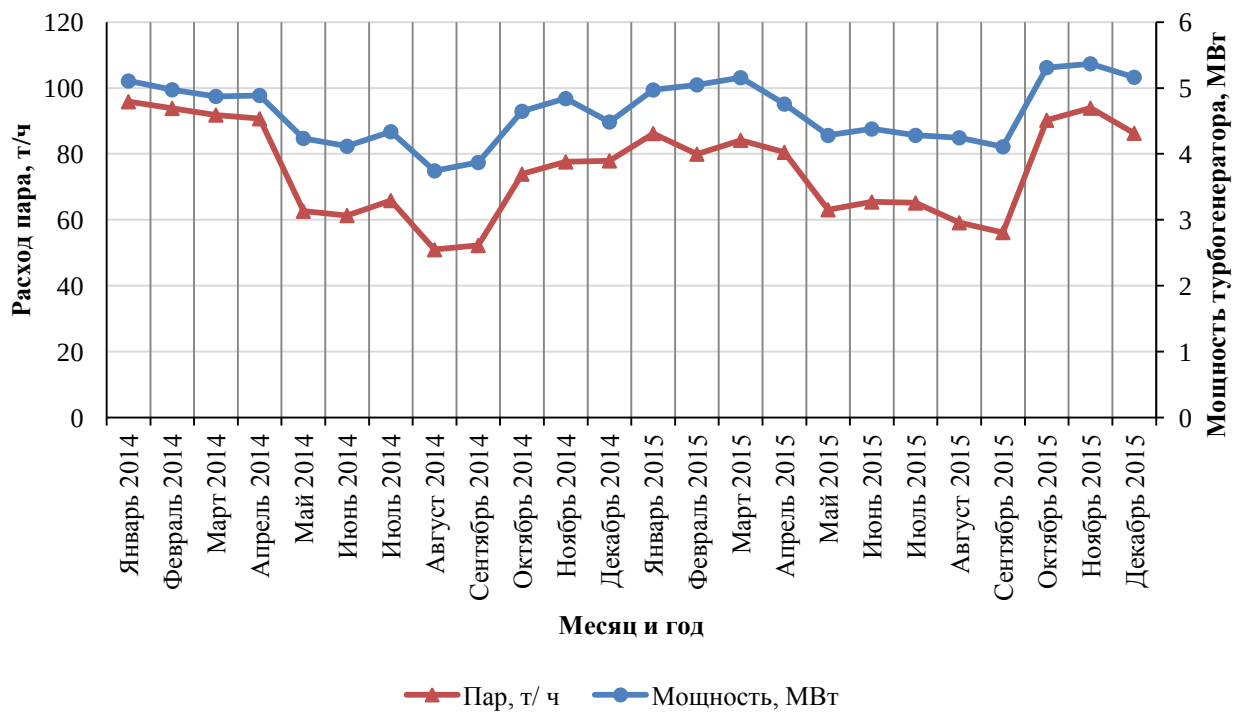


Рис. 2. Зависимость электрической мощности турбоагрегата ТГ-1 от расхода пара

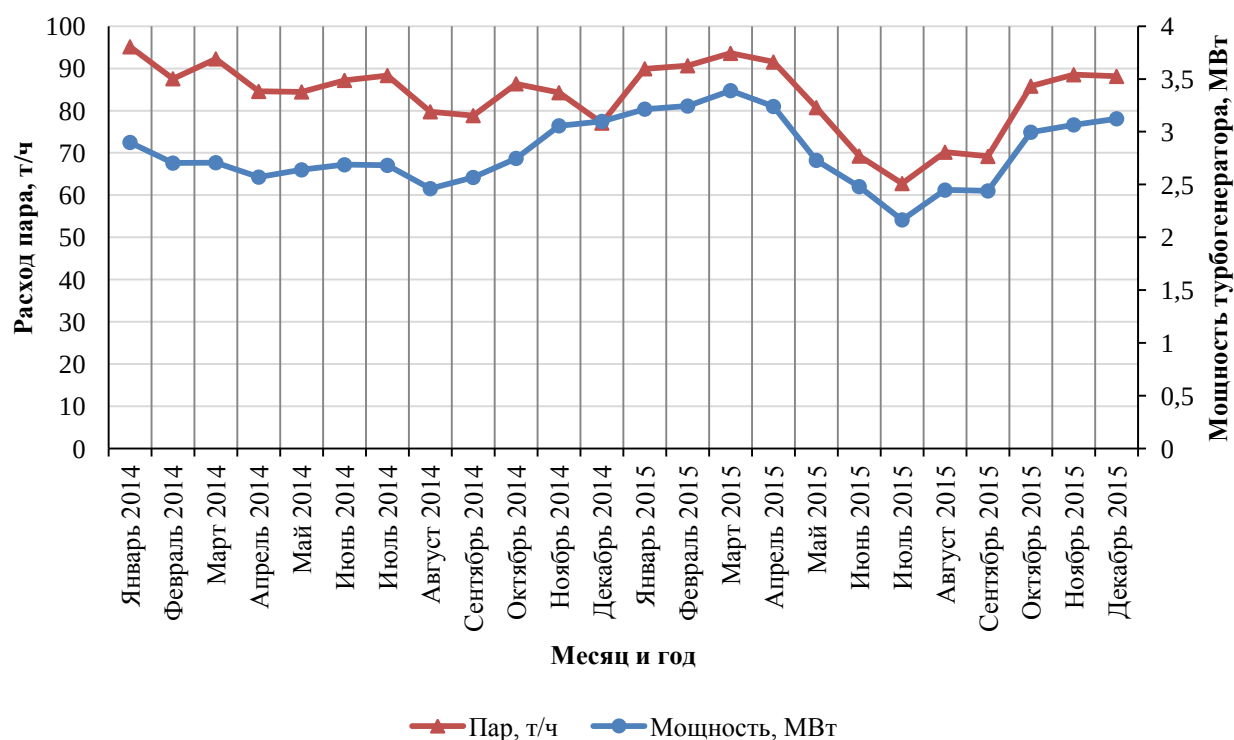


Рис. 3. Зависимость электрической мощности турбоагрегата ТГ-2 от расхода пара

Работа ТГ №2 блока 1 в летний период

Месяц, год	Средняя нагрузка, МВт	Расход пара на турбины, т/ч	Перепад давления, ати	Перепад температур, °С
Май 2014	2,6	84,4	15,0	66,0
Июнь 2014	2,7	87,2	15,0	66,0
Июль 2014	2,7	88,3	15,1	78,0
Август 2014	2,5	79,8	15,1	77,0
Сентябрь 2014	2,6	78,8	15,2	80,3
Май 2015	2,7	80,7	15,9	85,6
Июнь 2015	2,5	69,3	15,5	80,7
Июль 2015	2,2	62,8	16,1	81,7
Август 2015	2,4	70,2	16,2	81,2
Сентябрь 2015	2,4	69,2	16,4	80,2

Уравнение для зимнего периода

$$N_1 = 0,002B + 0,135P + 0,009T + 0,001. \quad (1)$$

Уравнение для летнего периода

$$N_2 = 0,023B + 0,097P + 0,003T - 1,035, \quad (2)$$

где N_1 , N_2 – средняя мощность турбогенератора, МВт; B – расход пара на турбины, т/ч; P – перепад давления пара между входом и выходом из турбины, ати; T – перепад температур пара между входом и выходом из турбины, °С.

Средняя мощность ТГ-2 зимой находится на уровне 3 МВт, летом – 2,5 МВт, хотя номинальная мощность – 4 МВт. Было замечено, что в зимний период наблюдаются более высокие коэффициенты корреляции между

средней нагрузкой, перепадом давлений и перепадом температур пара до и после турбины (около 0,8). В летний же период с таким высоким коэффициентом коррелирует только расход пара на турбину и средняя нагрузка. Вероятно, в летний период на нестабильность параметров пара в сети станции в большей мере сказывается подача пара с нестабильными характеристиками от блока ПВЭС-2 [1].

Таким образом, чтобы поднять среднюю мощность турбогенераторов, нужно увеличивать не только расход пара на турбины, что очевидно, но и, в рамках технических возможностей, перепад давления и температуры пара на турбине турбогенератора. Так как турбины противодавленческие, то анализ полученных зависимостей позволяет оценить на сколько нужно изменить давление пара в заводской сети, чтобы вывести

турбины на номинальный режим. Заводская паровая сеть имеет сложную конфигурацию, связана с источниками пара различного давления и параметров, тем не менее имеет возможность управления параметрами пара в локальных участках.

Задав номинальную мощность турбогенераторов, получим задачу линейного программирования на основе уравнений (1) и (2), решением которой и будет режим работы станции, который обеспечит её выполнение. Например, для повышения мощности турбогенератора ТГ-2 в среднем на 0,5 МВт, нужно, чтобы режим работы турбины имел следующие параметры:

$B=80$ т/ч, $\Delta P=19$ ати; $\Delta T=100^\circ\text{C}$ – в летний период;
 $B=95$ т/ч, $\Delta P=18$ ати; $\Delta T=85^\circ\text{C}$ – в зимний период.

Анализ существующих режимов показывает, что достижение этой задачи должно осуществляться с нескольких сторон – в направлении поиска путей повышения расхода пара и его параметров перед турбиной и возможностей снижения параметров пара в паровой сети.

В случае, когда котлы работают на общего потребителя. резервы повышения эффективности, экономии газа и электроэнергии заключаются в оптимальном распределении нагрузок между котлами [3]. Можно принять, что характеристики котлов станции идентичны, нагрузки ниже номинальных. Как известно, при пониженных нагрузках наблюдается максимальное значение КПД в области 60 – 75 %, однако для котлов ПВЭС-1 режим снижения нагрузки до такого уровня не характерен. Так как котлы работают на газовых смесях при существенном снижении нагрузки уменьшаются скорости истечения газов и воздуха, ухудшается их смешение и могут возникнуть потери с химической неполнотой сгорания. Абсолютные потери теплоты через обмуровку остаются при этом практически неизменными, а относительные (отнесенные на единицу расхода топлива) – возрастают.

Для каждого котлоагрегата может быть построена расходная характеристика, связывающая расход топлива с количеством выработанного пара или тепловой энергии. Расходные характеристики котлоагрегатов, вид которых приведен на рис.4, можно выразить в виде функциональных зависимостей: $B_1=f(D_1)$, $B_2=f(D_2)$ и $B_3=f(D_3)$, где B_1 , B_2 , B_3 – часовой расход условного топлива соответственно котлами №1, 2и 3; D_1 , D_2 , D_3 – паро- или теплопроизводительность этих котлов [9].

Суммарная выработка пара (тепловой энергии) в единицу времени тремя котлами составляет D_Σ . Если котел №1 загружен до значения D_1 , то загрузка котла №2 составит $D_3=D_\Sigma-D_1-D_2$. Следовательно, $B_1=f(D_1)$ и $B_2=f(D_2)$, $B_3=f(D_\Sigma-D_1-D_2)$

Суммарный расход топлива на три котла составит

$$B_\Sigma = B_1 + B_2 + B_3 = f(D_1) + f(D_2) + f(D_\Sigma - D_1 - D_2). \quad (3)$$

Для того чтобы расход топлива B_Σ был наименьшим (оптимальным), необходимо, чтобы первая производная суммы в правой части уравнения, взятая по нагрузке любого из котлов, равнялась нулю, а вторая производная была положительной. Таким образом, условие минимума суммарного расхода топлива B_Σ

можно получить в результате дифференцирования вышеприведенного выражения, например, по D_1 , т.е.

$$\begin{aligned} \frac{dB_\Sigma}{dD_1} &= \frac{dB_1}{dD_1} + \frac{dB_2}{dD_1} + \frac{dB_3}{dD_1} = \\ &= \frac{dB_1}{dD_1} + \frac{dB_2}{dD_2} \frac{dD_2}{dD_1} + \frac{dB_3}{dD_3} \frac{dD_3}{dD_1} = 0. \end{aligned} \quad (4)$$

Производная dD_2/dD_1 может быть определена из условия $D_1+D_2+D_3=D_\Sigma=\text{const}$, следовательно, $dD_1+dD_2+dD_3=0$. Разделив последнее правую часть выражения $dD_2/dD_1+dD_3/dD_1=-1$, получаем

$$\begin{aligned} k_1 \frac{dB_1}{dD_1} + \frac{dB_2}{dD_2} (-1 - dD_3/dD_1) + \\ + \frac{dB_3}{dD_3} \frac{dD_3}{dD_1} = 0, \end{aligned} \quad (5)$$

где $k_1=1$; $k_2=-1-dD_3/dD_1$; $k_3=dD_3/dD_1$.

Это выражение показывает, что для получения минимального суммарного расхода топлива каждый из котлов должен нести такую нагрузку, при которой наклон касательной к характеристике первого агрегата равен 1, наклон касательной к характеристике второго агрегата равен $(-1-dD_3/dD_1)$, наклон касательной к характеристике третьего равен dD_3/dD_1 наклону касательной к характеристике другого агрегата, или $\text{tg}\alpha_1=1$, $\text{tg}\alpha_2=-1-dD_3/dD_1$, $\text{tg}\alpha_3=dD_3/dD_1$ [10].

Взяв расход топлива на 2 и 3 котлоагрегате $B_{2,3}=B_2+B_3$, а их суммарную выработку за $D_{2,3}=D_2+D_3$, условие минимума суммарного расхода топлива B_Σ можно получить в результате дифференцирования вышеприведенного выражения, например, по D_1 , т.е.:

$$\begin{aligned} \frac{dB_\Sigma}{dD_1} &= \frac{dB_1}{dD_1} + \frac{dB_{2,3}}{dD_1} = \\ &= \frac{dB_1}{dD_1} + \frac{dB_{2,3}}{dD_{2,3}} \frac{dD_{2,3}}{dD_1} = 0. \end{aligned} \quad (6)$$

Производная $dD_{2,3}/dD_1$ может быть определена из условия $D_1+D_{2,3}=D_\Sigma=\text{const}$, следовательно, $dD_1+dD_{2,3}=0$. Разделив правую часть выражения $dD_{2,3}/dD_1=-1$, получаем

$$\frac{dB_1}{dD_1} - \frac{dB_{2,3}}{dD_{2,3}} = 0. \quad (7)$$

Для получения минимального суммарного расхода топлива котлы должны нести такую нагрузку, при которой наклон касательной к характеристике первого агрегата равен наклону касательной к характеристике второго и третьего агрегата, или $\text{tg}\alpha_1=\text{tg}\alpha_{2,3}$. Заменяв производные в выражении отношениями ΔB и ΔD , получим условие минимального суммарного расхода топлива:

$$1 + dD_2 / dD_1 = 0$$

или

$$dD_2 / dD_1 = -1.$$

$$\Delta B_1 / \Delta D_1 = \Delta B_{2,3} / \Delta D_{2,3}. \quad (8)$$

Так как котлоагрегаты близки по паропроизводительности, то для выработки одного и того же количества пара (тепловой энергии) D каждым котлом требуется одинаковый расход топлива $B=f(D)$, и между одинаковыми котлоагрегатами суммарная нагрузка должна распределяться поровну [5].

Проведя аналогичные рассуждения, формируется система уравнений [8]

$$\begin{cases} \Delta B_1 / \Delta D_1 = \Delta B_{2,3} / \Delta D_{2,3}; \\ \Delta B_2 / \Delta D_2 = \Delta B_{1,3} / \Delta D_{1,3}; \\ \Delta B_3 / \Delta D_3 = \Delta B_{1,2} / \Delta D_{1,2}, \end{cases} \quad (9)$$

где $\Delta B_{1,3}$ – суммарный прирост топлива на 1 и 3 котлоагрегате; $\Delta B_{1,2}$ – суммарный прирост топлива на 1 и 2 котлоагрегате; $\Delta D_{1,3}$ – прирост паропроизводительности на 1 и 3 котлоагрегате; $\Delta D_{1,2}$ – прирост паропроизводительности на 1 и 2 котлоагрегате.

Реальная ситуация – более сложная, т.к. характеристики котлоагрегатов ПВЭС-1 отличаются друг от друга, особенно при изменении калорийности газовой смеси, что требует при поиске вариантов перераспределения нагрузки между котлами применения в уравнении (7) приема балльных оценок [7].

Для построения адекватной производственно – технологической модели лучше всего подходит модель на основе энергетического баланса станции, где все энергетические потоки были бы представлены в сопоставимых единицах. При кажущейся простоте такая задача имеет множество неопределенностей [4].

Поступление горючих топлив на станцию фиксируется в текущем режиме в м³/ч, что предполагает возможность составления мгновенного теплового баланса по газам и пару, однако замеры калорийности газов в онлайн-режиме не производятся и в отчетной документации фигурируют лишь среднемесячные показатели. Анализ показал, что среднемесячное колебание калорийности природного газа составляет 0,6-0,8%, доменного – 9-12%, коксового – 8-9%. Объем отходящих газов в этом случае точно рассчитать невозможно, т.к. неизвестен текущий состав горючих газов, а для оценки потерь тепла с дымовыми газами необходимо знать их энтальпию и состав. Несмотря на то, что температура дымовых газов от котлов измеряется в онлайн-режиме, точность оценки среднemasсовой температуры потока газов может отличаться от измеренной на 3-5%. Статистическая обработка производственных данных дает возможность оценить производственные взаимосвязи между агрегатами станции и границы решения новых задач, но не позволяет строить стратегию управления энергоресурсами. Для решения оптимизационных задач необходимо привлекать математические модели более высокого уровня, которые адаптируются на конкретные технологические условия. Новым подходом к поиску глобального оптимума выбора соотношений между количеством природного газа и

вторичными энергоресурсами (ВЭР) является решение локальных оптимизационных задач с последующим объединением решений и формулировкой критериальных оценок, исходя из стратегических технико-экономических задач функционирования всего промышленного предприятия [7].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В результате статистической обработки производственных данных по ПВЭС-1 ОАО «ММК», оснащенных турбинами противодавления, найдена регрессионная зависимость между электрической мощностью, параметрами пара на входе в турбину и параметрами пара в паровой сети предприятия как для условно-летнего, так и для условно-зимнего периода эксплуатации.

2. Составлена математическая модель связи прироста паропроизводительности паровоздуховодной станции с тремя однотипными котлами с расходом условного топлива, обеспечивающая минимизацию удельного расхода при решении задачи роста выработки электроэнергии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агапитов Е.Б., Агапитов А.Е. Математическое обеспечение программного модуля Grid-системы оценки эффективности работы электростанций на металлургическом предприятии // Электротехнические системы и комплексы. 2015. №4(29). С.25-30.
2. Агапитов А.Е., Агапитов Е.Б. К вопросу оценки риска окупаемости инвестиций в модернизацию электростанций металлургического предприятия // XV Международная научно- практическая конференция «Менеджмент XXI века: антикризисные стратегии и управление рисками», 24-26 ноября 2015г.: сб. науч. статей. С.-Петербург: ФГБОУ ВПО «РГПУ им. А.И.Герцена», 2015. С.171-175.
3. Агапитов Е.Б., Каблукова М.С. Моделирование горения газообразных ВЭР металлургического предприятия в топках компактных паровых котлов // Энергетики и металлургии настоящему и будущему России: материалы 15-й Всерос. науч.-практ. конф. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2014. С.59-62.
4. Бернас С., Цек З. Математические модели элементов электроэнергетических систем: пер. с польск. М.: Энергоиздат, 1982. 312 с.
5. Копцев Л.А. Оптимизация энергобаланса собственных электростанций ОАО «ММК» // Энергосбережение на промышленных предприятиях: материалы второй Международ. науч.-техн. конференции. Магнитогорск, 2000. 323 с.
6. Уилкс С. Математическая статистика / пер с англ. А.М. Кагана; под ред. Ю.Б. Линника. М.: Наука, 1967. 632 с.
7. Мунц В.А.. Энергосбережение в энергетике и теплотехнологиях. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2006. 136 с.
8. Energy and waste management in the steel industry. Met. Plant and Techn. Int. 1997. 20, no.6.
9. Energy Enviromental Managment System (EEMS). Voest-Alipine. Industrialagenbaum. 1998. 45 p. Picandet L. Temperature control using fuzzy logic. Application note.
10. Fridlung, A.J. Sophisticated STATISTICA Is a Slick Jack-of-all-trades. Info World. 1995.

Поступила в редакцию 04 апреля 2016 г.

INFORMATION IN ENGLISH

IMPROVING THE EFFICIENCY OF TBS POWER PLANT OF METALLURGICAL ENTERPRISE IN SOLVING MULTI-OBJECTIVE PROBLEMS

Evgeniy B. Agapitov

D.Sc.(Eng.), Professor, Power Engineering and Automated Systems Institute, Heat and Electrical System Engineering Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: jek_agapitov@mail.ru.

Vladimir N. Mikhaylovskiy

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

Rinat N. Dautov

OJSC "MMK", Magnitogorsk, Russia.

Margarita S. Kablukova

Teaching Assistant, Power Engineering and Automated Systems Institute, Heat and Electrical System Engineering Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Artem E. Agapitov

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

The paper describes the analysis of the TBS power plant operation in the structure of the power supply system at a metallurgical enterprise and determines the ways of energy efficiency improving. Some relationships were offered, which reflect the dependence between the power of turbine-generators and parameters of steam load for summer and winter periods of the station operation; the relationships can be used to develop mathematical models of the station operation.

Keywords: TBS, steel plant, energy resources, analysis of data.

REFERENCES

1. Agapitov E.B., Agapitov A.E. Software of Program Module Grid-system for Evaluating the Performance of Power Plants at Metallurgical Enterprises. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical systems and complexes], 2015, no.4 (29), pp.25-30. (In Russian).
2. Agapitov A.E., Agapitov E.B. Risk Assessment of Return on Investment in Enhancement of Power Plants at Metallurgical Enterprise. *XV Mezhdunarodnaya nauchno- prakticheskaya konferentsiya «Menedzhment KhKh1 veka: antikrizisnye strategii i upravlenie riskami», 24-26 noyabrya 2015g.: sb. nauch. statey* [XV International scientific and practical conference "Management of XXI century: anti-crisis strategy and risk management", November 24-26, 2015, collection of scientific articles], 2015, pp.171-175. (In Russian).
3. Agapitov, E.B., Kablukova M.S. Modeling of Gaseous VER Burning at Metallurgical Enterprise in Furnaces of Compact Boilers. *Energetiki i metallurgi nastoyashchemu i budushchemu Rossii: materialy 15 y Vseros. nauch.-prakt. konf* [Power engineering and metallurgy of present and future of Russia: Proceedings of 15th All-Russian scientific-practical Conf]. Magnitogorsk, Publishing center of Nosov Magnitogorsk state technical University, 2014, p. 59 - 62. (In Russian).
4. Bernes C., Zec Z. *Matematicheskie modeli elementov elektroenergeticheskikh sistem* [Mathematical Models of Elements of Electric Power Systems]. Moscow, Energoizdat Publ., 1982. 312 p.
5. Koptsev L.A. Optimizing the Energy Mix of Internal Power Plants of OJSC "MMK". *Energoberezhenie na promyshlennykh predpriyatiyakh: materialy vtoroy Mezhdunar. nauch.-tekhn. konferentsii* [Energy saving in industry: Proceedings of the Second International Scientific and Technical Conference]. Magnitogorsk, 2000. 323 p. (In Russian).
6. Uilks S. *Matematicheskaya statistika* [Mathematical Statistics]. Moscow, Nauka Publ., 1967. 632 p.
7. Munz V.A. *Energoberezhenie v energetike i teplotekhnologiyakh* [Energy Saving in Energy and Heat Technologies]. Yekaterinburg, Ural State Technical University Publ., 2006. 136 p.
8. Energy and waste management in the steel industry. *Met. Plant and Techn. Int.* 1997. 20, no.6.
9. Energy Environmental Management System (EEMS). Voest-Alipine. Industrialagenbaum. 1998. 45 p. Picandet L. Temperature control using fuzzy logic. Application note.
10. Fridlung, A.J. Sophisticated STATISTICA Is a Slick Jack-of-all-trades. Info World. 1995.

Грунтович Н.В.¹, Капанский А.А.², Федоров О.В.³

¹ФГБОУ ВО «Брянский государственный аграрный университет»

²УО «Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого»

³ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева»

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФАКТОРОВ НА ФОРМИРОВАНИЕ УДЕЛЬНЫХ И ОБЩИХ РАСХОДОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ ВОДОСНАБЖЕНИЯ

В работе представлены результаты исследования факторов, формирующих общее и удельное электропотребление в технологических системах водоснабжения. Исследования проводились для трех независимых водоканалов Республики Беларусь. В результате установлена связь между электропотреблением, объемами поднятой из скважин воды и температурой окружающей среды. Установлено, что условно-постоянная величина электропотребления доходит до 80 % от общих затрат электроэнергии водоснабжающих предприятий. Наиболее весомый вклад, определяющий постоянство электропотребления, связан с необходимостью непрерывного поддержания давления в диктующих точках системы даже при отсутствии разбора воды. Установлено, что территориальное расширение трубопроводных сетей приводит к росту условно-постоянной составляющей электропотребления и увеличению чувствительности удельного расхода электроэнергии, к изменениям объемов производства. Результаты научных исследований могут быть использованы организациями жилищно-коммунального хозяйства, оказывающими услуги водоснабжения, при анализе эффективности внедрения энергосберегающих мероприятий и выборе приоритетных направлений экономии ТЭР.

Ключевые слова: энергоэффективность, система водоснабжения, топливно-энергетические ресурсы, электроэнергия, водоснабжение, формирующие факторы, общие и удельные расходы электроэнергии.

ВВЕДЕНИЕ

Выполнение комплекса организационных и технических мероприятий, направленных на снижение энергопотребления, всегда остается актуальной задачей в современных условиях функционирования промышленных и жилищно-коммунальных потребителей. Активное внедрение современных энергосберегающих технологий, развитие системы управления энергоэффективностью (ЭЭФ) и разработка действенных способов и методов выявления скрытых резервов экономии топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) приводит к снижению энергоемкости производства и, в конечном счете, повышает энергетическую безопасность любого развитого государства.

В последние годы экономический эффект от проводимых энергосберегающих мероприятий заметно сократился. К примеру, активная политика энергосбережения в жилищно-коммунальном хозяйстве за 2006-2010 гг. позволила обеспечить экономию в размере 1 313 тыс. т у. т. при среднегодовом значении 262,6 тыс. т у. т. [1]. Однако экономический эффект от энергосберегающих мероприятий уже за 2014 г. снизился до 169,7 тыс. т у. т. [2].

Технологические системы водоснабжения, входящие в структуру ЖКХ, также столкнулись с проблемой снижения результативности внедряемых энергосберегающих мероприятий и зачастую не получают даже часть того эффекта, который был технически обоснован. В ряде случаев это связано с тем, что существующие способы оценки показателей ЭЭФ водоснабжающих организаций основываются на анализе режимов работы единичных электроприемников и не позволяют учесть всю сложность взаимодействия структурных подсистем, формирующих ЭЭФ (рис. 1).

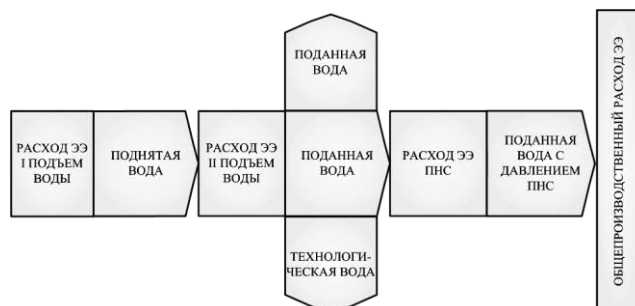


Рис. 1. Взаимодействие энергетических потоков в системе водоснабжения

К наиболее значимой подсистеме, участвующей в формировании ЭЭФ, следует отнести подсистему насосных станций, суммарные установленные мощности которых для крупного промышленного центра достигают уровня в 50 МВт и ежегодно растут. Кроме того, увеличение общих и удельных расходов электроэнергии (ЭЭ) в технологических системах водоснабжения напрямую связано с развитием и строительством городов и населенных пунктов, которые предусматривают плановый рост трубопроводных сетей и ввод в эксплуатацию дополнительных насосных станций. На текущий момент в Республике Беларусь уже насчитывается 1460 организаций, оказывающих услуги водоснабжения, из них 144 организации относятся к системе Министерства жилищно-коммунального хозяйства, на долю которых приходится более 85 % объема оказываемых услуг [1].

МЕТОДИКИ

В условиях снижения эффективности энергосберегающей политики актуальной задачей является исследование физических основ протекания технологических процессов в системе водоснабжения, поиск и ана-

лиз факторов, формирующих общие и удельные расходы ЭЭ.

Как объект управления система водоснабжения обладает свойством целостности и неделимости, именно поэтому исследование влияющих факторов базируется на построении многофакторных аддитивных моделей электропотребления, основанных на обработке статистических наблюдений методами регрессионного анализа [3-5]. В состав информационной базы данных (ИБД) входит суточная статистика ретроспективных производственных показателей, т.е. фактически обработанных показателей прошедшего периода исследования [6]. Эти показатели позволяют учесть действительное изменение объемов производства, климатические особенности региона, а также фактические затраты электроэнергии при транспортировке питьевой воды [7, 8].

По характеру исходной информации можно выделить интегральную, т.е. накопительную, и усредненную статистику, которая формируется по средним показателям влияющих величин.

Для системы водоснабжения интегральной статистикой являются объемы поднятой из скважин воды, изменение которых отражает прирост либо снижение технологических расходов ЭЭ в соответствии с формулой

$$W_{\text{тех}} = w_{\text{уд.тех}} \cdot Q = w_{\text{уд.тех}} \cdot \sum q_i, \quad (1)$$

где $w_{\text{уд.тех}}$ – удельный технологический расход ЭЭ, кВт·ч/тыс. м³; Q – объем поднятой воды в заданном периоде исследования, тыс. м³; q_i – суточный объем поднятой воды, тыс. м³.

По усредненной статистике определяются затраты, связанные с влиянием температуры наружного воздуха на изменение общих и удельных расходов ЭЭ:

$$W_{\text{п.ф}} = a \cdot t_{\text{окр}} \cdot N = \sum a \cdot t_{\text{окр.}i}, \quad (2)$$

где N – количество дней в исследуемом периоде, сут; $t_{\text{окр}}$ – усредненное значение температуры окружающей среды в исследуемом периоде, °C; a – коэффициент регрессии температурного фактора, кВт·ч/°C; $t_{\text{окр.}i}$ – среднесуточная температура окружающей среды, °C.

Проведенные ранее исследования позволили выявить общую структуру модели электропотребления в системе водоснабжения, которая может быть представлена в виде суммы технологических, условно-постоянных и прочих факторов, формирующих затраты ЭЭ [9]:

$$\begin{aligned} W &= w_{\text{уд.тех}} \cdot Q + \sum x_k \cdot b_k + W_{\text{усл.п}} = \\ &= W_{\text{тех}} + W_{\text{п.ф}} + W_{\text{усл.п}}, \end{aligned} \quad (3)$$

где x_k – факторный признак модели; b_k – коэффициент регрессии модели перед фактором x_k ; $W_{\text{усл.п}}$ – условно-постоянный расход ЭЭ, кВт·ч; $W_{\text{тех}}$ – технологический расход ЭЭ, кВт·ч; $W_{\text{п.ф}}$ – расход ЭЭ, обусловленный включением в модель прочих факторов, не связанных с технологическими, кВт·ч.

В общем виде удельное электропотребление, отнесенное к объемам поднятой воды, может быть представлено:

$$\begin{aligned} w_{\text{уд}} &= w_{\text{уд.тех}} + \frac{\sum x_k \cdot b_k + W_{\text{усл.п}}}{Q} = \\ &= w_{\text{уд.тех}} + \frac{W_{\text{п.ф}} + W_{\text{усл.п}}}{Q}. \end{aligned} \quad (4)$$

Исследования факторов, формирующих общие и удельные расходы ЭЭ, проводились для трех независимых водоканалов Республики Беларусь: КПУП «Гомельводоканал» (г. Гомель); КЖУП «Уником» (г. Жлобин); УП «Витебскводоканал» (г. Витебск). Статистика, используемая при построении моделей, охватывала суточный объем выборки в течение года. За период исследования принят: для Гомеля – 2013 год, для Витебска и Жлобина – 2014 год.

В результате статистической обработки данных системы водоснабжения установлена связь между электропотреблением, объемами поднятой из скважин воды и температурой окружающее среды. При этом приведенное выражение (4) отражает гиперболическое снижение удельного расхода ЭЭ при возрастании объемов производства. Это означает, что увеличение объема воды, поднимаемой из скважин и доставляемой потребителю, сопровождается снижением удельного расхода ЭЭ.

Стоит отметить, что характеристики удельного расхода ЭЭ для различных водоснабжающих систем могут существенно отличаться, что связано в первую очередь с особенностями их функционирования.

К примеру, несмотря на самую большую загрузку предприятия КПУП «Гомельводоканал» с фактическим годовым объемом производства 42500 тыс. м³/год, удельный расход ЭЭ из группы исследуемых объектов получился наибольшим и составил 740 кВт·ч/тыс. м³. При этом для УП «Витебскводоканал» и КЖУП «Уником» при объемах производства 28055 и 6543 тыс. м³/год эти показатели составили 584 и 511 кВт·ч/тыс. м³ соответственно. Это означает, что общий вид гиперболической характеристики удельного расхода ЭЭ не является универсальным, а отражает структуру взаимосвязи технологических подсистем в рамках исследуемой системы и общее состояние ЭЭФ конкретного предприятия.

На рис. 2 приведены сравнительные характеристики удельного расхода ЭЭ для исследуемых систем водоснабжения, где отражен факт того, что даже при одинаковых объемах производства показатели ЭЭФ будут существенно отличаться. Эти отличия связаны в первую очередь с соотношением технологических и условно-постоянных затрат ЭЭ в общем электропотреблении предприятия. К примеру, для водоканалов Жлобина и Витебска состав удельного расхода ЭЭ формируют по большей части технологические расходы ЭЭ, т.е. те расходы, которые напрямую связаны с транспортом воды, в результате чего характеристика принимает более пологий вид и, соответственно, меньшую чувствительность к изменениям объемов производства [10]. В то же время для водоканала Гомеля доля технологической составляющей ЭЭ существенно ниже условно-постоянной, в результате чего характеристика удельного расхода ЭЭ приобретает более крутой вид.

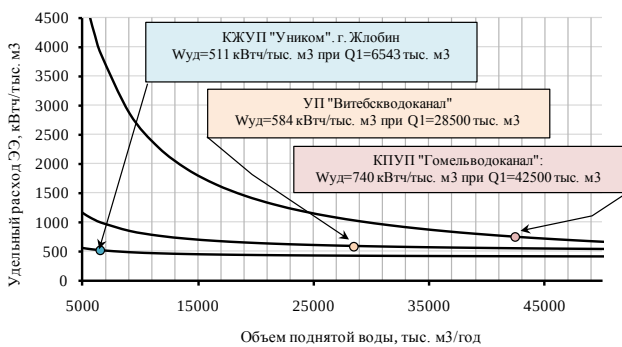


Рис. 2. Сравнение удельных расходов ЭЭ для различных водоканалов

Приведенные на рис. 2 зависимости, полученные в результате статистической обработки производственных показателей, позволяют предприятиям осуществлять прогнозы удельного расхода ЭЭ при изменении объемов поднятой из скважин воды.

Полученные математические закономерности изменения удельного расхода ЭЭ и некоторые статистические показатели моделей для исследуемых технологических систем водоснабжения приведены в таблице ниже.

Чтобы оценить фактический вклад каждой из составляющих в общем электропотреблении, в практике регрессионного анализа используются частные коэффициенты эластичности [11], показывающие, на сколько процентов в среднем изменится значение электропотребления при изменении значения соответствующего фактора:

$$\mathcal{E}_x = b_k \cdot \bar{x}_i / \bar{W}, \quad (5)$$

где $\bar{x}_i$ – среднее значение влияющего фактора; $\bar{W}$ – среднее значение электропотребления.

В результате анализа коэффициентов регрессии модели КПУП «Гомельводоканал» выявлено, что значение условно-постоянной составляющей расхода ЭЭ доходит до 80 %, т.е. фактически лишь 20 % затрат ЭЭ связаны с непосредственным транспортом воды. Степень влияния условно-постоянной модели удельного расхода ЭЭ в системе водоснабжения водоканала Витебска и Жлобина составила 21,7 и 22,4% соответственно.

Традиционно постоянство ЭЭ определяет работа электроустановок, не связанная с подъемом и подачей воды потребителю, т.е. работа осветительных установок, хозяйственно-бытовые и санитарно-гигиенические нужды предприятия, работа вспомогательных и обслуживающих цехов (ремонтно-механический цех, участок по ремонту приборов учета и расхода воды и т.д.).

Кроме того, технологические операции, связанные с повышением качества питьевой воды (промывка фильтровальных сооружений, испытание откачками, дезинфекция и промывка водозаборных скважин и т.д.), определяют строгим временным регламентом и не зависят от производственной программы предприятия, что повышает долю постоянных затрат ЭЭ.

Однако фактически общехозяйственные и технологические нужды водоснабжающих предприятий не являются значимой причиной роста постоянных затрат

ЭЭ. Наиболее весомый вклад вносит тот факт, что водозаборы предприятий обеспечивают непрерывное поддержание сетевого давления на заданном уровне независимо от объемов производства, опираясь при этом на регламентируемый график давления насосных станций второго подъема. Кроме того, развитие трубопроводной системы также приводит к росту условно-постоянной составляющей из-за отдаленности потребителей от источников водоснабжения. Проведенные исследования позволили установить практически линейную зависимость условно-постоянного расхода ЭЭ от общей протяженностей трубопроводных сетей, находящихся на балансе предприятия (рис. 3).

Таким образом, с одной стороны, ежегодное территориальное расширение трубопроводных сетей приводит к росту условно-постоянной составляющей ЭЭ, а с другой стороны, общие объемы оказываемых услуг водоснабжающих предприятий заметно сокращаются, что в общем случае является основной причиной повышения чувствительности удельного расхода ЭЭ к изменениям объемов производства [10].

Затраты ЭЭ, обусловленные непосредственной транспортировкой питьевой воды в натуральном выражении на 1 тыс. м³ для Гомеля оказались самыми низкими и составили 167,9 кВт·ч, при этом для Витебска и Жлобина эти показатели составили 461,9 и 393,1 кВт·ч соответственно. В процентном отношении технологические затраты ЭЭ Витебска и Жлобина являются преобладающими и составляют 79,1 и 77,1 % соответственно.

Кроме того, наблюдается влияние температуры наружного воздуха на формирование общих и удельных расходов ЭЭ. Значимость температурного фактора связана, во-первых, с изменением режимов работы общезаводских установок, во-вторых, с ростом температуры уменьшаются потери напора в трубопроводах, которые зависят от кинематической вязкости жидкости [12]. Таким образом, уменьшение температуры приводит к росту гидравлического сопротивления при движении воды и соответственно увеличению затрат электроэнергии. Для системы водоснабжения Гомеля увеличение температуры окружающей среды приводит к уменьшению электропотребления на 350,1 кВт·ч, в то время как для системы водоснабжения Витебска это влияние составило 28,97 кВт·ч.

Однако увеличение температуры не всегда приводит к снижению электропотребления. В результате исследования системы водоснабжения Жлобина выявлен обратный эффект. Прирост температуры наружного воздуха на 1 °С приводит к росту электропотребления на 8,8 кВт·ч.

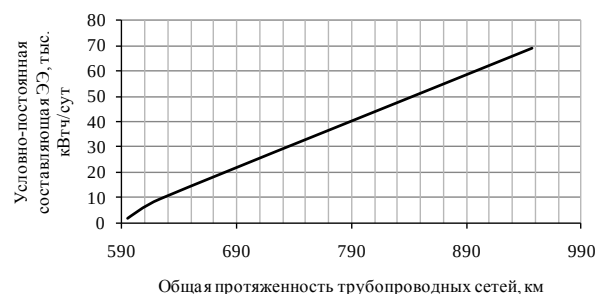


Рис. 3. Влияние протяженности трубопроводных сетей на условно-постоянную составляющую затрат ЭЭ

Прирост затрат ЭЭ в наиболее теплые дни обуславливается включением дополнительных насосных агрегатов и устройств очистки питьевой воды в связи с увеличением водоразбора, что покрывает эффект от снижения общезаводских и технологических расходов ЭЭ.

Номограмма **рис. 4** наглядно отражает влияние температурного фактора и объемов производства на изменение удельного расхода электроэнергии.

Стоит отметить, что суточное влияние температуры в течение года вносит существенный вклад в формирование общих и удельных расходов электроэнергии, несмотря на то, что среднегодовое значение не превышает 3,0%. Так, на примере Гомеля при самой высокой среднесуточной температуре за 2013 г. (25,8°C) удельный расход ЭЭ при суточном объеме поднятой воды 120 тыс. м³ составил 669 кВт·ч/тыс. м³, тогда как при самой низкой температуре наружного воздуха – 14,6°C и сохранении объемов производства удельный расход ЭЭ вырос до 787 кВт·ч/тыс. м³. В общем случае значимость температуры наружного воздуха для исследуемого предприятия в формировании общих и удельных расходов ЭЭ варьируется от -10,94% до 5,4%.

Результаты анализа степени влияния факторов, формирующих удельные и общие расходы ЭЭ, приведены на **рис. 5**.

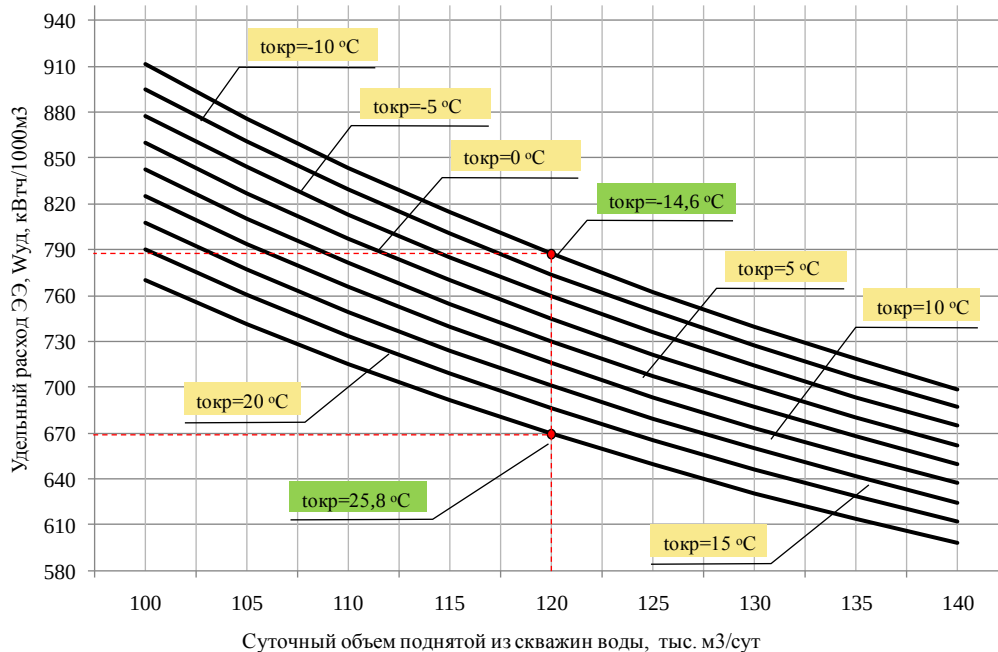
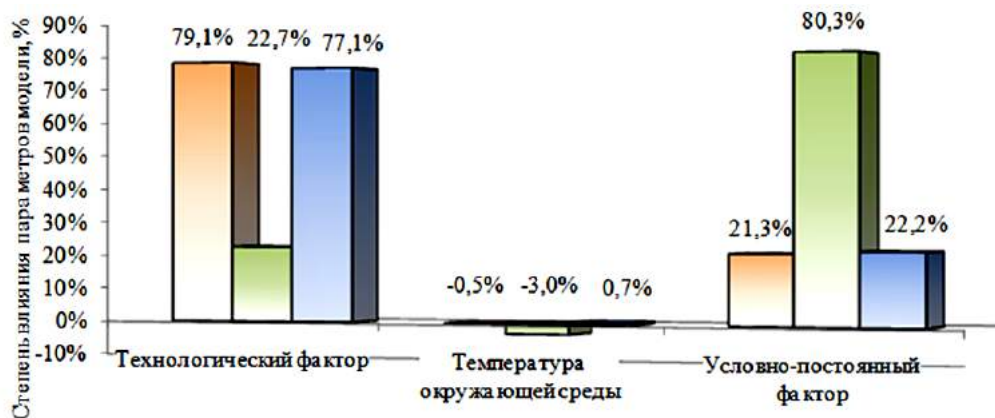


Рис. 4. Номограмма удельного расхода ЭЭ при изменении суточных объемов подъема воды и температуры окружающей среды



	Технологический фактор	Температура окружающей среды	Условно-постоянный фактор
УП "Витебскводоканал"	79,1%	-0,5%	21,3%
КПУП "Гомельводоканал"	22,7%	-3,0%	80,3%
КЖУП "Уником"	77,1%	0,7%	22,2%

□ УП "Витебскводоканал" □ КПУП "Гомельводоканал" □ КЖУП "Уником"

Рис. 5. Степень влияния факторов на формирование общего и удельного расхода ЭЭ в системе водоснабжения

Исследование модели удельного расхода ЭЭ в системе водоснабжения

Объект исследования	Показатель	Значение
Система водоснабжения КПУП «Гомельводоканал»	Математическая модель суточного удельного расхода ЭЭ	$W_{уд} = 167,9 + \frac{-350,1 \cdot t_{окр} + 69228,3}{Q}$
	Коэффициент детерминации	0,8
	Среднее квадратическое отклонение погрешности модели, %	2,95
	Среднесуточный объем поднятой воды, тыс. м ³	123,3
Система водоснабжения УП «Витебскводоканал»	Математическая модель суточного удельного расхода	$W_{уд} = 461,9 + \frac{-28,97 \cdot t_{окр} + 9717,12}{Q}$
	Коэффициент детерминации	0,75
	Среднее квадратическое отклонение погрешности модели, %	3,0
	Среднесуточный объем поднятой воды, тыс. м ³	76,7
Система водоснабжения КЖУП «Уником»	Математическая модель суточного удельного расхода	$W_{уд} = 393,1 + \frac{8,84 \cdot t_{окр} + 2028,9}{Q}$
	Коэффициент детерминации	0,92
	Среднее квадратическое отклонение погрешности модели, %	2,9
	Среднесуточный объем поднятой воды, тыс. м ³	17,8

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Установлена связь между электропотреблением, объемами поднятой из скважин воды и температурой окружающей среды.

2. Характеристика удельного расхода электрической энергии не является универсальной, а отражает структуру взаимосвязи технологических подсистем в рамках исследуемой системы и в общее состояние ЭЭФ конкретного водоснабжающего предприятия.

3. Отличия удельных характеристик связаны с соотношением технологических и условно-постоянных затрат электроэнергии в общем электропотреблении предприятия.

4. Наиболее весомый вклад, определяющий постоянство электропотребления, связан с необходимостью непрерывного поддержания давления в диктующих точках системы даже при отсутствии разбора воды.

5. Территориальное расширение трубопроводных сетей приводит к росту условно-постоянной составляющей электропотребления и увеличению чувствительности удельного расхода ЭЭ к изменениям объемов производства.

6. Значимость температуры наружного воздуха в формировании общих и удельных расходов электроэнергии варьируется от -10,94% до 5,4%.

Работа выполнена в рамках государственной программы научных исследований РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ – задание 2.2.36 «Энергобезопасность, энергоэффективность и энергосбережение, атомная энергетика», подпрограмма «Разработка методологических принципов управления энергоэффективностью основных технологических процессов для снижения энергоемкости продукции» – №Г.Р.20141922 от 20.08.2014.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Постановление коллегии Министерства жилищно-коммунального хозяйства Республики Беларусь № 1 от 28 января «Об итогах работы в 2014 году и задачах по повышению эффективности работы и модернизации жилищно-коммунального хозяйства на 2015 год». Минск, 2015.
2. Углубленный обзор политики и программ в сфере энергоэффективности Республики Беларусь / Секретариат энергетической хартии. Минск, 2013.
3. Токочакова Н.В., Мороз Д.Р. Расчетно-статистические модели режимов потребления электроэнергии как основа нормирования и оценки энергетической эффективности // Энергоэффективность. 2006. №1. С.14-15.; 2006. №2. С. 14-15.
4. Токочакова Н.В. Управление энергоэффективностью промышленных потребителей на основе моделирования режимов электропотребления // Изв. вузов и энергетических объединений СНГ. Энергетика. 2006. №3. С.67-75.
5. Олейников В.К., Никифоров Г.В. Анализ и управление электропотреблением на металлургических предприятиях: учеб. пособие. Магнитогорск: МГТУ им. Г. И. Носова, 1999. 219 с.
6. Грунтович Н.В., Мороз Д.Р., Капанский А.А. Развитие методического обеспечения диагностирования и прогнозирования энергоэффективности технологических систем водоснабжения и водоотведения. // Энергоэффективность. 2015. №3. С.20-23.
7. Грунтович Н.В., Капанский А.А. Диагностирование и прогнозирование показателей энергоэффективности технологических систем водоснабжения и водоотведения // Инновации в энергосбережение – инвестиции в будущее / ККУП «Витебский областной центр маркетинга». Витебск, 2015. С.47-51.
8. Олейников В.К., Никифоров Г.В. Нормирование энергозатрат при многономенклатурном производстве // Промышленная энергетика. 2000. №6. С.30–32.
9. Грунтович Н.В., Грунтович Н.В., Капанский А.А. Прогнозирование энергоэффективности технологических систем

водоснабжения и водоотведения при внедрении мероприятий по энергосбережению // *Энергоэффективность*. 2016. №1. С.44-48.

10. Капанский А.А. Оценка чувствительности показателей энергоэффективности при изменении производственных программ в системах водоснабжения и водоотведения/ А.А. Капанский // *Материалы IX международной научно-*

технической конференции / под общ. ред. Маркарян Л.М.. Брянск, 2015.

11. Комплексный экономический анализ хозяйственной деятельности: учебник / Л.Г. Гиляровская [и др.]. М.: ТК Велби, Изд-во Проспект, 2008. 360 с.
12. Теория и практика систем водоотведения. Учебное пособие фирмы Grundfos.

Поступила в редакцию 22 апреля 2016 г.

INFORMATION IN ENGLISH

STUDY OF INFLUENCE OF FACTORS ON FORMATION OF SPECIFIC AND GENERAL CONSUMPTION OF ELECTRICAL ENERGY IN TECHNOLOGY WATER SYSTEM

Nadezhda V. Gruntovich

D.Sc.(Eng.), Professor, Bryansk State Agricultural University, Bryansk Region, Russia. E-mail: gruntovich@tut.by.

Aleksey A. Kapanskiy

Master of Eng., Belarus, Sukhoi State Technical University of Gomel, Gomel, Belarus. E-mail: kapanski@mail.ru.

Oleg V. Fedorov

D.Sc.(Eng.), Professor, Nizhny Novgorod State Technical University n.a.R.E.Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia.

The paper presents the results of a study of factors that shape the general and the specific electricity consumption in industrial water systems. The studies were conducted for three independent water utilities of the Republic of Belarus. As a result, a link between electricity consumption, amounts raised from the water wells and ambient temperature was established. It was found that the conditional constant electricity consumption up to 80% of the total electricity consumption of water-supply companies. The most significant contribution to defining the constancy electricity consumption is the need to continuously maintain the pressure in the system dictating the points even in the absence of water consumption. It was found that the territorial expansion of pipeline networks leads to an increase of conditionally constant component of electricity consumption and increase of the sensitivity of specific energy consumption as well as to changes in production volumes. The results of the scientific research can be used by organizations utilities providing water services, the analysis of effectiveness of the implementation of energy saving measures and the choice of priorities of the economy of energy resources.

Keywords: Energy, water supply, fuel and energy resources, electricity, water, forming factors, general and specific consumption of electricity.

REFERENCES

1. Decree of Ministry of the Republic of Belarus public utility number 1 of January 28, "On the results of work in 2014 and tasks for increasing efficiency in operation and modernization of housing and communal owners for 2015". Minsk, 2015.
2. *Uglublennyyi obzor politiki i program v sfere energoэффективности Respubliki Belarus* [In-depth Review of Policies and Programs in the Field of Energy Efficiency of the Republic of Belarus]. Energy Charter Secretariat. Minsk, 2013.
3. Tokochakova N.V., Moroz D.R. Calculation and Statistical Models Mode in Electricity Consumption as the Basis of Rationing and Evaluation of Energy Efficiency. *Energoэффективность* [Energy efficiency], 2006, no.1, pp.14-15; 2006, no.2, pp.14-15. (In Russian).
4. Tokochakova N.V. Managing Industrial Energy Consumers on the Basis of Electric Power Consumption Mode Simulation. *Izv. vuzov i energeticheskikh ob"edineniy SNG.*

Energetika [Proceedings of higher educational institutions and associations of the CIS energy. Energy], 2006, no.3, pp.67-75. (In Russian).

5. Oleynikov V.K., Nikiforov G.V. *Analiz i upravlenie elektropotrebleniem na metallurgicheskikh predpriyatiyakh* [Analysis and Management of Electricity Consumption at Metallurgical Enterprises]. Magnitogorsk: Nosov MSTU Publ., 1999. 219 p.
6. Gruntovich N.V., Moroz D.R., Kapanskiy A.A. Development of Methodical Support of Diagnostics and Forecasting of Energy Technological Water and Wastewater Systems. *Energoэффективность* [Energy efficiency], 2015, no.3, pp.20-23. (In Russian).
7. Gruntovich N.V., Kapanskiy A.A. Diagnosing and Forecasting of Energy Efficiency of Technological Water and Wastewater Systems. *Innovatsii v energosberezhenie – investitsii v budushchee. KKUP «Vitebskiy oblastnoy tsentr marketinga»* [KKUP «Vitebsk Regional Marketing Center»]. Vitebsk, 2015, pp.47-51. (In Russian).
8. Oleynikov V.K., Nikiforov G.V. Rationing of Energy Consumption in Multiproduct Manufacturing. *Promyshlennaya energetika* [Industrial power], 2000, no.6, pp.30-32. (In Russian).
9. Gruntovich N.V., Gruntovich N.V., Kapanskiy A.A. Energy Forecasting of Technological Water and Wastewater Systems in Implementation of Energy Saving Measures. *Energoэффективность* [Energy efficiency], 2016, no.1, pp.44-48. (In Russian).
10. Kapanskiy A.A. Evaluation of Energy Efficiency Sensitivity When Changing Production Programs in Water and Wastewater Systems. *Materialy IX mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii* [Proceedings of the IX International scientific and technical conference]. Bryansk, 2015. (In Russian).
11. Gilyarovskaya L.G. [et al.] *Kompleksnyi ekonomicheskiy analiz khozyaystvennoy deyatel'nosti* [Comprehensive economic analysis of economic activity. Textbook]. Moscow, T.K. Welby, Publishing House of the Prospectus, 2008. 360 p.
12. *Teoriya i praktika sistem vodoootvedeniya* [Theory and Practice of Wastewater Systems]. Grundfos textbook.

Андреев С.М., Ахметов Т.У., Нужин Д.В., Парсункин Б.Н.

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

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ТОПЛИВОСБЕРЕГАЮЩИМ НЕСИММЕТРИЧНЫМ НАГРЕВОМ НЕПРЕРЫВНОЛИТЫХ ЗАГОТОВОК ПЕРЕД ПРОКАТКОЙ

Рассмотрены результаты теоретического обоснования и практической реализации в реальных производственных условиях автоматизированной системы топливосберегающего управления, реализующий несимметричный режим нагрева непрерывнолитых слябовых заготовок в методических печах в условиях нестационарной работы широкополосного стана горячей прокатки. Учитывая значительные тепловые потери в нижних зонах нагрева, система управления реализует, в зависимости от реальной производственной ситуации, дифференцированное распределение подачи топлива в верхние и нижние зоны нагрева печи в пропорции 0,8-1,0 в зависимости от темпа продвижения заготовок по длине печи. Коэффициент несимметричности распределения тепловых нагрузок между верхними и нижними зонами изменяется от 1,0 при максимальной производительности печи (симметричный нагрев) до 0,8 при производительности печи 20% от максимальной. Управление топливосберегающим режимом нагрева в верхних зонах производится по температуре поверхности нагреваемого металла, измеряемой оптическими пирометрами. В нижних зонах управление осуществляется по температуре рабочего пространства, измеряемой термопарами в защитных карборундовых стаканах.

Ключевые слова: топливосберегающий нагрев, нагрев заготовок перед прокаткой, измерение температуры поверхности, гарантированный нагрев, методические печи.

ВВЕДЕНИЕ

Важной технологической операцией при производстве горячекатаного широкополосного листового проката для оборонной, судостроительной и трубной отраслей промышленного производства является нагрев металла в печах проходного типа перед прокаткой. В условиях нестационарного высокопроизводительного прокатного производства одним из основных способов энергосберегающего управления нагревом заготовок является использование систем оптимального управления тепловым режимом нагревательных печей.

К настоящему времени решению проблемы энергосберегающего управления нагревом посвящено много работ, начиная от использования стабилизирующих локальных контуров регулирования температуры в зонах нагрева до автоматизированных комплексов, осуществляющих управление процессом нагрева по заранее рассчитанным топливосберегающим температурным траекториям [1-3].

При анализе принципов работы известных систем управления нагревом заготовок в проходных нагревательных печах листопркатных станов можно сделать вывод о том, что алгоритмы расчета топливосберегающих температурных траекторий разработаны для условий «симметричного» распределения тепловых нагрузок между верхними и нижними зонами нагрева.

В реальных условиях полезное использование тепловой энергии от сгорания топлива в верхних и нижних зонах нагрева неодинаково. Это объясняется наличием значительных потерь тепла при охлаждении конструктивных элементов системы перемещения металла, расположенных в нижней части печи. Одним из вариантов решения задачи компенсации тепловых потерь в нижних зонах является увеличение расходов

топлива в нижние зоны по сравнению с верхними.

Затраты тепловой энергии на нагрев воды в водоохлаждаемых конструктивных элементах печи являются, скорее, вынужденными, чем полезными. При энергосберегающем управлении режимом нагрева заготовок эти потери целесообразно обоснованно снижать. Основной целью данной работы является использование предлагаемой автоматизированной системы энергосберегающего управления нагревом непрерывнолитых заготовок, которая обеспечивает несимметричный гарантированный нагрев металла до заданного теплового состояния при минимальных затратах топлива в нижние зоны.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕЙ СИСТЕМЫ НЕСИММЕТРИЧНОГО НАГРЕВА

Изменение температурного состояния нагреваемой непрерывнолитой слябовой заготовки по толщине можно аналитически определить из решения одномерного уравнения теплопроводности при соответствующих начальных и граничных условиях [4, 5].

Как правило, исследуется «симметричный» нагрев заготовок, при котором тепловые потоки на обе широкие стороны заготовки равны. В этом случае тепловое поле симметрично относительно центра заготовки. Поэтому при решении уравнения достаточно рассмотреть нагрев только половины S полной толщины заготовки S_0 , как показано на **рис. 1, а**. Коэффициент несимметричности нагрева μ в этом случае при $S=\mu \cdot S_0$ будет равен 0,5. Если производится односторонний нагрев с изолированной одной гранью, то в этом случае коэффициент несимметричности $\mu=1,0$.

Если тепловые потоки на плоскости заготовки не равны и основной нагрев осуществляется за счет верхних зон, то это приводит к несимметричности нагрева

(рис. 1, б). В этом случае для универсальности расчета используется фиктивная толщина $S_{\Phi}=2S=\mu \cdot S_0$ (см рис. 1, б) с последующим «отсечением» фиктивной части толщины пластины [2, 4].

Для снижения расходов тепловой энергии на нагрев при нестационарном режиме работы методических печей предложен оптимальный топливосберегающий режим управления нагревом, который учитывает не только распределение подачи топлива по зонам нагрева по длине печи, но и эффективное распределение топлива между верхними и нижними зонами с учетом текущей производительности печи и эффективности использования тепловой энергии в зонах.

При работе системы энергосберегающего управления необходимо обеспечить гарантированный нагрев заготовок от начального до заданного конечного температурного состояния за заданный интервал времени T (определяемый текущей производительностью прокатного стана) с соблюдением всех технологических и конструктивных ограничений при минимальном общем затраченном количестве топлива на нагрев.

Критерии (цели) оптимального управления несимметричного нагрева металла представлены в виде выражения соотношений функционалов:

$$I = \frac{I^B}{I^H} \rightarrow \max, \quad (1)$$

$$I^B = \int_0^T [U^B(\tau)]^2 d\tau \rightarrow \min, \quad (2)$$

$$I^H = \int_0^T [U^H(\tau)]^2 d\tau \rightarrow \min, \quad (3)$$

где I^B и I^H – соответственно суммарные затраты топлива в течение всего времени нагрева для верхних и нижних зон печи; $U^B(\tau)=k^B \cdot V^B(\tau)$ – характеристическая температура управления, пропорциональная расходу топлива в верхние зоны печи, °C; $U^H(\tau)=k^H \cdot V^H(\tau)$ – характеристическая температура управления, пропорциональная расходу топлива в нижние зоны печи, °C; $V^B(\tau)$ – текущий расход топлива в верхние зоны, м³/ч; $V^H(\tau)$ – текущий расход топлива в нижние зоны, м³/ч; k^B , k^H – коэффициенты передачи по каналам «расход топлива – характеристическая температура» соответственно в верхних и нижних зонах, (°C·ч)/м³.

Для обеспечения гарантированного нагрева заготовок в системе управления процессом нагрева производится минимизация оценки отклонения расчетного конечного состояния металла от заданного. С учетом максимального использования тепловой энергии верхних зон введен дополнительный критерий следующего вида:

$$J = (J_1 + J_2) \rightarrow \min, \quad (4)$$

$$J_1 = \int_0^x |t^3(x, T) - t^L(x, T)| dx, \quad (5)$$

$$J_2 = \int_0^T U^B(\tau) d\tau + k \cdot \int_0^T U^H(\tau) d\tau, \quad (6)$$

где $t^3(x, T)$ – заданное распределение температур по сечению заготовки; $t^L(x, T)$ – действительное распределение температур по сечению заготовки в конце времени нагрева T ; k – коэффициент несимметричности, пропорциональный μ и учитывающий потери тепла в нижних зонах.

В идеальном случае каждая непрерывнолитая заготовка должна нагреваться по индивидуальной оптимальной температурной траектории изменения температурного контролируемого параметра во времени. Реально на несколько расположенных в зоне заготовок часто с различным начальным тепловым состоянием и различающихся по теплофизическим свойствам (маркам стали) приходится одно управляющее воздействие – расход топлива в данной зоне нагрева и одно текущее значение контролируемого температурного параметра.

Динамику инерционного процесса теплопередачи от сжигаемого топлива к центру нагреваемой заготовки как объекта оптимального автоматического управления без существенного искажения физической сути процесса можно отразить как совместное решение трех дифференциальных уравнений [6].

$$T_0 \frac{\partial t_{ГС}(\tau)}{\partial \tau} + t_{ГС}(\tau) = k_0 \cdot V_T(\tau) = U(\tau), \quad (7)$$

$$T_1 \frac{\partial t_{ПОВ}(\tau)}{\partial \tau} + t_{ПОВ}(\tau) = t_{ГС}(\tau), \quad (8)$$

$$T_2 \frac{\partial t_{Ц}(\tau)}{\partial \tau} + t_{Ц}(\tau) = t_{ПОВ}(\tau), \quad (9)$$

где $t_{ГС}(\tau)$, $t_{ПОВ}(\tau)$, $t_{Ц}(\tau)$ – соответственно текущие значения температур греющей среды и поверхности нагреваемого металла и температуры центра нагреваемой заготовки, °C; T_0 , T_1 , T_2 – постоянная времени, характеризующая инерционность теплопередачи по соответствующим температурным параметрам, мин.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЯЮЩЕГО ВОЗДЕЙСТВИЯ И ТРАЕКТОРИЙ ИЗМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ТОПЛИВОСБЕРЕГАЮЩЕМ НЕСИММЕТРИЧНОМ РЕЖИМЕ НАГРЕВА

При определении оптимального управляющего воздействия $U^*(\tau)=k_0 \cdot V_T(\tau)$ при несимметричном режиме нагрева использован принцип максимума Л.С. Понтрягина [7], позволяющий эффективно решить поставленную задачу и определить траекторию оптимального $U^*(\tau)$. Алгоритм решения задачи оптимального управления применительно к нагреву массивных тел подробно изложен в работе [2].

Расчетные траектории изменения во времени управляющих воздействий $U^B(\tau)$ и $U^H(\tau)$, изменение температурных параметров $t_{ГС}^B(\tau)$ и $t_{ГС}^H(\tau)$ соответственно для верхних и нижних зон, траектории изменения температуры самой горячей $t_T^{ГОР}(\tau)$ и самой холодной $t_T^{ХОЛ}(\tau)$ точек заготовки в процессе топливосберегающего оптимального управления тепловым режимом при несимметричном распределении тепловых нагрузок по верхним и нижним зонам для заданного времени нагрева при $T=300$ мин и отсутствии технологиче-

ских ограничений представлены на **рис. 2**.

Анализ полученных зависимостей показывает, что при наличии значительного резерва времени на нагрев для реализации энергосберегающего режима управления нагревом необходима интенсификация нагрева на заключительном интервале общего заданного времени нагрева T . Этот результат полностью соответствует основному положению топливосберегающего режима нагрева [2, 7, 9].

В реальных производственных условиях при нагреве непрерывнолитых заготовок следует учитывать различные конструктивные и технологические ограничения. Основными из них являются следующие:

- ограничение на максимальное значение управляющего воздействия $U_{\text{MAX}}^B(\tau)$ и $U_{\text{MAX}}^H(\tau)$;
- ограничение на максимальное значение температуры греющей среды (или температуру рабочего пространства) $t_{\text{ГС}}^{\text{MAX}}(\tau)$;
- ограничение на максимальное допустимое значение температуры поверхности заготовки $t_{\text{ПОВ}}^{\text{MAX}}(\tau)$ (равное 1350-1370 °С);
- ограничение при нагреве холодных (со склада) заготовок на максимально допустимый температурный перепад $\Delta t^{\text{MAX}}(\tau) = t_{\text{ПОВ}}(\tau) - t_{\text{Ц}}(\tau)$, равный 200-250 °С, действующее до достижения среднemasсовой температуры заготовки 550-600 °С.

Соблюдение ограничений значительно снижает эффективность оптимального топливосберегающего управления режимом нагрева.

Так, при физическом моделировании режимов оптимального энергосберегающего управления нагревом на опытном компьютеризированном стенде [2,8], полностью имитирующим реальный режим управления нагревом, установлено следующее: если принять затраты тепловой энергии при соблюдении ограничений только на управляющее воздействие за 100%, то соблюдение дополнительно ограничения на максимальную температуру поверхности увеличивает затраты энергии до 117%, а соблюдение всех технологических ограничений увеличит затраты до 158%.

Структурная схема автоматизированной топливосберегающей системы управления несимметричным нагревом заготовок представлена на **рис. 3**. Объектом управления является процесс нагрева заготовок в методической печи. В каждой зоне нагрева установлены датчики, измеряющие температуру греющей среды $t_{\text{ГС}(i)}$ и температуру поверхности $t_{\text{ПОВ}(i)}$ во всех верхних зонах печи и дополнительно на входе и выходе из печи.

Для расчета темпа движения заготовок и определения текущего положения каждой заготовки в системе учитывается каждое перемещение подвижных балок.

Поддержание температуры заданной температуры поверхности нагреваемых заготовок и температуры рабочего пространства (греющей среды) в каждой зоне осуществляется локальным регуляторами температуры, управляющими подачей топлива в зону нагрева.

Задающим сигналом для каждого зонного регулятора является уставки температур по зонам $t_{\text{ПОВ}(i)}^3$ или $t_{\text{ГС}(i)}^3$, формируемые в блоке расчета тепловых нагрузок.

Блок расчета текущего темпа прохождения загото-

вок печи вычисляет темп v путем подсчета сигналов о перемещении шагающей балки за определенный интервал времени. Значение этого параметра непрерывно передается остальным блокам в относительных единицах, когда непрерывному движению или максимальному темпу (450 мм за 50 с) соответствует 100% и минимальному 0%. Текущее положение каждой заготовки по длине печи определяется в блоке расчета перемещения заготовок.

Блок распределения температуры греющей среды обеспечивает достоверность полученных значений при прохождении заготовок в местах установки датчиков температуры.

Блок расчета внутреннего теплового состояния заготовок с учетом текущего положения заготовки $X_m^{\text{Коорд}}$ и значений $t_{\text{ГС}}(\tau)$, $t_{\text{ПОВ}}(\tau)$ осуществляет расчет распределения температуры по сечению заготовки.

Расчет заданных значений регуляторам температуры в зонах $t_{\text{ПОВ}}^3(\tau)$ или $t_{\text{ГС}}^3(\tau)$ в зависимости от используемого параметра осуществляется в блоке расчета тепловых нагрузок по зонам нагрева, при поступлении в печь очередной заготовки, при изменении темпа движения заготовок или по команде оператора-технолога. Данный блок определяет поиск таких уставок температуры для локальных регуляторов, при которых процесс гарантированного нагрева заготовок до заданного конечного теплового состояния будет происходить с минимальными затратами топлива.

Поиск уставок температуры локальным регуляторам поочередно производится для всех заготовок, находящихся в зонах нагрева [9]. Общей уставкой температуры принимается максимальная уставка для зоны. Это необходимо для гарантированного нагрева самой «холодной» заготовки. В основе принципа функционирования блока использован вариационный модифицированный симплекс-метод Нелдера-Мида с ограничениями (метод Бокса) [10].

С использованием симплекс-метода определяются все необходимые коэффициенты, при которых разница между расчетными значениями $t_{\text{ПОВ}}^{\text{Рас}}(\tau)$ или $t_{\text{ГС}}^{\text{Рас}}(\tau)$ и реальными величинами $t_{\text{ГС}}(\tau)$, $t_{\text{ПОВ}}(\tau)$ минимальны.

Все информационные сигналы, используемые в системе реализации энергосберегающего оптимального управления нагревом, поступают на пульт автоматизированного рабочего места (АРМ) технолога-оператора. В условиях нестационарного режима необходимость интенсификации нагрева на конечном интервале заданного времени при реализации топливосберегающего оптимального управления нагревом объективно увеличивает опасность выдачи на стан недогретого металла и возникновения нежелательных последствий. Поэтому реально предпочтение получил затратный режим нагрева, при котором в печи находится неоправданно завышенные запас нагретого металла, подвергающегося окислению, а топливосберегающие режимы управления не имеют широкого распространения, и интенсивный нагрев заготовок, даже при наличии резерва времени на нагрев, начинается сразу при входе металла в зоны нагрева.

Даже неполная и частичная реализация топливосберегающего режима нагрева в существующих условиях на четвертой четырехзонной методической печи

стана 2500 ОАО «ММК» при управлении тепловым режимом в 1, 2, 3 зонах позволяет заметно уменьшить расходы смешанного газа по зонам, при гарантированном нагреве.

Результаты хронометража работы печи №4 стана 2500 ОАО «ММК» приведены в **таблице**.

При функционировании предложенной топливос-

берегающей микропроцессорной системы управления нагревом снижение среднего расхода газа ΔV_T реально составляет $\Delta V_T = 365 + 229 + 252 = 846 \text{ м}^3/\text{ч}$. Даже частичная реализация предлагаемого топливосберегающего режима позволяет уменьшить расход смешанного газа на $846 \text{ м}^3/\text{ч}$ на одну печь, что в сутки составляет 20300 м^3 (142 тыс. руб. в сутки, по ценам 2016 г.).

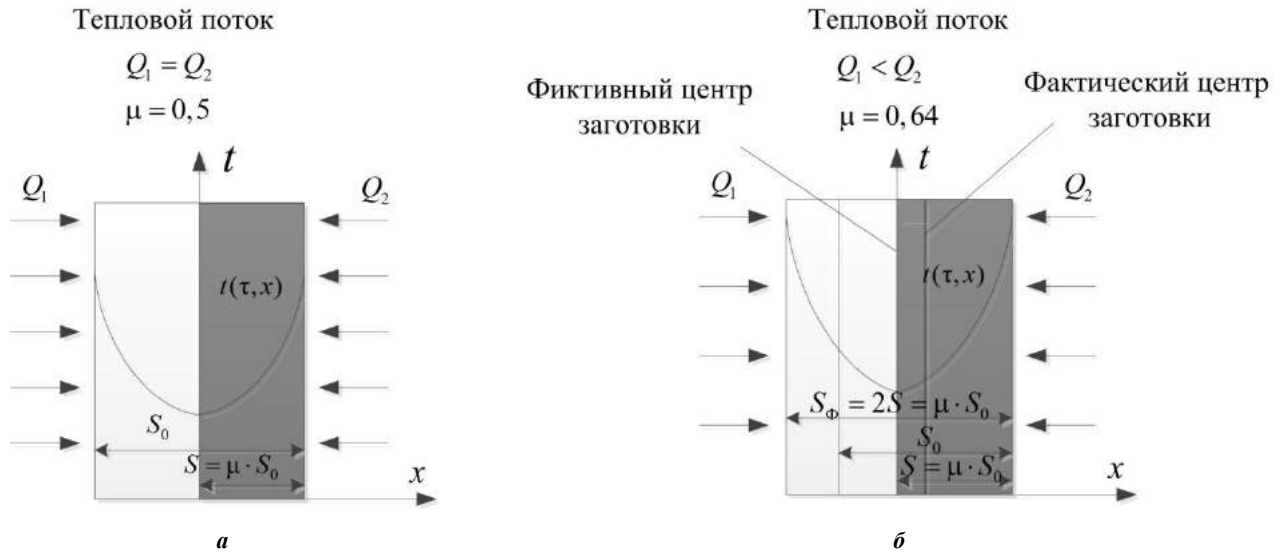


Рис. 1. Нагрев непрерывной слитковой заготовки по толщине: а – при симметричном; б – при несимметричном режиме нагрев

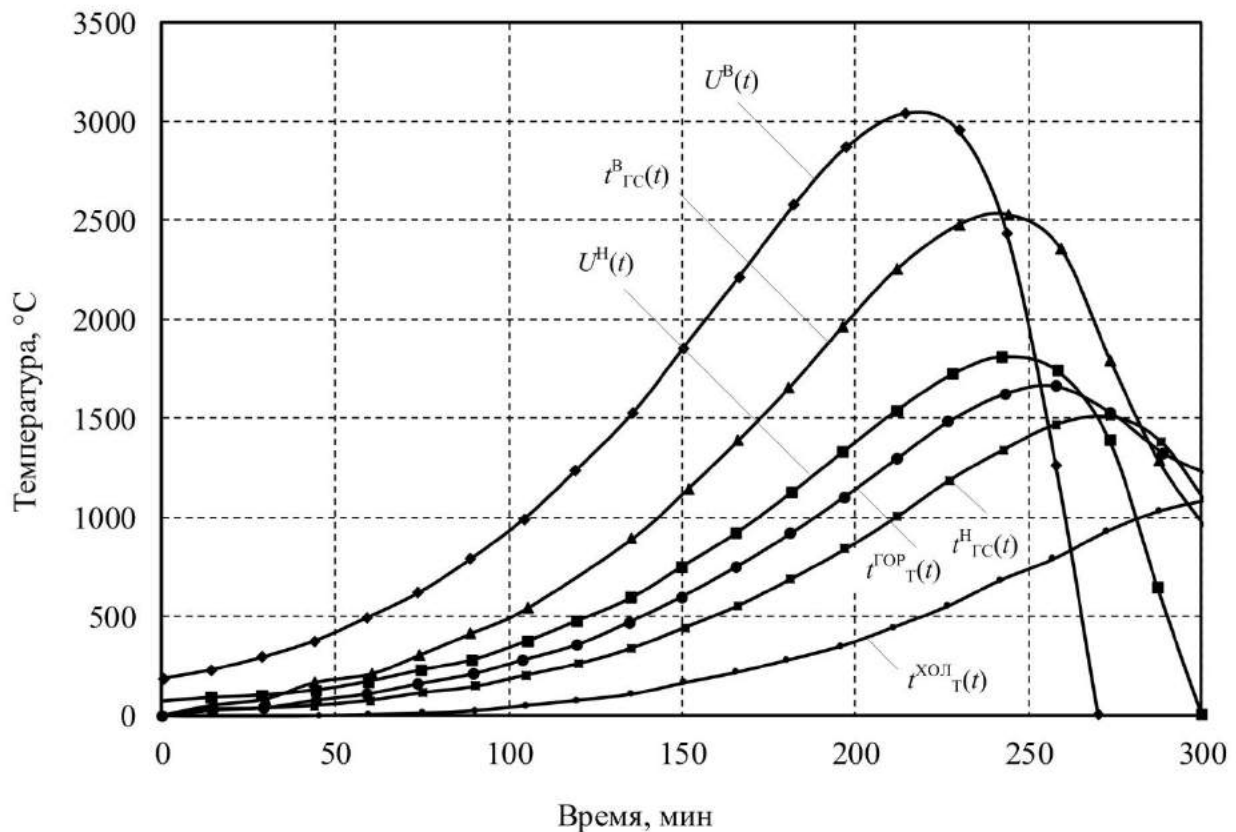


Рис. 2. Расчетная траектория изменения управляющих воздействий и температурных параметров, при $T=300$ мин (без ограничений)

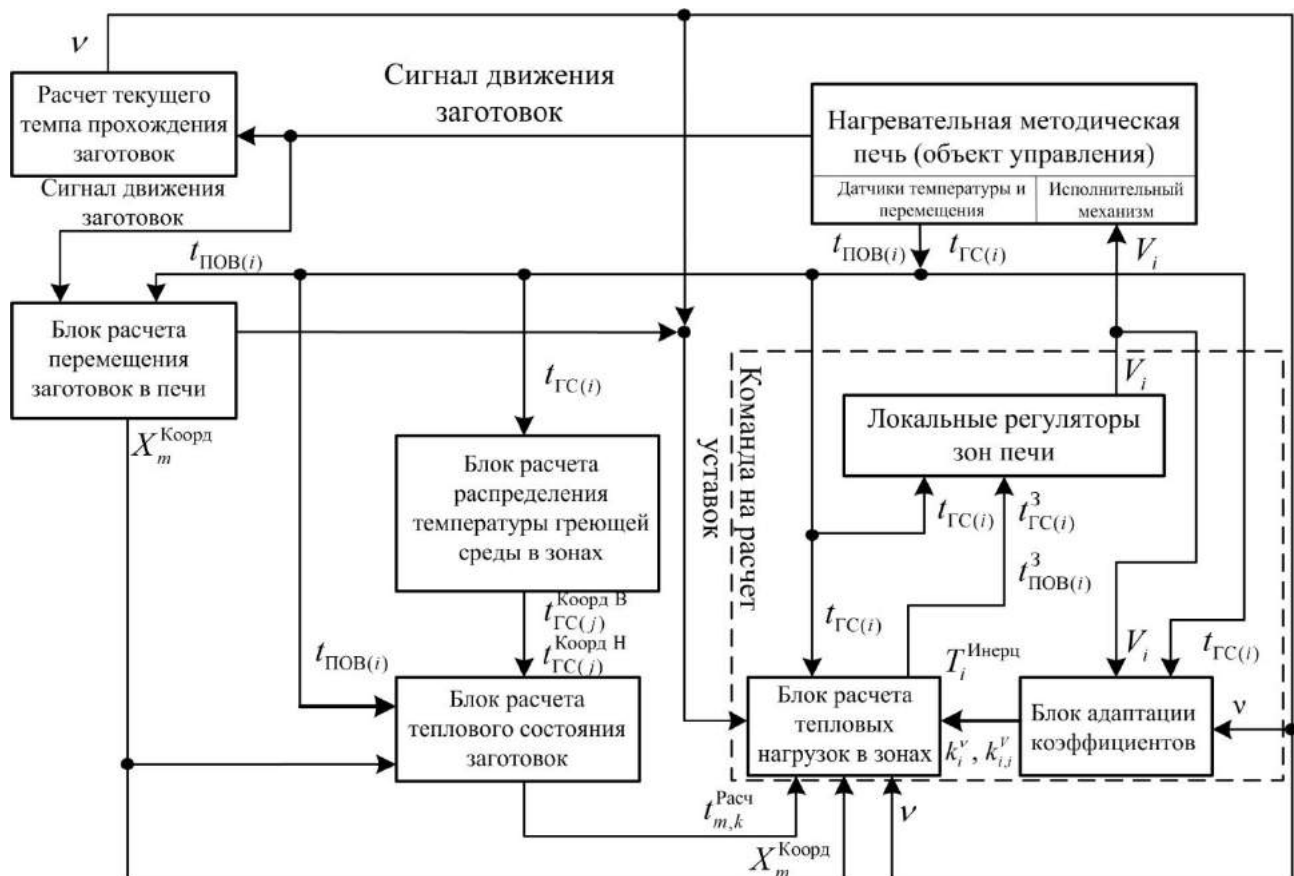


Рис. 3. Структурная схема системы автоматического управления несимметричным нагревом заготовок в методической печи

Результаты хронометража работы печи

Способы управления тепловым режимом	Средний расход смешанного газа, м³/ч		
	в 1 зону	в 2 зону	в 3 зону
Существующая система управления	2677	3688	1120
Предложенная система управления	2312	3459	868
Разница (результат)	-365	-229	-252

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагаемая топливосберегающая система управления тепловым режимом нагрева металла в методических печах рассчитана на программную реализацию и не требуют значительных капитальных затрат. Все предложенные теоретические технические решения могут быть использованы и на других промышленных печах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Генкин А.Л. Проблемы энергосберегающего управления листопрокатным комплексом. Ч.1 // Проблемы управления. 2006. № 6. С.50-54.
- Андреев С.М., Парсункин Б.Н. Оптимизация режимов управления нагревом в печах проходного типа: монография. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2013. 375 с.
- Генкин А.Л. Информативность энергосиловых параметров при управлении температурно-скоростным режимом горячекатаной полосы // Автоматизация в промышленности. 2009. № 8. С.45-48.
- Тайц Н.Ю. Технология нагрева стали. М.: Металлургиздат, 1962. 557 с.
- Арутюнов В.В., Бухмиров В.В. Математическое моделирование тепловой работы промышленных печей. М.: Металлургия, 1990. 239 с.
- Маковский В.А., Лаврентик Н.Н. Алгоритм управления нагревательными печами. М.: Металлургиздат, 1977. 184 с.
- Понтягин Л.С., Болтянский В.Г. Математическая теория оптимальных процессов. М.: Наука, 1983. 393 с.
- Парсункин Б.Н., Андреев С.М., Жадинский Д.Ю. Исследование энергосберегающего режима нагрева непрерывнолитых заготовок // Сталь. 2007. №4. С.53-56.
- Андреев С.М., Парсункин Б.Н., Нужин Д.В. Автоматизированная система управления топливосберегающим несимметричным нагревом металла перед прокаткой в современных методических печах // Автоматизация и современные технологии. 2010. №1. С. 14-20.
- Банди Б. Методы оптимизации. М.: Радио и связь, 1988. 122 с.

Поступила в редакцию 14 июня 2016 г.

INFORMATION IN ENGLISH

AUTOMATED CONTROL SYSTEM OF FUEL SAVING IN ASYMMETRIC HEATING OF CONTINUOUS CAST BILLETS BEFORE ROLLING

Sergey M. Andreev

Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Head of the Department, Automated Control Systems Department, Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: andreev.asc@gmail.com.

Timur U. Akhmetov

Post-graduate student, Limited Liability Company "ISC". E-mail: MsrTi@mail.ru.

Dmitriy V. Nuzhin

Post-graduate student, Automated Control Systems Department, Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Boris N. Parsunkin

D.Sc. (Eng.), Professor, Automated Control Systems Department, Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: pksu035@gmail.com.

The article describes the results of theoretical and practical implementation in real industrial conditions of automatic system of fuel-efficient control, which realize the asymmetric mode of heating of continuous cast slab blanks in a continuous furnace in unsteady operating conditions of broadband hot rolling mill. Considering the significant heat losses in lower zones of heating, the system of control realizes depending on real industry situation differentiated distribution of supply of fuel in the upper and lower zones of heating of furnace in proportions 0.8-1.0 depending on the temperature of moving blanks along the length of the furnace. The coefficient of asymmetric distribution of heating loads between upper and lower zones changes from 1.0 at maximum productivity of the furnace (symmetrical heating) up to 0.8 when the productivity of the furnace is 20% of the maximum. The control of fuel-efficient mode of heating in the upper zones is carried out by the surface temperature of the heated metal, which is measured by the optical pyrometer. In the lower zones the control is executed on the temperature of the working space and measured by thermocouples in carborundum protective glasses.

Keywords: Fuel saving, asymmetric distribution of fuel, temperature of surface, guaranteed heating, surface temperature of metal.

REFERENCES

1. Genkin A.L., Kudelin A.R. Problems of Energy-saving Control of Sheet Mill. Part 1. *Problemy upravleniya* [Control sciences], 2006, no.6, pp. 50-54. (In Russian).
2. Andreev S.M., Parsunkin B.N. *Optimizatsiya rezhimov upravleniya nagrevom v pechakh prokhodnogo tipa: monografiya* [Optimization of Control Modes of Heating Furnaces Transmission Type. Monograph]. Magnitogorsk, Nosov Magnitogorsk State Technical University Publ., 2013, 375 p.
3. Genkin A.L. Information Capacity of Power Parameters in Controlling the Temperature and Speed Mode of Hot Strip. *Avtomatizatsiya v promyshlennosti* [Automation in Industry], 2008, no.8, pp.45-48. (In Russian).
4. Tayts N.Yu. *Tekhnologiya nagreva stali* [Steel Heating Technology]. Moscow, Metallurgizdat Publ., 1962. 557 p.
5. Arutyunov V.V., Bukhmirov V.V., Krupennikov S.A. *Matematicheskoe modelirovanie teplovoy raboty promyshlennykh pechey* [Mathematical Modeling of Thermal Performance of Industrial Furnaces]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1990, 239 p.
6. Makovskiy V.A., Lavrentik N.N. *Algoritm upravleniya nagrevatelnyimi pechami* [Control Algorithm of Heating Furnaces]. Moscow, Metallurgizdat Publ., 1977, 184 p.
7. Pontryagin L.S., Boltyanskiy V.G., Gapekrelidze R.V. *Matematicheskaya teoriya optimalnykh protsessov* [Mathematical Theory of Optimal Processes]. Moscow, Nauka Publ., 1969, 393 p.
8. Parsunkin B.N., Andreev S.M., Investigation of Energy-efficient Heating Mode of Cast Billets. *Stal* [Steel], 2007, no.4, pp.53-56. (In Russian).
9. Andreev S.M., Parsunkin B.N., Nuzhin D.V. Automatic Control System of Fuel-efficient Asymmetrical Metal Heating before Rolling in Contemporary Methodological Furnaces. *Avtomatizatsiya i sovremennye tekhnologii* [Automation and modern technology], 2010, no.1, pp.14-20. (In Russian).
10. Bandy B. *Metody optimizatsii* [Optimization methods], 1988, 122 p.

КРАТКОЕ СООБЩЕНИЕ

УДК 669.162.275.1:621.789

DOI: 10.18503/2311-8318-2016-3(32)-66-68

Аркулис М.Б., Велюс Л.М., Савченко Ю.И.

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

К ВОПРОСУ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ЧУГУНА ИМПУЛЬСНЫМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

Целью исследования является теоретическое обоснование возможности управления образованием микронеоднородностей с помощью импульсного магнитного поля. Исследования приведены для вещества в жидком состоянии, в частности для чугуна в парамагнитном состоянии при температуре плавления. В сообщении приведен аналитический вывод закономерности для определения количества атомов ближнего порядка в зависимости от напряженности магнитного поля и частоты следования импульсов. Для получения закономерности использованы метод статистической физики, теории вероятности и математической статистики. В работе представлен прогноз результатов влияния импульсного магнитного поля на диамагнитные материалы. Приведены результаты вычислительного эксперимента по определению размеров кристаллитов в зависимости от напряженности магнитного поля. Полученные закономерности рекомендуются для управления технологическими процессами при производстве чугуна.

Ключевые слова: кристаллизация, микроструктура, импульсное магнитное поле, ближний порядок, зародыш.

ВВЕДЕНИЕ

Снижение неоднородности в структуре металлических материалов является одной из актуальных проблем металлургической отрасли. Наряду с ультразвуковой обработкой, электромагнитным перемешиванием [1], способом порошковой металлургии, расплавы подвергают воздействию управляемого импульсного магнитного поля. Вопросами формирования структуры металла на микро- и макроуровнях проводились широким кругом исследователей. Результаты исследований и методы обработки различных материалов импульсного магнитного поля представлены в ряде работ [2-6]. В работах [2, 3] установлено, что при определенных параметрах магнитно-импульсной обработки (энергия разряда, количество импульсов) улучшаются литейные свойства сплава, происходят благоприятные изменения в структуре и, как следствие, улучшаются механические свойства сплава в литом состоянии, которые впоследствии оказывают влияние на качество полуфабриката и готовой металлургической продукции [7, 8]. В работе [4] установлено необратимое изменение температур кристаллизации $T_{кр}$ и плавления $T_{пл}$ полимеров при их кратковременной обработке импульсным магнитным полем. Эксперименты с образцами прессованной древесины показали существенное увеличение их торцевой твердости после обработки [5]. В [6] исследовались оптимальные условия воздействия импульсного магнитного поля на стекло. Осуществление управления процессом кристаллизации чугуна позволяет снизить неоднородность в структуре металлических расплавов и требует выявления возможных управляющих воздействий.

МЕТОДИКА

В работе жидкие металлы и сплавы считаются микронеоднородными по структуре и составу, отличаются высокотермической устойчивостью, наследственной от твердого состояния структурой ближнего порядка [9].

Впервые на близость строения и свойств жидких и твердых металлов указал Я.И. Френкель [10]. Согласно рекомендациям [8, 9] расплав рассматривается как жидкость с микронеоднородными образованиями, чувствительными к внешнему управляющему воздействию.

Чугун в жидком парамагнитном состоянии является классической системой, к которой применима статистика Максвелла-Больцмана [11]. Обозначим N_0 число зародышей кристаллов в расплаве в отсутствие магнитного поля, а N – число зародышей при наличии импульсного магнитного поля с частотой следования приблизительно 1 Гц. Тогда

$$\frac{N}{N_0} = \exp \left\{ \frac{-\Delta W_m}{kT} \right\}, \quad (1)$$

где $-\Delta W_m$ – добавочная энергия магнитного дипольного момента p_m в магнитном поле с индукцией B ; $k=1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура системы.

Добавочная энергия одного атома определяется

$$-\Delta W_m = p_{mz} B, \quad (2)$$

где p_{mz} – проекция магнитного момента атома железа на направление вектора индукции B .

Величина $-\Delta W_m$ положительна, так как железо при температуре плавления является парамагнитным [12], и магнитный дипольный момент одного атома железа равен

$$p_{mz} = n \cdot \mu_B, \quad (3)$$

где $n=2,218$ – число магнетонов Бора на один атом железа [12]:

$$\mu_B = eh/(2m_e) = 9,3 \cdot 10^{-24} \text{ А} \cdot \text{м}^2.$$

Величина магнитного дипольного момента равна

$$\begin{aligned} p_{mz} &= 2,218 \cdot \mu_B = 2,218 \cdot 9,3 \cdot 10^{-24} = \\ &= 2,06 \cdot 10^{-23} \text{ А} \cdot \text{м}^2. \end{aligned}$$

За время кристаллизации $\tau_{кр}$ расплав воспринимает импульсы длительностью τ_1 .

Обозначим

$$Z = \tau_{кр} / \tau_1$$

число импульсов магнитного поля, воспринимаемое расплавом за время кристаллизации $\tau_{кр}$.

Тогда

$$-\Delta W_m = Z \cdot p_{mz} B = Z \cdot 2,06 \cdot 10^{-23} B. \quad (4)$$

Переходя к напряженности H , [А/м], в (4) получаем

$$\begin{aligned} -\Delta W_m &= Z \cdot p_{mz} \mu_0 \cdot H = \\ &= Z \cdot 2,06 \cdot 10^{-23} 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot H \approx Z \cdot 2,6 \cdot 10^{-29} H. \end{aligned} \quad (5)$$

Подстановка (5) в (1) дает

$$\begin{aligned} \frac{N}{N_0} &= \exp \left\{ \frac{Z \cdot 2,6 \cdot 10^{-29} H}{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 1,5 \cdot 10^3} \right\} \cong \\ &\cong \exp \{ Z \cdot 1,25 \cdot 10^{-9} H \}. \end{aligned} \quad (6)$$

Из (6) видно, что $(N/N_0) > 1$; $N > N_0$,

Поскольку $N \cdot d^3 = \text{const}$, то увеличение числа зародышей, с учетом (6), приводит к уменьшению размеров кристаллитов d в соотношении

$$\begin{aligned} \frac{d_0}{d} &= \sqrt[3]{\frac{N}{N_0}} = \exp \left\{ \frac{Z \cdot 1,25 \cdot 10^{-9} H}{3} \right\} = \\ &= e^{Z \cdot 0,417 \cdot 10^{-9} H}. \end{aligned}$$

Если учесть, что жидкий расплав есть система областей ближнего порядка [6], содержащих v атомов, то

$$d_0/d = e^{v \cdot Z \cdot 0,417 \cdot 10^{-9} H}. \quad (7)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ

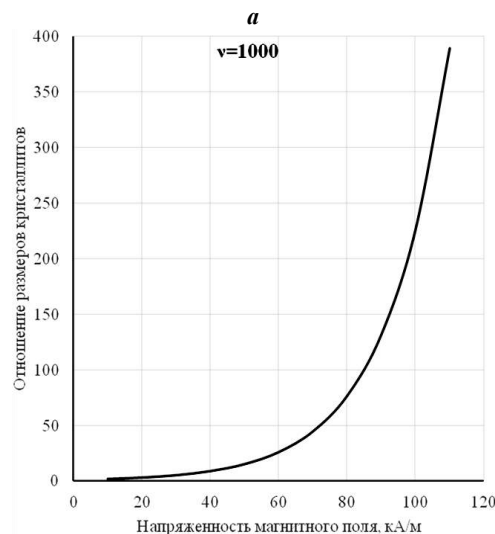
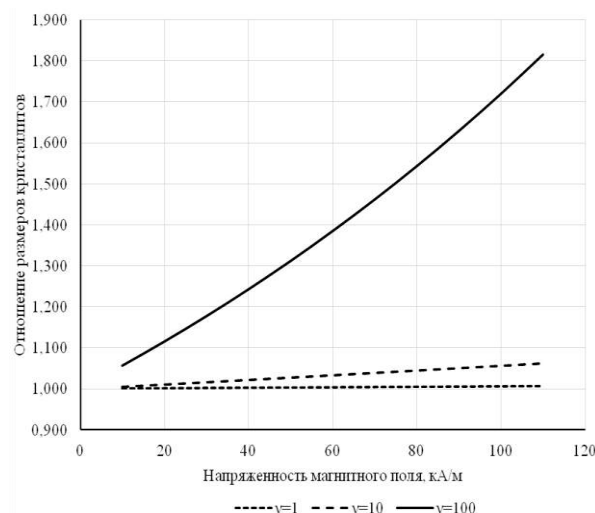
Приведем графики зависимостей расчетов по (7) для $Z=130$ и различных v , которые могут выступать в качестве управляющего воздействия (см. **рисунок**).

Анализ полученных зависимостей показывает, что импульсное магнитное поле при определенных условиях оказывает существенное влияние на уменьшение размеров кристаллитов, что позволяет выполнить эффективное управление. Также следует отметить, что экспериментальное определение величины d_0/d позволяет определить количество атомов в области ближнего порядка. В нашем случае

$$v = \frac{1}{Z \cdot H \cdot 0,417 \cdot 10^{-9}} \ln \frac{d_0}{d}. \quad (8)$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. При рассмотрении расплава как жидкости с микронезоднородными образованиями с точки зрения статистических закономерностей, используя полученные зависимости (7) и (8), возможно подобрать режим импульсной магнитной обработки металла для получения заданной неоднородности чугуна.



Относительное уменьшение размеров кристаллитов с ростом величины напряженности магнитного поля:
а – при малых значениях v ; б – при больших значениях v

2. Выдвинута научно обоснованная гипотеза о том, что если подвергнуть диамагнитное вещество обработке импульсным магнитным полем, то будет наблюдаться обратный эффект. В случае диамагнетика добавочная энергия магнитного дипольного момента p_m имеет положительное значение и, как следствие, отношение N/N_0 примет значение больше единицы, т.е. скорость роста кристалла будет опережать скорость образования зародышей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Непрерывная разливка стали. Расчеты медных кристаллизаторов / И.М. Ячиков, К.Н. Вдовин, В.В.Точилкин и др. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова. 2014. 192 с.
2. Черников Д.Г. Разработка физического способа модифицирования литейных алюминиевых сплавов магнитно-импульсной обработкой // Известия ОрелГТУ. Серия: Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2009. № 2-3/274(560). С.87-92.
3. О магнитно-импульсной обработке расплава силумина АК9Т/ В.А. Глушечков, Ф.В. Гречников, А.Ю. Иголкин и др. //Литейное производство. 2011. №9. С.8-11.
4. Левин М.Н., Постников В.В., Матвеев Н.Н. Влияние импульсной магнитной обработки на кристаллизацию гибкоцепных полимеров // Высокомолекулярные соедине-

- ния. А. 2003. Т.45. №2. С.217-223.
5. Воздействие слабых импульсных магнитных полей на модифицированную древесину / В.В. Постников, М.Н. Левин, Н.Н. Матвеев и др. // Письма в журнал технической физики. 2005. Т.31. Вып.9. С.14-19.
 6. Алексеев В.И. Возможности влияния импульсного магнитного поля на структурные состояния в оксидном стекле // Журнал технической физики. 1998. Т.68. №10. С.50-54.
 7. Стратегия постановки задачи многокритериальной оптимизации состава шихтовых материалов для электродуговой сталеплавильной печи / О.С. Логунова, Е.Г. Филиппов, И.В. Павлов, В.В. Павлов // Изв. вузов. Черная металлургия. 2013. №1. С.66-70.

8. Логунова О.С., Парсункин Б.Н., Суспицын В.Г. Автоматизированная оценка качества непрерывнолитой заготовки // Сталь. 2004. №12. С.101-104.
9. Ершов Г.С., Поздняк А.П. Микрогетерогенность металлов и сплавов // Металлургия. 1985. 214 с.
10. Френкель Я.И. Кинетическая теория жидкости. Л.: Наука, 1975. 592 с.
11. Матвеев А.Н. Молекулярная физика: учебник. М.: Высш. шк., 1987. 360 с.
12. Иродов И.Е. Электродинамика. Основные законы. М.: Лаборатория базовых знаний, 2001. 352 с.
13. Бозорт Р. Ферромагнетизм. М.: Изд-во Иностранная литература, 1956. 784 с.

Поступила в редакцию после доработки 11 мая 2016 г.

INFORMATION IN ENGLISH

THE ISSUE OF CONTROL OF THE PROCESS OF IRON CRYSTALLIZATION BY PULSED MAGNETIC FIELD

Mikhail B. Arkulis

Ph.D. (Pedagogics), Assistant Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
E-mail: arkulis78@mail.ru.

Lev M. Velyus

Ph.D. (Eng.), Magnitogorsk, Russia.

Yuriy I. Savchenko

Ph.D. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: sav@magtu.ru.

The aim of this study is to provide the theoretical basis of the control capabilities of microinhomogeneity formation using a pulse magnetic field. The results are given for the substance in the liquid state, in particular for iron in the paramagnetic state at the melting temperature. The study presents an analytical derivation of law for determining the number of short-range order atoms depending on magnetic field strength and pulse repetition rate. To obtain the law, the methods of statistical physics, probability theory and mathematical statistics were used. The paper presents the results of the forecast of the effect of pulsed magnetic fields on diamagnetic materials. The results of computational experiments aimed at determining the crystallite size depending on the intensity of the magnetic field are shown. These laws are recommended for control of technological processes in production of iron.

Keywords: Crystallization, microstructure, magnetic field strength, pulse repetition frequency, short-range order, nucleation center.

REFERENCES

1. Yachikov I.M., Vdovin K.N., Tochilkin V.V. et.al. *Nepreryvnaya razlivka stali. Raschetyi mednykh kristallizatorov* [Continuous Casting of Steel. Design of Copper Moulds]. Magnitogorsk, Publishing center of Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2014, 192 p.
2. Chernikov D.G. Development of Physical Method of cast Aluminum Alloys Modification by Magnetic-impulse Processing. *Izvestiya OrelGTU. Seriya: Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii* [Izvestiya OrelGTU. Series: Fundamental and applied problems of engineering and technology], 2009, no.2-3/274(560), pp.87-92. (In Russian).
3. Gluschenkov V.A., Grechnikov F.V., Igolkin A.Yu. et.al. Magnetic-impulse Processing of AK9T Silumin Melt. *Liteynoe proizvodstvo* [Foundry industry], 2011, no.9, pp.8-11. (In Russian).
4. Levin M.N., Postnikov V.V., Matveev N.N. Influence of Magnetic-impulse Processing on Crystallization of Flexible Polymers. *Vysokomolekulyarnye soedineniya* [High-molecular compounds], 2003, vol.45, no.2, pp.217-223. (In Russian).
5. Postnikov V.V., Levin M.N., Matveev N.N. et.al. Influence of Weak Impulse Magnetic Fields of Modified Wood. *Pisma v zhurnal tekhnicheskoy fiziki* [Articles from the journal of physics for engineering], 2005, vol.31. is.9, pp.14-19. (In Russian).
6. Alekseenko V.I. Influence of Impulse Magnetic Field on Structural State in Oxide Glass. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki* [Journal of physics for engineering], 1998, vol.68, no.10, pp.50-54. (In Russian).
7. Logunova O.S., Filippov E.G., Pavlov I.V., Pavlov V.V. Strategy of Task Setting of Multicriteria Optimization Charge Composition for Electric Arc Steel-making Furnace. *Izv. vuzov. Chernaya metallurgiya* [Proceedings of universities. Ferrous metallurgy], 2013, no.1, pp.66-70. (In Russian).
8. Logunova O.S., Parsunkin B.N., Suspitsyn V.G. Automatic Assessment of Quality of Continuous Cast Billet. *Stal'* [Steel], 2004, no.12, pp.101-104. (In Russian).
9. Ershov G.S., Pozdnyak A.P. Microinhomogeneity of Metals and Alloys. *Metallurgiya* [Metallurgy], 1985, 214 p.
10. Frenkel Ya.I. *Kineticheskaya teoriya zhidkosti* [Kinetic Theory of Liquid]. Leningrad, Publishing center «Nauka», 1975. 592 p.
11. Matveev, A.N. *Molekulyarnaya fizika* [Molecular Physics. Textbook for technical universities]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1987. 360 p.
12. Irodov I.E. *Elektromagnetizm. Osnovnyye zakonyi* [Electromagnetism. Basic Laws]. Moscow, Laboratoriya bazovykh znaniy Publ., 2001. 352 p.
13. Bozort R. *Ferromagnetizm* [Ferromagnetism]. Moscow, Inostrannaya literature Publ., 1956. 784 p.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Агапитов Артем Евгеньевич – ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия.

Агапитов Евгений Борисович – д-р техн. наук, проф., зав. каф. теплотехнических и энергетических систем, институт энегетики и автоматизированных систем, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: jek_agapitov@mail.ru.

Алексеева Инна Юрьевна – канд. техн. наук, ассистент, каф. «Электроснабжение промышленных предприятий», филиал ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» в г. Сызрани, г. Сызрань, Самарская область, Россия. E-mail: alekseewa.inna2012@yandex.ru.

Андреев Сергей Михайлович – канд. техн. наук, доц., зав. каф. АСУ, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: andreev.asc@gmail.com.

Аркулис Михаил Борисович – канд. пед. наук, доц., каф. физики, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: arkulis78@mail.ru.

Арсентьев Григорий Олегович – аспирант, каф. электроснабжения и электротехники, ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет» сообщения», г. Иркутск, Россия.

Ахметов Тимур Уралович – аспирант, ООО «Объединенная сервисная компания», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: MsrTi@mail.ru.

Бочкарев Игорь Викторович – д-р техн. наук, проф., зав. каф. «Электромеханики», Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова, г. Бишкек, Кыргызская Республика. E-mail: elmech@mail.ru.

Велюс Лев Матвеевич – канд. техн. наук, г. Магнитогорск, Россия.

Газизова Ольга Викторовна – канд. техн. наук, доц., каф. электроснабжения промышленных предприятий, институт энегетики и автоматизированных систем, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия.

Грунтович Надежда Владимировна – д-р техн. наук, проф., Центр научно-прикладных проблем энергетике, ФГБОУ ВО «Брянский государственный аграрный университет», Брянская область, с. Кокино, Россия.

Даутов Ринат Наилевич – ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат», г. Магнитогорск, Россия.

Закарюкин Василий Пантелеймонович – д-р техн. наук, проф., каф. электроэнергетики транспорта, ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения», г. Иркутск, Россия. E-mail: zakar49@mail.ru.

Каблукова Маргарита Сергеевна – ассистент, каф. теплотехнических и энергетических систем, институт энегетики и автоматизированных систем, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия.

Калинина Екатерина Андреевна – ассистент, каф. «Электроснабжение», ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет», г. Киров, Россия. E-mail: kalininakaterina@bk.ru.

Капанский Алексей Александрович – ассистент, каф. «Электроснабжение», УО «Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого», г. Гомель, Республика Беларусь. E-mail: kapanski@mail.ru.

Кондрашова Юлия Николаевна – канд. техн. наук, доц., каф. электроснабжения промышленных предприятий, институт энегетики и автоматизированных систем, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия.

Крюков Андрей Васильевич – д-р техн. наук, член-корр. АН ВШ РФ и Российской инженерной академии, академик Российской академии транспорта, заслуженный энергетик Республики Бурятия, проф. каф. электроснабжения и электротехники, ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», проф. каф. электроэнергетики транспорта, ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения», г. Иркутск, Россия. E-mail: and_kryukov@mail.ru.

Малафеев Алексей Вячеславович – канд. техн. наук, доц., каф. электроснабжения промышленных предприятий, институт энегетики и автоматизированных систем, 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, институт энегетики и автоматизированных систем, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия.

Нужин Дмитрий Викторович – соискатель, каф. АСУ, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия.

Падалко Дмитрий Андреевич – аспирант, ассистент, каф. электротехнических комплексов и материалов, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Томск, Россия. E-mail: padalko.da@gmail.com.

Парсункин Борис Николаевич – д-р техн. наук, проф., ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: pksu035@gmail.com.

Савченко Юрий Иванович – канд. физ. мат. наук, зав. каф. физики, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: sav@magtu.ru.

Стеклов Алексей Сергеевич – аспирант, каф. «Электрооборудование, электропривод и автоматика», ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», г. Нижний Новгород, Россия. E-mail: steklov84@mail.ru.

Федоров Олег Васильевич – д-р техн. наук, проф., ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», г. Нижний Новгород, Россия. E-mail: fov52@mail.ru.

Черепанов Вячеслав Васильевич – д-р техн. наук, проф., каф. «Электроснабжение», ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет», г. Киров, Россия. E-mail: stud2398@yandex.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 <http://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