

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

ИЗДАЕТСЯ С ЯНВАРЯ 1996 Г.

№3(24), ОКТЯБРЬ 2014

Журнал входит в базу данных Российского индекса научного цитирования (РИНЦ).

Редакционный совет

Председатель редсовета:

С.И. Лукьянов – проф., д-р техн. наук, директор института энергетики и автоматизированных систем 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.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.

Редакционная коллегия

Главный редактор:

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

Заместитель главного редактора:

И.М. Ячиков – 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:

Е.Г. Нешипоренко – доц., канд. 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 ВПО «МГТУ», 2014

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор).

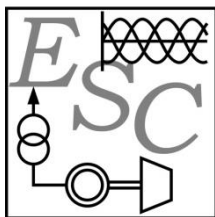
Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-58181 от 29 мая 2014 г.

Адрес редакции:

455000, Россия, Челябинская обл., г. Магнитогорск,
пр. Ленина, д. 38. ФГБОУ ВПО «МГТУ»
Изд-во Магнитогорск. гос. тех. ун-та им. Г.И. Носова
e-mail: ecis.red@gmail.com

Журнал подготовлен к печати

Издательским центром МГТУ им. Г.И. Носова.
Отпечатан на полиграфическом участке МГТУ.
Подписано к печати
Заказ . Тираж 500 экз.



ELECTROTECHNICAL SYSTEMS AND COMPLEXES

PUBLISHED SINCE JAN., 1996

№3(24) OCT., 2014

Journal is included in the database of Russian Scientific Citation Index (RSCI).

Editorial committee

Head of editorial committee:

Sergey I. Lukianov – Professor, D.Sc. (Eng.),
director of Power Engineering and Automated
Systems Institute of NMSTU, Magnitogorsk,
Russia.

Vice Chairman of editorial committee:

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

Members of Editorial committee:

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

Valeryi D. Dmitrienko – Professor,
D.Sc. (Eng.), NTU «KhPI», Kharkov, Ukraine;

R.A. Sidikov – Prof., D.Sc. (Eng.), Tashkent
State Technical University, Tashkent, Uzbeki-
stan;

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

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

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

Anatoly E. Kozyaruk – Professor,
D.Sc. (Eng.), NMRU (University of Mines),
Saint-Petersburg, Russia;

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

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

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

Editorial board

Editor-in-chief:

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

Deputy chief editor:

I.M. Yachikov – 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, Magni-
togorsk, Russia.

Executive editor:

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

Typographers:

E.A. Panova – Ph.D.(Eng.), NMSTU, Magni-
togorsk, Russia;

D.A. Savinov – NMSTU, Magnitogorsk, Rus-
sia.

© FSBEI HPE NMSTU, 2014

The journal is registered by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology,
and Mass Media (Roskomnadzor).

Registration certificate PI No. FS77-58181 on May 29, 2014 .

The publisher:

455000, 38, Lenin ave., Magnitogorsk, Chelyabinsk region,
Russia

The Publishing House of Nosov Magnitogorsk State Tech-
nical University

e-mail: ecis.red@gmail.com

Prepared for publication by publishing center of NMSTU.

Printed in the Printing MSTU Area

Signed for press.

Order. Circulation – 500 items.

СОДЕРЖАНИЕ

Теория и практика автоматизированного электропривода	4
<i>Браславский И.Я., Костылев А.В., Есаулкова Д.В.</i> Применение нейронного кластерного анализа для формирования закона частотного управления в асинхронном электроприводе	4
<i>Шрейнер Р.Т., Поляков В.Н., Медведев А.В.</i> Электромеханический ресурс частотно-регулируемого синхронного электропривода в перемежающихся режимах работы	9
<i>Каримсаков Т.К.</i> Варианты модернизации электроприводов шахтных вагонопрокидывателей	14
<i>Сафин И.Р., Лукьянов С.И., Бодров Е.Э.</i> Система управления электроприводом размоточного аппарата стана по производству стальной арматуры	17
<i>Андрюшин И.Ю., Шубин А.Г., Гостев А.Н.</i> Разработка математической модели взаимосвязанных электромеханических систем черновой группы прокатного стана	24
<i>Басков С.Н., Лицин К.В.</i> Исследование бездатчикового определения углового положения ротора синхронного двигателя с помощью наложения высокой частоты	32
<i>Омельченко Е.Я., Фомин Н.В., Тележкин О.А., Танич В.О., Лымарь А.Б.</i> Устройство контроля переменных трехфазной сети на базе микропроцессорного комплекта Arduino	34
Электроэнергетика	39
<i>Кирпичникова И.М., Соломахо К.Л.</i> Исследование методов прогнозирования электропотребления сбытового предприятия	39
<i>Малафеев А.В., Крубцова А.А.</i> Планирование режимов системы электроснабжения металлургического предприятия на основе теории нечетких множеств	43
<i>Кочкина А.В., Малафеев А.В., Варганов Д.Е., Курилова Н.А., Дубина И.А.</i> Методика оптимизации эксплуатационных режимов промышленных систем электроснабжения	49
<i>Газизова О.В., Мусин Д.А., Малафеев А.В., Жданов А.И.</i> Создание алгоритма поиска предельных режимов выхода электростанции на раздельную с энергосистемой работу	53
<i>Малафеев А.В., Трemasов М.А.</i> Разработка уточненной методики расчета моментно-скоростной характеристики питательного насоса тепловой электростанции в задаче анализа устойчивости собственных нужд	58
Энерго- и ресурсосбережение	64
<i>Ишметьев Е.Н., Панов А.Н., Васильев Е.Ю., Арасланов М.С.</i> Опыт применения 3-D сканирования для расширения границ контроля системы слежения за материалом на производственных складах	64
Электротехнологии в промышленности	66
<i>Ячиков И.М.</i> Положение равновесия тела во взвешенном состоянии в высокочастотном индукторе с обратным витком	66

CONTENT

Theory and practise of automated electric drive	4
<i>Braslavsky I.Ya., Kostylev A.V., Esaulkova D.V.</i> Application of neural cluster analysis for synthesis of optimal frequency control law for induction drive	4
<i>Shreiner R.T., Polyakov V.N., Medvedev A.V.</i> Electromechanical resource of variable-frequency synchronous drive in intermittent modes of operation	9
<i>Karimsakov T.K.</i> Upgraded versions of electric drives for mining dumpers	14
<i>Safin I.R., Lukyanov S.I., Bodrov E.E.</i> Control system of layout machine electric drive of mill man-ufacturing steel reinforcement	17
<i>Andryushin I.Yu., Shubin A.G., Gostev A.N.</i> Development of mathematical model for interrelated electrical and mechanical systems of rolling mill roughing train	24
<i>Baskov S.N., Litsin K.V.</i> Sensorless control of rotor angular position in synchronous motor by overlaying highfrequency signal	32
<i>Omelchenko E.Ya., Fomin N.V., Telezhkin O.A., Tanich V.O., Lymar A.B.</i> Control device of parameters of three-phase mains based on Arduino microprocessor chip set	34
Power engineering	39
<i>Kirpichnikova I.M., Solomakho K.L.</i> Research of forecasting methods of electricity consumption in power enterprises	39
<i>Malafeev A.V., Krubtsova A.A.</i> Power supply system operation planning of metallurgical enterprise based on fuzzy sets theory	43
<i>Kochkina A.V., Malafeev A.V., Varganov D.E., Kurilova N.A., Dubina I.A.</i> Optimization methodology of industrial electrical power systems operating condition	49
<i>Gazizova O.V., Musin D.A., Malafeev A.V., Zhdanov A.I.</i> Development of search algorithm for limit load separate operation of power station and power supply system	53
<i>Malafeev A.V., Tremasov M.A.</i> Development of updated methodology for calculating torque-speed characteristics of thermal power plant feed pump in the problem of auxiliary power stability analysis	58
Energy- and resources-economy	64
<i>Ishmetyev E.N., Panov A.N., Vasilyev E.Yu., Araslanov M.S.</i> 3D scanning application for extending control limits of material tracking system for industrial warehouses	64
Industrial electrotechnics	66
<i>Yachikov I.M.</i> Position balans of body suspended in high-frequency inductor with reverse coil	66

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

УДК 621.313.3

Браславский И.Я., Костылев А.В., Есаулкова Д.В.

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОННОГО КЛАСТЕРНОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ЗАКОНА ЧАСТОТНОГО УПРАВЛЕНИЯ В АСИНХРОННОМ ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ

Обсуждаются вопросы упрощенного синтеза энергоэффективных скалярных систем частотного регулирования асинхронными электроприводами. В качестве способа обеспечения энергоэффективности рассматривается метод формирования специальных законов частотного регулирования, рассчитываемых для заданного диапазона нагрузок. Процедура расчета закона частотного управления асинхронным электроприводом выполняется на основе итерационной оптимизации, при этом количество итераций может достигать тысячи. Представляется целесообразным найти упрощенную процедуру формирования закона, пригодную для инженерных расчетов. Вводится в рассмотрение гипотеза «похожести» законов управления для двигателей с относительно близкими параметрами схемы замещения. Это предполагает, что закон управления (квазиоптимальный закон), полученный для одного двигателя, может быть с определенной степенью погрешности применен и для других, близких по параметрам электрических машин. Выявление двигателей с близкими параметрами предлагается осуществить с помощью кластеризации, выполненной на основе самоорганизующихся искусственных нейронных сетей (карты Кохонена). Число кластеров выбрано исходя из желаемого разброса параметров двигателя, определяемого на основе отклонения значений критерия оптимизации от экстремального. В итоге получена гексагональная карта Кохонена из 64 кластеров, при этом каждому кластеру соответствует свой набор квазиоптимальных законов. Таким образом, достаточно соотнести двигатель с каким-либо кластером (иначе классифицировать), что автоматически сопоставит ему квазиоптимальный закон управления.

В работе приводится процедура формирования и обучения сети, а также примеры реализации оптимизированных законов управления.

Ключевые слова: оптимизация, скалярное управление, асинхронный двигатель, нейронная кластеризация.

ВВЕДЕНИЕ

Целью любой задачи оптимизации режимов частотно-регулируемого асинхронного электропривода является достижение заданного экстремума функции качества. Как правило, оптимальный закон формируется для конкретного асинхронного двигателя и определенных параметров нагрузки. В таких случаях для вычисления оптимального закона управления для всех двигателей определенной серии требуются большие затраты времени и вычислительных ресурсов. Уточненный расчет закона частотного управления, обеспечивающего оптимальное электромеханическое преобразование энергии, как правило, сопряжен со сложными, в том числе поисковыми расчетами, результаты которых применимы для конкретного частного варианта настройки. Так, например, изменение нагрузки на валу двигателя требует повторной процедуры оптимизации [1,2].

В связи с этим, безусловно, актуальной становится методика, которая позволила бы сократить время на нахождение экстремума критерия качества для каждого двигателя.

Наименее затратным вариантом для подобных задач является выбор оптимального или близкого к оптимальному в некотором смысле закона для группы двигателей с похожими параметрами и условий нагрузки [3].

Использование кластерного анализа для формирования групп двигателей в рамках серии по желаемым критериям соответствия помогает решить обозначенную проблему. Кластерный анализ можно провести, применив как классические методы классификации, так и интеллектуальные. Классические

методы включают в себя вероятностный, иерархический подход, теорию графов. Современные интеллектуальные методы базируются на нечетких и генетических алгоритмах либо используют нейронные сети. Алгоритмы искусственных нейронных сетей являются удобным средством решения классификационных задач. Вопрос о параметрах сети зависит от решаемой проблемы, поэтому рекомендации вырабатываются под конкретную задачу.

РАСЧЕТ ОПТИМИЗИРОВАННЫХ ЗАКОНОВ ЧАСТОТНОГО УПРАВЛЕНИЯ

Постановка задачи оптимизации регулируемых по скорости электроприводов, в зависимости от преобладания режимов работы, подразделяется на две группы. К первой группе относят электроприводы, которые большую часть времени работают в статических режимах. Во вторую группу относят приводы, работающие в динамических режимах, связанных с обработкой быстроменяющихся управляющих или возмущающих воздействий.

В качестве критериев оптимизации установившихся режимов могут быть использованы критерий минимума мощности потерь или тока статора. Режим управления по минимуму тока статора имеет ряд достоинств: полные потери близки к минимальным потерям двигателя, а закон управления проще в реализации.

Для второй группы приводов также можно рассмотреть подобные критерии оптимизации:

Первый вариант предполагает минимизацию потерь во время переходного процесса.

$$J = \int_0^{T_{п.п}} \Delta P_{\Sigma} dt, \quad (1)$$

где J – минимизируемая величина; ΔP_{Σ} – общие потери асинхронного двигателя; $T_{п.п}$ – время переходного процесса.

Также может быть рассмотрен критерий минимизации перегрева двигателя. В случае однократного пуска данный критерий может быть упрощен до критерия минимума электрических потерь статора [4]:

$$J = \int_0^{T_{п.п}} \Delta P_s dt = \int_0^{T_{п.п}} i_s^2 r_s dt, \quad (2)$$

или, учитывая, что $r_s = \text{const}$ во время пуска:

$$J = \int_0^{T_{п.п}} i_s^2 dt, \quad (3)$$

Таким образом, наибольшей общностью и наибольшей простотой расчета обладает критерий минимума тока статора.

Ввиду того, что ток статора $i_s = f(u_s, \beta)$ (β – скольжение асинхронного двигателя), решение задачи оптимизации будет удовлетворительным только для конкретного момента двигателя [6].

Во многих случаях момент нагрузки является постоянным во время процесса пуска. При этом можно использовать упрощенный оптимальный закон управления. Этот закон определяется двумя параметрами: начальным напряжением u_0 и частотой при номинальном напряжении f_1 . Следует отметить, что применимо использование статических уравнений двигателя для вычисления оптимального закона управления без итерационных процедур поиска для процессов с большим временем пуска. Законы управления, рассчитанные по критерию минимума тока статора для различных моментов нагрузки двигателя с $P_N = 55$ кВт, показаны на **рис. 1**.

При фиксации закона управления и изменении момента нагрузки можно отследить изменение значения выбранного критерия $J = \min(I_s^2)$. Для каждого закона есть область ΔM , в которой значение критерия хотя и не достигает экстремального значения, но достаточно близко к нему. Такие же зависимости могут быть построены и для вариации параметров схемы замещения двигателя [5].

Таким образом, закон управления может обеспечивать высокую энергоэффективность даже при некоторой вариации параметров объекта.

Более того, можно предположить, что электроприводы с близкими параметрами могут быть настроены на один закон управления – квазиоптимальный закон.

Результаты оптимизации с помощью критериев (1) и (3) показаны на **рис. 2**. В качестве базовых величин взяты значения потерь энергии (Δw) и температуры перегрева ($\Delta\theta$) для обычного закона управ-

ления $u = kf$. Момент двигателя равен $1,25m_N$.

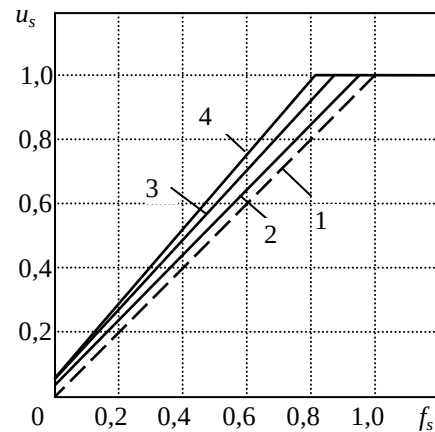


Рис. 1. Законы оптимального частотного управления для различных постоянных моментов нагрузки:
1 – закон $u/f = \text{const}$; 2, 3, 4 – оптимальные законы при $M = 1,25M_N$; $M = 1,5M_N$; $M = 1,8M_N$ соответственно

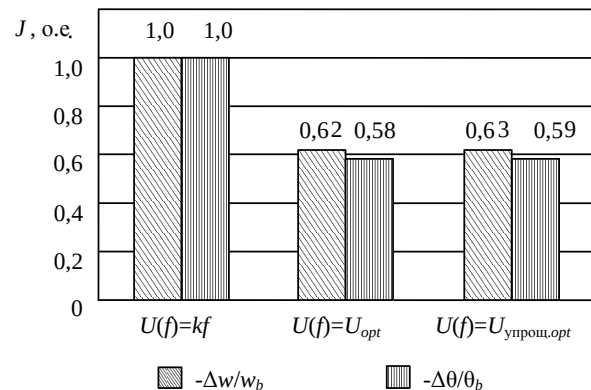


Рис. 2. Критерий оптимизации для разных законов управления: Δw – потери энергии; $\Delta\theta$ – температура перегрева

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОННОГО КЛАСТЕРНОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ОПТИМИЗИРОВАННОГО ЗАКОНА ЧАСТОТНОГО УПРАВЛЕНИЯ

Как было отмечено выше, чтобы исключить расчеты оптимальных законов для каждого случая в отдельности, целесообразно применение кластеризации двигателей. В качестве примера рассмотрим группу двигателей хорошо известной серии 4 А с диапазоном мощностей от 0,25 до 315 кВт. Общее число двигателей – 168.

Для реализации кластерного анализа часто используют искусственную нейронную сеть (ИНС), в частности самоорганизующуюся ИНС с единственным слоем. Также ее называют картой Кохонена. Ее задача заключается в том, чтобы правильно сгруппировать поступающие на нее входные массивы данных. Карта Кохонена поддерживает топологическое свойство, когда близким кластерам входных векторов соответствуют близко расположенные нейроны. Заметим, что расстояния между нейронами можно определять разными способами, используя прямоугольные, линейные и другие сетки, но это никак не влияет на характеристики сети, связанные с классификацией входных векторов.

Первым этапом решения задачи кластеризации является нормализация входных данных. При выравнивании значений компонентов входного вектора положительные результаты нормализации получаются, в частности, при использовании масштабирования, рассчитанного по следующей формуле:

$$\tilde{x} = \frac{x_n - x_{n\min}}{x_{n\max} - x_{n\min}}, \quad (4)$$

где x_n – компонента входного вектора X , а $x_{n\min}$ и $x_{n\max}$ – минимальное и максимальное значение x_n соответственно.

Таким образом, мы получаем нормированный вектор $X = [\tilde{R}_s \ \tilde{R}_r \ \tilde{X}_s \ \tilde{X}_r \ \tilde{X}_m]$, который содержит пять параметров схемы замещения асинхронного двигателя.

Для оценки влияния каждого параметра на корректность кластеризации используется метод главных компонент. В данном способе вычисляется доля дисперсии в процентах, которая используется для оценки доли информации от каждой компоненты [7]. На **рис. 3** представлен график результатов анализа значимости параметров. Из графика видно, что наибольшее влияние на кластеризацию будут иметь первые два параметра: активное сопротивление статора и, уже намного в меньшей степени, активное сопротивление ротора. Таким образом, целесообразно исключить $\tilde{X}_s \ \tilde{X}_r \ \tilde{X}_m$, так как данные параметры будут вносить только шумовой эффект и усложнять процесс классификации.

Вторым этапом является создание сети и ее обучение. При случайной инициализации весов сети часть нейронов может оказаться в области пространства, в котором отсутствуют данные или их количество ничтожно мало.

Такие нейроны имеют мало шансов на активацию и адаптацию своих весов, поэтому они остаются «мертвыми». Таким образом, входные данные могут интерпретироваться меньшим количеством нейронов («мертвые» нейроны не принимают участие в анализе), а погрешность интерпретации данных, называемая погрешностью квантования, увеличится. Поэтому важной проблемой становится работоспособность всех нейронов сети.

Все вышеупомянутые методы требуют заранее заданного количества классов, на которые требуется разбить обучающее множество. Поскольку в данном случае известны лишь общее количество двигателей и их параметры, наиболее целесообразным было бы протестировать карты с различным количеством заданных классов, задавшись критерием минимума суммы всех расстояний между объектами и с соответствующими им центрами в каждом классе.

Данный метод строится по следующему алгоритму: при каждой групповой подаче обучающих векторов рассчитывается евклидово расстояние D_e между входными векторами массива X и соответствующим вектором весов нейронов слоя W . Количе-

ство нейронов N меняется от 1 до 10 в случае размерности карты равной $N \times N$ (прямоугольная сетка), либо N меняется от 1 до 100, когда размерность карты равна $1 \times N$ (линейная сетка). Далее находится сумма евклидовых расстояний D_e . Случай, когда евклидово расстояние будет минимальным, будет считаться оптимальным.

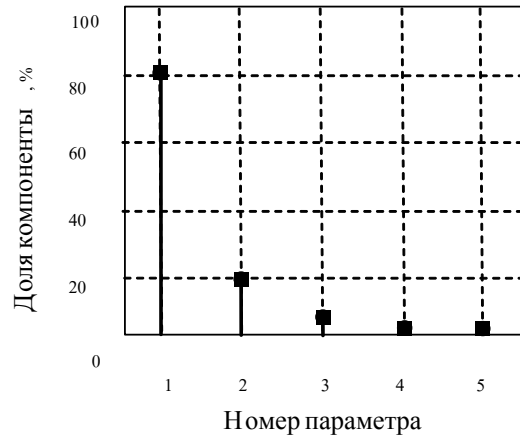


Рис. 3. Доля дисперсии в процентах, вносимой каждой составляющей

Для расчета карты использован набор инструментов Neural Toolbox пакета Matlab. Известно, что процесс обучения имеет вероятностный характер, то есть результат обучения может иметь разное значение. Для учета этого фактора выполнен многократный запуск обучения сети для различного количества классов. На **рис. 4, а** для карты размерностью $1 \times N$ представлен график суммарного евклидова расстояния для различного числа классов. Число эпох обучения в данном случае равно 1000, выполнено 5 вариантов обучения. На **рис. 5, б** представлен тот же график при числе эпох обучения, равном 2000 (7 вариантов).

Исходя из результатов, можно предположить, что минимальное количество классов приблизительно должно быть не меньше 30, но, желательно, не более 60÷80. Увеличение числа эпох свыше 1000 приводит лишь к возможному улучшению результата, то есть более низкие значения суммарного евклидова расстояния, по сравнению с первым случаем, получаются не при каждом процессе обучения.

На **рис. 5** представлены результаты подобных вычислений для квадратной карты размерностью $N \times N$. Число эпох обучения равно 2000. В этом случае можно предположить, что наиболее подходящее число классов будет равно 64–81. Таким образом, выбрано число классов, равное 64.

Для выполнения кластерного анализа используется квадратная сетка карты. Таким образом, в результате обучения была сформирована карта размерностью $[8 \times 8]$, которая показана на **рис. 6, а**. В каждой ячейке карты указано количество содержащихся в ней двигателей. Видно, что каждый кластер содержит от 0 до 9 двигателей.

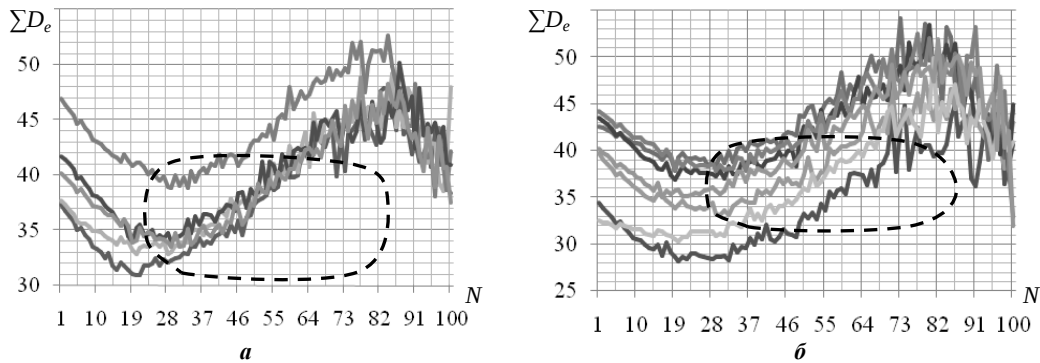


Рис. 4. Выбор числа классов с учетом числа эпох, суммарного евклидова расстояния и вероятностного процесса обучения для карты размерностью $1 \times N$

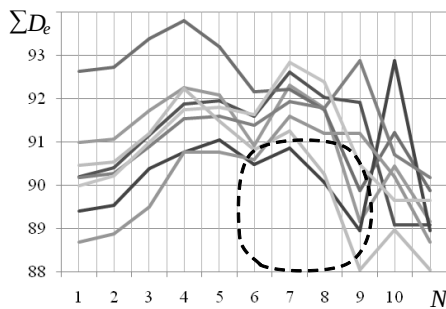


Рис. 5. Выбор числа классов с учетом числа эпох, суммарного евклидова расстояния и вероятностного процесса обучения для карты размерностью $N \times N$

На рис. 6, б в качестве примера представлены параметры двигателей для кластера 5×0 .

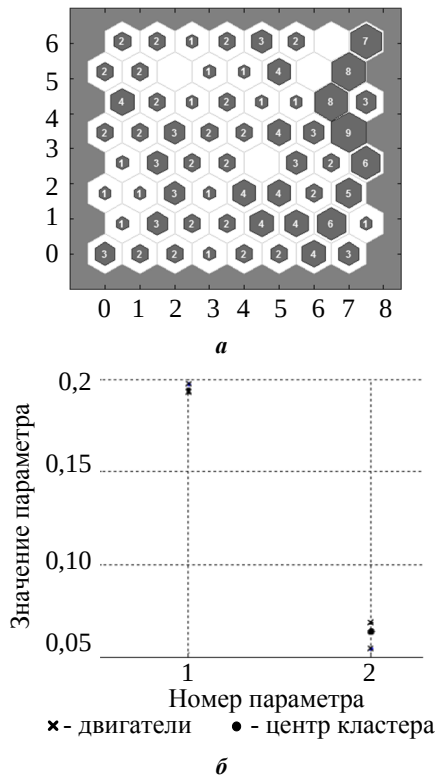


Рис. 6. Карта Кохонена и параметры кластера 5×0
Недостатком карты является наличие пустых

ячеек, которое можно объяснить небольшой базой данных двигателей. В табл. приведены показатели погрешности классификации. Из неё видно, что по второму параметру существенных отклонений от центров кластеров больше.

Параметр 1 ($\tilde{R}_s$)				Параметр 2 ($\tilde{R}_r$)			
Величина отклонения от центров, %				Величина отклонения от центров, %			
< 5	5-10	10-20	>20	< 5	5-10	10-20	>20
Количество шаблонов, %				Количество шаблонов, %			
70	17	9,5	3,5	69	11	10	10

Это можно объяснить тем, что карта в первую очередь классифицирует по параметру №1. В целом, отклонение до 10% процентов можно считать приемлемым. Таким образом, примерно 20% образцов классифицируются с отклонением, которое больше 10%.

Далее для каждого центра кластера следует рассчитать оптимизированный закон частотного управления. В данном примере предполагалось, что момент нагрузки постоянный. Это позволяет использовать линейный закон частотного управления с параметрами u_0 (начальная добавка напряжения) и f_1 (частота, при которой достигается полное напряжение двигателя).

В результате параметры квазиоптимального закона могут быть легко определены заранее для любого двигателя, параметры которого соответствуют определенному кластеру на карте кластеризации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование метода нейронной кластеризации позволило сформировать группы двигателей с близкими параметрами. При этом для одной группы могут быть применены одинаковые квазиоптимальные законы частотного управления. Это позволяет создать наборы таких законов для различных условий нагрузки, различных критериев оптимизации и, тем самым, исключить поисковые либо аналитические расчеты для каждого случая в отдельности. Соотнесение двигателя с одним из полученных наборов автоматически формирует для него соответствующие законы управления, что позволяет суще-

ственным образом упростить процедуру наладки энергоэффективного электропривода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Браславский И.Я., Ишматов З.Ш., Поляков В.Н. Энергосберегающий асинхронный электропривод. М.: АCADEMIA, 2004. 202 с.
2. Braslavskii I.Ya., Kostylev A.V., Tsibanov D.V. Study of optimal startup processes in the real network-FC-IM system. Russian Electrical Engineering, 83 (9), 2012, pp. 499-503.
3. Braslavskii I.Ya., Kostylev A.V., Tsibanov D.V. The use of cluster analysis for the synthesis of optimal frequency control law for induction drive. Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), International Symposium on, 2014, pp. 478-482.
4. Зюзев А.М., Зюзев А.М., Метельков В.П. Термодинамические модели для проверки асинхронного двигателя по нагреванию // Электротехника. 2012. №9. С. 48-52.
5. Braslavskii I.Ya., Ishmatov Zh.Sh., Kostylev A.V., Plotnikov Yu.V., Polyakov V.N., Erman G.Z., Antonov D.L. Energy efficiency of laws of scalar frequency control of induction electric drives. Russian Electrical Engineering. 2012, vol. 83, №9, pp 508-511.
6. Shreiner R.T., Kostylev A.V., Shilin S.I., Khabarov

A.I. Optimization of a variable-frequency induction motor drive with a scalar control system. Russian Electrical Engineering. 2012, vol. 83, № 9, pp 490-493.

7. Braslavskii I.Ya., Kostylev A.V., Stepanyuk D.P. Starting processes in the frequency-regulated asynchronous drive during optimal control. Russian Electrical Engineering. 2007, vol.78, №11, pp. 607-610.
8. Braslavskii I.Ya., Kostylev A.V., Stepanyuk D.P. Optimization of starting Process of the Frequency Controlled Induction Motor. Proceedings of the 13th International Power Electronics and Motion Control conference, Poznan, Poland. 2008, pp. 97-101.
9. Janos Abonyi, Balázs Feil, Cluster Analysis for Data Mining and System Identification, Springer Science & Business Media, 2007, 324 p.
10. Pokorný P., Dostál P. Cluster analysis and neural network. In Technical Computing, Prague, 2008. Sborník příspěvků 16. ročníku konference. Praha: Humusoft. 2008. pp. 25-34.
11. Braslavskii I.Ya., Kostylev A.V., Stepanyuk D.P., Mezeusheva D.V. Synthesis of asynchronous-drive control systems using neural networks. Russian Electrical Engineering. №76(9), 2005, pp. 65-68.

INFORMATION IN ENGLISH

APPLICATION OF NEURAL CLUSTER ANALYSIS FOR SYNTHESIS OF OPTIMAL FREQUENCY CONTROL LAW FOR INDUCTION DRIVE

Braslavsky I.Ya., Kostylev A.V., Esaulkova D.V.

The problems of simplified synthesis of scalar energy efficient systems of frequency control induction motor are discussed. The method of special frequency control laws calculated for a given load range is considered as a method to provide energy efficiency.

The calculation procedure of the frequency control law of induction motor is performed by iterative optimization, where the number of iterations can reach several thousand. So some more appropriate simplified procedure for the method of control law forming is needed. This procedure should be suitable for engineering calculations. The hypothesis of "similarity" of control laws is introduced for motors with similar parameters of the equivalent circuit. It is assumed that the control law (quasi-optimal law) is obtained for one motor and applied to other ones with similar parameters of the equivalent circuit with a certain error. Identification of motors with similar parameters is performed via self-organizing artificial neural networks (Kohonen map). The number of clusters is chosen according to the desired dispersion of the motor parameters, which is determined by the deviation from the values of the optimization criterion extremum. The result is presented as hexagonal Kohonen map of 64 clusters where each cluster has its own set of quasi-optimal laws. Thus, it is enough to match the motor with a certain cluster (or classify). As a result the motor gets the suitable quasi-optimal control law automatically.

The paper describes the procedure of the network forming and training. The examples of optimized control laws are given.

Keywords: optimization, scalar control, induction motor, neural network clustering.

REFERENCES

1. Braslavskii I.Ya. *Energoberegayushchiy asinhronnyiy*

elektroprivod [Energy saving induction electric drive]. Braslavskii I.Ya., Ishmatov Z.Sh., Polyakov V. N.. Moscow: ACADEMIA, 2004. 202 p.

2. Braslavskii I.Ya., Kostylev A.V., Tsibanov D.V. Study of optimal startup processes in the real network-FC-IM system. Russian Electrical Engineering, 83(9), 2012, pp. 499-503.
3. Braslavskii I.Ya., Kostylev A.V., Tsibanov D.V. The use of cluster analysis for the synthesis of optimal frequency control law for induction drive. Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), International Symposium on, 2014, pp. 478-482.
4. Zyuzev A.M., Metelkov V.P. *Termodinamicheskiye modeli dlya proverki asinkhronnogo dvigatelya po nagrevaniyu* [Thermodynamic models for temperature control of induction electric drive]. *Elektrotehnika* [Electrical engineering]. 2012. no.9, pp. 48-52.
5. Braslavskii I.Ya., Ishmatov Zh.Sh., Kostylev A.V., Plotnikov Yu.V., Polyakov V.N., Erman G.Z., Antonov D.L. Energy efficiency of laws of scalar frequency control of induction electric drives. Russian Electrical Engineering. 2012, vol.83, no.9, pp 508-511.
6. Shreiner R.T., Kostylev A.V., Shilin S.I., Khabarov A.I. Optimization of a variable-frequency induction motor drive with a scalar control system. Russian Electrical Engineering. 2012, vol. 83, no.9, pp 490-493.
7. Braslavskii I.Ya., Kostylev A.V., Stepanyuk D.P. Starting processes in the frequency-regulated asynchronous drive during optimal control. Russian Electrical Engineering. 2007, vol.78, no.11, pp. 607-610.
8. Braslavskii I.Ya., Kostylev A.V., Stepanyuk D.P. Optimization of starting Process of the Frequency Controlled Induction Motor. Proceedings of the 13th International Power Electronics and Motion Control conference, Poznan, Poland. 2008, pp. 97-101.

9. Janos Abonyi, Balázs Feil, Cluster Analysis for Data Mining and System Identification, Springer Science & Business Media, 2007, 324 p.

10. Pokorný P., Dostál P. Cluster analysis and neural network. In Technical Computing, Prague, 2008. Sborník příspěvků 16. ročníku konference. Praha: Humusoft. 2008. pp.

25-34.

11. Braslavskii I.Ya., Kostylev A.V., Stepanyuk D.P., Mezeusheva D.V. Synthesis of asynchronous-drive control systems using neural networks. Russian Electrical Engineering. No.76(9), 2005, pp. 65-68.

УДК 62-83

Шрейнер Р.Т., Поляков В.Н., Медведев А.В.

ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЙ РЕСУРС ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОГО СИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА В ПЕРЕМЕЖАЮЩИХСЯ РЕЖИМАХ РАБОТЫ

В работе рассмотрен частотно-регулируемый электропривод на основе явнополюсного синхронного двигателя. Описан объект исследования. Приведены функциональная схема и обобщенная структурная схема математической модели системы векторного управления синхронного электропривода. Сформулирована постановка задачи исследования электропривода в перемежающихся режимах работы. Описана методика моделирования синхронного электропривода, выявляющая предельно допустимые по нагреву нагрузки двигателя. Приведены результаты компьютерного моделирования перемежающихся режимов работы двигателя при постоянном и оптимальном регулировании магнитного потока якоря. Выявлен ресурс явнополюсного синхронного двигателя по критерию допустимого по нагреву момента двигателя. Проведен сравнительный анализ потерь мощности синхронного двигателя при работе частотно-регулируемого синхронного электродвигателя в перемежающихся режимах при постоянном и оптимальном регулировании магнитного потока якоря. Дано заключение об эффективности использования оптимального регулирования магнитного потока якоря в системах векторного управления синхронных электроприводов, работающих в перемежающихся режимах.

Ключевые слова: синхронный электропривод, явнополюсный двигатель, перемежающиеся режимы, ресурс по перегрузке, энергосбережение.

ВВЕДЕНИЕ

Допустимые области функционирования регулируемых электроприводов определяются параметрами силовой части (электродвигателей и силовых преобразователей) и формируются с учетом естественных и искусственных ограничений, отражающих объективно ограниченную либо допустимую по каким-либо критериям нагрузочную способность элементов силовой схемы. В отличие от двигателей постоянного тока, перегрузочная способность двигателей переменного тока не лимитируется условиями коммутации и теоретически может значительно превышать перегрузочную способность двигателей постоянного тока. Наиболее существенное влияние на допустимые области функционирования электропривода оказывают ограничения по нагреву двигателя и преобразователя, а также по объективно ограниченному максимальному выходному напряжению и максимально допустимому выходному току преобразователю частоты, питающего двигатель. Практически допустимые области функционирования частотно-регулируемых электроприводов переменного тока определяются не только отмеченными факторами, но и законом частотного управления и качеством его реализации в системе регулирования. Так, например, в [1] показано, что при использовании закона оптимального регулирования магнитного потока асинхронного двигателя в перемежающихся режимах работы позволяет повысить его допустимую по нагреву нагрузочную способность либо снизить величину потерь в двигателе при одинаковых нагрузках на 20–25% в зависимости от

времени приложения нагрузки. В данной статье ставится задача определения *ресурса по перегрузке* частотно-регулируемого синхронного электропривода при перемежающихся режимах работы, оптимизированного по минимуму потерь двигателя.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования является частотно-регулируемый синхронный электропривод, функциональная схема которого приведена на **рис. 1**. Обмотка якоря явнополюсного синхронного двигателя (СД) получает питание от преобразователя частоты (ПЧ). Обмотка возбуждения подключена к управляемому преобразователю постоянного тока (ППТ). В состав системы управления входят трехмерная САР токов, разомкнутая САР электромагнитного момента и замкнутая САР скорости двигателя. Состояние синхронного электропривода контролируется датчиками фазных токов якоря (ДТЯ), тока возбуждения (ДТВ), скорости (ДС) и положения вала двигателя (ДП). Регулирование токов и электромагнитного момента ведется в прямоугольной системе координат, вращающейся синхронно с индуктором СД. Преобразование переменных осуществляется с помощью преобразователей координат (ПК1 и ПК2).

Благодаря тому, что регулирование токов и электромагнитного момента осуществляется в синхронно вращающейся с индуктором прямоугольной системе координат, описанная система управления позволяет обеспечивать близкие к нормированным электромеханические характеристики синхронного

электропривода при различных законах управления магнитным потоком двигателя.

На рис. 2 представлена схема математической модели системы управления синхронного электропривода, где введены следующие обозначения: $\mathcal{M}$, $\mathcal{R}_i$, $\mathcal{F}$, $\mathcal{P}$, $\mathcal{R}_\omega$, $\mathcal{L}$, $\mathcal{G}$ – операторы моделей силовой части, трехмерного регулятора токов (РТ), формирователя режимов (ФР), фильтра (Ф), регулятора скорости (РС), блока ограничения (БО) и датчика интенсивности (ЗИ).

Модель силовой части учитывает насыщение машины по главному магнитному пути и реактивную составляющую электромагнитного момента, обусловленную явнополюсностью индуктора. Магнитное состояние машины рассчитывается методом локальных характеристик намагничивания [2].

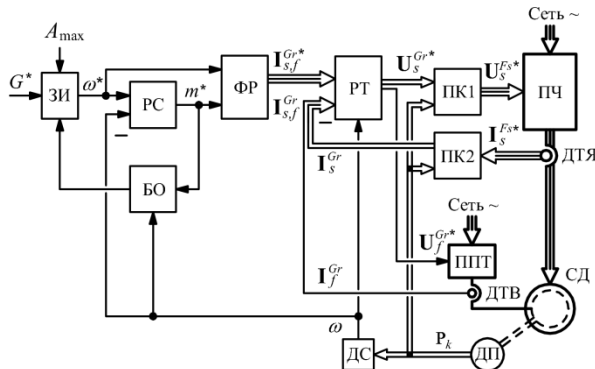


Рис. 1. Функциональная схема синхронного электропривода:

ПЧ – преобразователь частоты; СД – синхронный двигатель; ДТЯ и ДТВ – датчики токов обмоток якоря и возбуждения; ДС и ДП – датчики скорости и положение вала двигателя; ПК1 и ПК2 – преобразователи координат; РТ и РС – регуляторы токов и скорости; ФР – формирователь режимов; БО – блок ограничения; ЗИ – датчик интенсивности

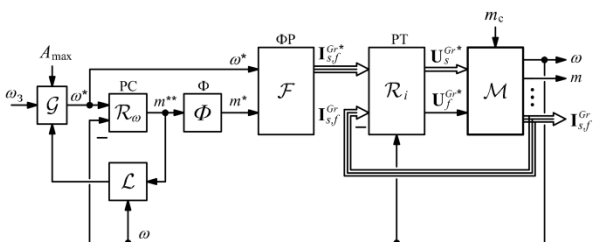


Рис. 2. Схема модели синхронного электропривода при векторном управлении

Трехмерный регулятор токов синтезирован по методике нелинейных многосвязных систем подчиненного регулирования [3]. В структурном отношении РТ имеет многомерный фильтр на выходе, элемент с обратным оператором звена токов модели силовой части электропривода и трехмерное интегрирующее звено. Благодаря такому составу РТ позволяет подавлять высокочастотных помехи в случае наличия их в каналах задания и обратных связей, осуществлять компенсацию влияния многомерного нелинейного звена токов, обеспечивать астатизм САР токов по управляющим воздействиям и оптимизацию динамических характеристик (вре-

ни переходного процесса, перегулирования и др.).

Роль ФР состоит в формировании заданий для САР токов в функции заданных значений электромагнитного момента и скорости двигателя. С помощью ФР реализуются законы частотного управления и единичный коэффициент передачи разомкнутой САР электромагнитного момента.

Фильтр Ф на входе формирователя режимов позволяет согласовать быстродействие САР скорости с требованиями технологической задачи.

Регулятор скорости выполняет функцию корректирующего устройства и в зависимости от требований технологического процесса может быть пропорциональным либо пропорционально-интегральным. Синтез РС проводится по типовой методике систем подчиненного регулирования с настройкой статических и динамических характеристик САР на технический (модульный) оптимум.

Блок БО ограничивает выходной сигнал регулятора скорости. Благодаря этому осуществляется ограничение электромагнитного момента двигателя при перегрузках.

Задатчик интенсивности обеспечивает линейное нарастание скорости при ступенчатом сигнале на его входе.

Переменные и параметры математической модели (кроме текущего времени и постоянных времени) записаны в относительных единицах [2].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Исследуется режим продолжительной работы при переменной нагрузке (S6), то есть последовательность идентичных рабочих циклов, каждый из которых состоит из интервалов работы при постоянной нагрузке $m_n = M_n / M_{ном}$ и на холостом ходу $m_{х.х} = M_{х.х} / M_{ном}$. Характеризующей величиной является продолжительность нагрузки ПН = $t_n / (t_n + t_{х.х})$, где t_n – интервал постоянной нагрузки; $t_{х.х}$ – интервал холостого хода. Нормируемые стандартные значения ПН=15, 25, 40 и 60 %.

Задачей исследования является выявление электромеханического ресурса частотно-регулируемого синхронного электропривода при перемежающихся режимах работы, оптимизированного по минимуму потерь СД при переменном потоке. Под электромеханическим ресурсом электропривода подразумевается совокупность предельных значений показателей качества, определяющих допустимую область функционирования электропривода по перегрузке. В качестве обобщающего показателя качества принимается допустимый по нагреву момент двигателя ($m_{доп}$) на интервалах работы.

МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ

Объектом моделирования является явнополюсный синхронный двигатель с продольным электромагнитным возбуждением. Методика выявления допустимого момента по нагреву описана в [1] на примере асинхронного двигателя. С учетом особенностей синхронного двигателя как объекта управления эта методика включает следующие этапы. Сна-

чала проводится серия расчетов перемежающихся режимов при работе двигателя в системе частотного управления, в которой реализуется закон *постоянства потокосцепления обмотки якоря при ортогональности изображающих векторов потокосцеплений и токов якоря* [4] (далее закон при постоянстве магнитного потока якоря) независимо от момента нагрузки и скорости двигателя. Для поиска задающих воздействий САР токов, обеспечивающих режим работы СД при постоянстве магнитного потока якоря, конструируется целевая функция вида

$$J = a_1[(\psi_{sd}i_{sd} + \psi_{sq}i_{sq})]^2 + a_2(\psi_s^* - \psi_s)^2,$$

где a_1, a_2 – весовые коэффициенты; ψ_{sd}, ψ_{sq} и i_{sd}, i_{sq} – составляющие изображающих векторов полных потокосцеплений и токов обмотки якоря; ω – скорость двигателя; ψ_s^* и ψ_s – заданное и текущее значения модуля изображающего вектора полных потокосцеплений обмотки якоря.

При значении $J = 0$ обеспечивается режим работы СД при постоянстве потокосцепления $\psi_s = \psi_s^*$ и ортогональности изображающих векторов токов и потокосцеплений обмотки якоря.

Поиск управлений в этом случае сводится к решению экстремальной задачи

$$J(i_m^o, \psi_{i_m}^o, m, \omega) \rightarrow 0_{(i_m, \psi_{i_m})}, \quad (1)$$

где i_m и ψ_{i_m} – модуль и аргумент изображающего вектора результирующих намагничивающих токов; i_m^o и $\psi_{i_m}^o$ – значения модуля и аргумента изображающего вектора результирующих намагничивающих токов, при которых $J = 0$.

Решение задачи (1) определяется в виде зависимостей $i_{sd}^o(m, \omega)$, $i_{sq}^o(m, \omega)$ и $i_{fd}^o(m, \omega)$. На **рис. 3** (штриховые линии) представлены i_{sd}^o , i_{sq}^o и

i_{fd}^o , рассчитанные для двигателя мощностью 10 МВт при фиксированном значении скорости $\omega = 1$ и изменении момента m .

Термическое состояние СД оценивается по методу средних потерь, вычисляемых по формуле

$$\Delta p_{cp} = \frac{1}{t_{\text{ц}}} \int_0^{t_{\text{ц}}} [(k_s + k_{\text{доб}})i_s^2 + k_{fd}i_{fd}^2 + k_{\text{магн.с}}\omega_s^2\psi_m^2 + k_{\text{мех}}\omega^m] dt, \quad (2)$$

где $t_{\text{ц}}$ – продолжительность цикла; i_s и ψ_m – модули изображающих векторов токов якоря и главных потокосцеплений; i_{fd} – ток обмотки возбуждения; k_i, n, m – постоянные коэффициенты.

Для каждого из нормируемых стандартом фиксированных значений ПН (0,15; 0,25; 0,4 и 0,6) рассчитываются зависимости средних потерь в двигателе за цикл Δp_{cp} от величины момента m на интервале нагрузки. В результате анализа этих зависимостей для каждого стандартного значения ПН и фиксированного времени цикла определяется такое значение m_n , при котором средние за цикл потери в двигателе Δp_{cp} оказываются равными номинальным потерям $\Delta p_{ном}$. В соответствии с методом средних потерь это значение m_n квалифицируется, как *допустимое по нагреву двигателя* при данном значении ПН и времени цикла. В результате находятся зависимости допустимых по нагреву величин момента нагрузки $m_{\text{доп}}$ от величины ПН и времени цикла $t_{\text{ц}}$.

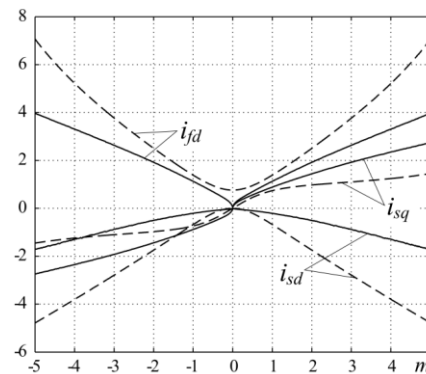


Рис. 3. Характеристики СД при постоянстве (штриховые линии) и оптимальном магнитном потоке якоря (сплошные линии)

Для выявления электромеханического ресурса СД при перемежающихся режимах проводится серия расчетов для двигателя в системе частотного управления, в которой реализуется закон управления по минимуму суммарных потерь СД при *переменном магнитном потоке* (далее закон при *переменном магнитном потоке якоря*). При оптимизации режимов СД по минимуму суммарных потерь используется целевая функция (2). Постановка задачи оптимизации формулируется следующем образом:

$$\Delta p(i_m^o, \psi_{i_m}^o, m, \omega) \rightarrow \min_{(i_m, \psi_{i_m})}, \quad (3)$$

Решение задачи (3) $i_{sd}^o(m, \omega)$, $i_{sq}^o(m, \omega)$ и $i_{fd}^o(m, \omega)$ (законы управления) представлены на **рис. 3** (сплошные линии) при фиксированном значении скорости $\omega = 1$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

На **рис. 4, а** представлены зависимости допустимых по нагреву значений момента нагрузки двигателя $m_{\text{доп}}$ от величины продолжительности нагрузки. Время цикла перемежающегося режима принято равным 10 с.

На **рис. 4, а** сплошной линией показана зави-

симость при переменном магнитном потоке и штриховой линией – при постоянном магнитном потоке обмотки якоря.

Как видно, при уменьшении ПН допустимый по нагреву момент на интервале нагрузки $m_{\text{доп}}$ возрастает в сравнении с моментом, допустимым по нагреву в продолжительном режиме работы S1 (при ПН=1). Причем момент, допустимый по нагреву двигателя при переменном магнитном потоке якоря, превышает момент, допустимый по нагреву при постоянном магнитном потоке. В частности, величина превышения допустимого момента при ПН=0,25 составляет 37%.

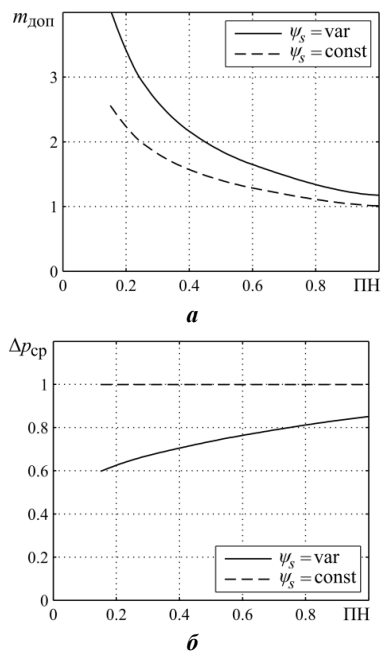


Рис. 4. Зависимости допустимых по нагреву значений момента нагрузки (а) и средних потерь двигателя (б) от величины продолжительности нагрузки

Таким образом, режим управления по минимуму суммарных потерь СД при *переменном магнитном потоке* позволяет повысить нагрузочную способность, то есть допустимый по нагреву момент нагрузки и соответственно мощность двигателя на рабочем интервале.

С точки зрения энергосбережения представляет интерес сопоставление перемежающихся энергетических нагрузочных диаграмм по величине потерь в СД при постоянном и переменном магнитном потоке якоря при условии, что моменты нагрузки в обоих случаях имеют одни и те же значения, допустимые по нагреву при постоянном магнитном потоке якоря. На рис. 5 представлены нагрузочные диаграммы синхронного электропривода с пропорциональным (а) и пропорционально-интегральным (б) регулятором скорости в перемежающемся режиме работы с постоянным и переменным магнитным потоком якоря.

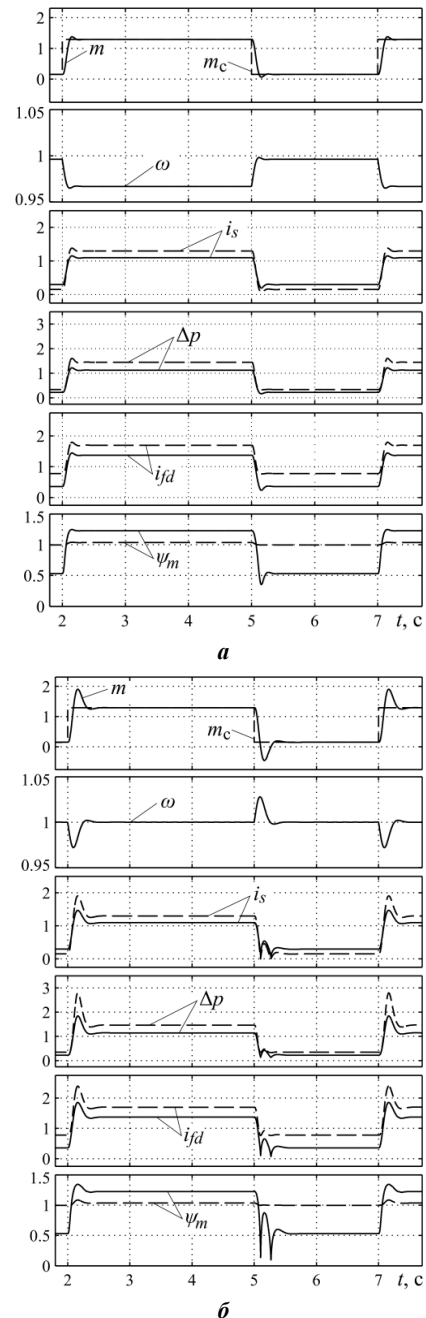


Рис. 5. Нагрузочные диаграммы при работе синхронного двигателя с постоянным и переменным магнитным потоком статора

Продолжительность интервала нагрузки ПН=0,6. Величина нагрузки одна и та же как в случае постоянства магнитного потока статора, так и при его оптимальном регулировании. Как видно, обеспечиваемые электроприводом диаграммы скорости $\omega(t)$ и электромагнитного момента $m(t)$ остаются в обоих случаях неизменными и соответствуют нормированным показателям процессов систем подчиненного регулирования. В то же время, переход к режиму управления с оптимальным регулированием магнитного потока якоря позволяет снизить потери энергии в двигателе $\Delta p_{\text{ср}}$ при одних и тех же нагрузках на валу. Об этом свидетельствуют зависимости средних за цикл потерь в двигателе от времени при-

ложения нагрузки, приведенные на рис. 4, б. Как видно, при ПН=0,25 выигрыш в потерях составляет 34%. Благодаря снижению токов в обмотках якоря и возбуждения (см. рис. 5), потребляемых от преобразователя частоты и преобразователя постоянного тока, потери в этих преобразователях также снижаются. В результате повышается коэффициент полезного действия электропривода, как электромеханического преобразователя энергии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование режимов оптимального регулирования магнитного потока явнополюсного синхронного двигателя в системе частотно-регулируемого электропривода, работающего в перемежающихся режимах работы, позволяет повысить допустимую по нагреву нагрузочную способность, либо снизить величину потерь мощности в двигателе. Наибольший эффект достигается в области относительно малых значений времени приложения нагрузки. При этом сохраняются условия оптимизации динамических показателей при соответствующем выборе быстродействия САР токов и возможность формирования заданных механических характеристик электропривода.

Важным фактором является также возможность перераспределения электрических потерь между обмотками якоря и возбуждения явнополюсного синхронного двигателя нормальной конструкции с целью снижения нагрева обмотки возбуждения как

наиболее напряженной в термическом отношении части. Ток возбуждения при оптимальном регулировании потока якоря снижается в сравнении с током в режиме постоянства потока якоря.

Вместе с тем следует отметить, что при реализации закона оптимального регулирования магнитного потока якоря в динамичных электроприводах потребуются повышенный запас по напряжению преобразователей. Поэтому закон оптимального регулирования может быть рекомендован для систем управления электроприводов, работающих при сравнительно медленных темпах изменения управляющих и возмущающих воздействий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шрейнер Р.Т., Емельянов А.А., Медведев А.В. Оптимизация перемежающихся режимов работы частотно-регулируемого асинхронного // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып.3: в 5 ч., 2010. Ч.4. С. 158-167.
2. Энергоэффективные режимы регулируемых электроприводов переменного тока / В.Н. Поляков, Р.Т. Шрейнер; под ред. Р.Т. Шрейнера. Екатеринбург: ФГАОУ ВПО «Российский государственный профессионально-педагогический университет», 2012. 220 с.
3. Вейнгер А.М. Регулируемый синхронный электропривод. М.: Энергоатомиздат, 1985. 224 с.
4. Системы подчиненного регулирования в электроприводах переменного тока / О.В. Слежановский, Л.Х. Дацковский, Л.М. Тарасенко, И.С. Кузнецов и др. М.: Энергоатомиздат, 1983. 256 с.

INFORMATION IN ENGLISH

ELECTROMECHANICAL RESOURCE OF VARIABLE-FREQUENCY SYNCHRONOUS DRIVE IN INTERMITTENT MODES OF OPERATION

Shreiner R.T., Polyakov V.N., Medvedev A.V.

Variable-frequency drive based on salient pole synchronous motor is considered in the article. The subject of research is described. A functional diagram and an integrated structural diagram of mathematical model of synchronous drive vector control system are presented. The task of the electric drive study in intermittent operational modes is formulated. Methods of synchronous drive modeling which enable to define the maximum motor temperature loads are described. The results of computer modeling of intermittent operational modes of the motor with continuous and optimal regulation of armature magnetic flux are given. The service life of the salient pole synchronous motor in respect of maximum allowable motor temperature and torque is defined. Comparative analysis of power losses in synchronous motor during operation of frequency-variable synchronous motor in intermittent modes with continuous and optimal regulation of armature magnetic flux is carried out. The conclusion is made about the efficiency of use of optimal armature magnetic flux regulation in vector control systems of synchronous drives that operate in intermittent modes.

Keywords: synchronous electric drive, salient pole motor, intermittent operational modes, overload resource, energy saving.

УДК 62-83: 62-573: 62-892

REFERENCES

1. Shreiner R.T., Emelyanov A.A., Medvedev A.V. *Optimizatsiya peremezhayuschihsy rezhimov raboti chastotno-reguliruemogo asinhronnogo elektroprivoda* [Intermittent operation improvement of variable-frequency induction electric drive]. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki* [Proceedings of TulGU. Technical sciences]. 2010, issue 3, vol.4, pp. 158-167.
2. Polyakov V.N., Shreiner R.T. *Energoeffektivnye rezhimy reguliruemykh elektroprivodov peremennogo toka* [Energy saving operating modes of controlled AC electric drives]. Under the editorship of R.T. Shreiner. Yekaterinburg: FSAEI HPE Russian State Vocational Pedagogical University, 2012. 220 p.
3. Veinger A.M. *Reguliruemyi sinhronnyi elektroprivod* [Controlled synchronous drive]. Moscow: Energoatomizdat, 1985. 224 p.
4. Slezhanovskii O.V., Datskovskii L.Kh., Tarasenko L.M., Kuznetsov I.S., *Sistemi podchinennogo regulirovaniya v elektroprivodah peremennogo toka* [Slave control systems in AC electric drives]. Moscow: Energoatomizdat, 1983. 256 p.

Каримсаков Т.К.

ВАРИАНТЫ МОДЕРНИЗАЦИИ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ШАХТНЫХ ВАГОНООПРОКИДЫВАТЕЛЕЙ

Рассматриваются проблемы эксплуатации асинхронных электроприводов шахтных вагоноопрокидывателей. Анализируются возможные пути модернизации электроприводов для повышения их надежности и увеличения ресурса.

Ключевые слова: шахтный вагоноопрокидыватель, асинхронный электропривод, тиристорный регулятор напряжения.

Погрузочно-транспортный комплекс современного рудника представляет собой совокупность технических средств, обеспечивающих перемещение добытой подземным способом руды от забоя до ствола шахты. Процесс перемещения руды включает операции выпуска, погрузки, доставки и транспортирование горной массы по магистральным выработкам, а для большинства рудников еще и механическое дробление руды в подземных дробильных комплексах. В целом, процесс перемещения руды является одним из наиболее трудоемких и может составлять до 30-40% от общей трудоемкости добычи.

Основным видом магистрального транспорта отечественных и зарубежных рудных шахт в настоящее время является электровозная откатка с применением глухих кузовов вагонеток.

Опрокидыватели вагонеток являются важными звеньями погрузочно-разгрузочной и транспортной цепи технологического процесса подземных разработок, от надежности и качества работы которых зависят в целом и экономические показатели работы шахты. Опрокидыватели предназначены для разгрузки как нерасцепленных составов шахтных грузовых вагонеток с глухим кузовом типа ВГ вместимостью 4,5 м³, так и одиночных вагонеток.

Общий вид опрокидывателя показан на **рис. 1**, а его кинематическая схема приведена на **рис. 2**.

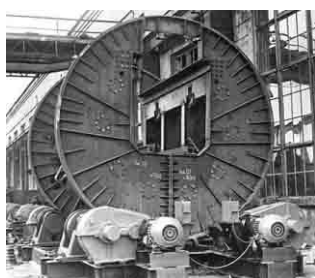


Рис. 1. Опрокидыватель вагонеток рудничный ОВР-1

Разгрузка вагонеток с помощью опрокидывателя осуществляется следующим образом. Грузеный состав прибывает на место разгрузки с электровозом. Первая вагонетка подается в опрокидыватель и при достижении зоны опрокидывания, контролируемой датчиком положения состава, фиксируется передними и задними стопорами, которые срабатывают с помощью пневмосистемы. После этого включается электродвигатель привода опрокидывателя, переворачивающего вагонетку на 360° вокруг продольной оси. Благодаря наличию вращающейся сцепки расцепление состава при раз-

грузке не требуется. Но возможна при необходимости и разгрузка одиночной вагонетки. При транспортировании горной массы, склонной к прилипанию на стенках вагонетки, поворот барабана опрокидывателя производится сначала на 180°. После этого включается виброударник, способствующий полному высыпанию материала. Виброударник работает от 10 до 40 с, затем отключается, и происходит поворот барабана до исходного положения. Далее пустая вагонетка заменяется на грузеную, и цикл повторяется, пока не разгрузятся все вагонетки. Нормальный режим работы опрокидывателя – автоматический.

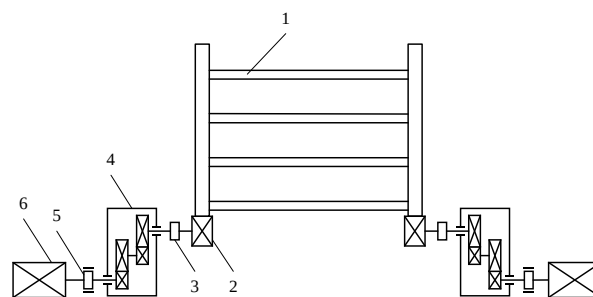


Рис. 2. Кинематическая схема опрокидывателя вагонеток ОКЭ:

1 – барабан; 2 – ролик приводной; 3 – упругая муфта; 4 – редуктор; 5 – втулочно-пальцевая муфта с тормозными шкивами; 6 – электродвигатель

За сутки происходит разгрузка от 70 до 80 составов, каждый из которых состоит из 8 вагонеток. Таким образом, в сутки разгружается 560-640 вагонеток.

Главной проблемой эксплуатации опрокидывателей рудничных вагонеток является малый ресурс их электроприводов.

На опрокидывателях используется нерегулируемый асинхронный электропривод с релейно-контакторной системой управления. Привод состоит из четырех асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором, мощностью 11 кВт каждый.

Малый ресурс обусловлен тяжелым режимом работы электроприводов. Они работают в повторно-кратковременных режимах с высокой частотой включения (до 50 пусков в час) и большими моментами инерции, приведенными к валу двигателя.

Тяжелые условия прямого пуска приводят к высокой аварийности и малому сроку службы АД. Основной причиной выхода из строя АД является

разрушение изоляции статорных обмоток, обусловленное тепловыми нагрузками, а также воздействием значительных электродинамических сил, возникающих при прямом пуске.

Частые выходы из строя АД приводят к простоям в технологическом процессе, потере прибыли, большим затратам на ремонт.

В ближайшее время коренных изменений в технологическом процессе транспортировки полезных ископаемых в шахтах не ожидается. В связи с этим экономически целесообразной является модернизация электроприводов опрокидывателя, сохраняя прежней механическую часть.

Основная цель модернизации электроприводов опрокидывателей – повышение их надежности и увеличения ресурса.

Для достижения поставленной цели необходимо решение следующих задач:

- получение реальных данных о токовых нагрузках имеющихся электроприводов;
- создание модели электромеханической части вагоноопрокидывателей;
- анализ возможных вариантов модернизации электропривода;
- выбор схемы электропривода и исследование ее на модели;
- поиск рациональных алгоритмов управления.

Для получения данных о токовых нагрузках электроприводов были проведены эксперименты в реальных условиях производства. Типичные результаты приведены на **рис. 3**. Полученные данные позволили оценить истинные значения пускового и рабочего тока электропривода, а также длительность переходного процесса при пуске (**рис. 4**).

Важной особенностью при работе опрокидывателя является то, что момент инерции, приведенный к валу электродвигателя является переменным, поскольку по мере изменения угла поворота происходит высыпание руды из вагонетки. В то же время, анализ конструкции опрокидывателя и вагонетки показывает, что даже при полной нагрузке влияние руды на изменение момента инерции не является существенно значимым. Кроме того, из осциллограмм на **рис. 3** и **рис. 4** видно, что длительность переходного процесса не превышает 0,3-0,4 с. За это время вагонетка поворачивается на угол, не превышающий 7°. Таким образом, переходный процесс заканчивается до начала изменения приведенного момента инерции, обусловленного высыпанием руды из вагонетки. Данный факт позволяет существенно упростить модель электромеханической части опрокидывателя.

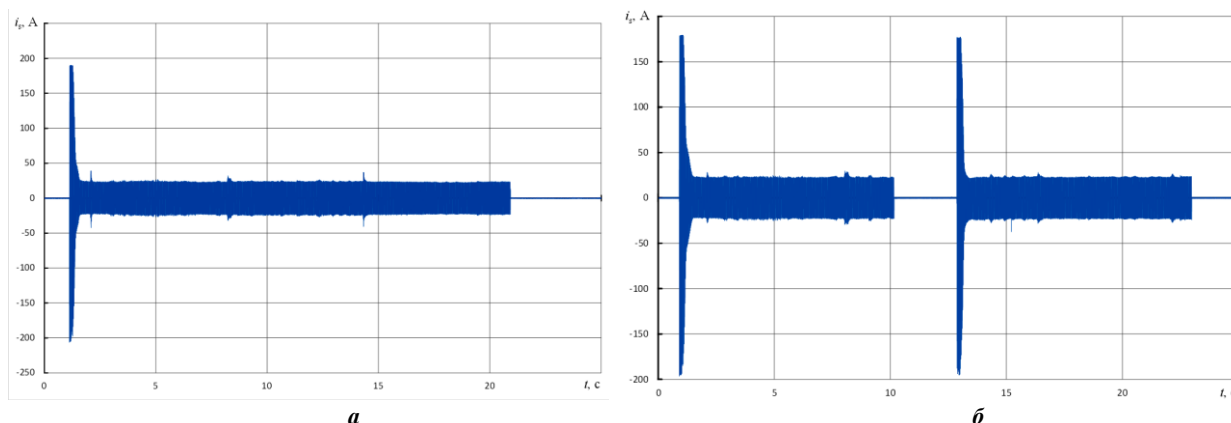


Рис. 3. Осциллограмма тока статора АД при опрокидывании полной вагонетки:
а – без остановки; б – с остановкой

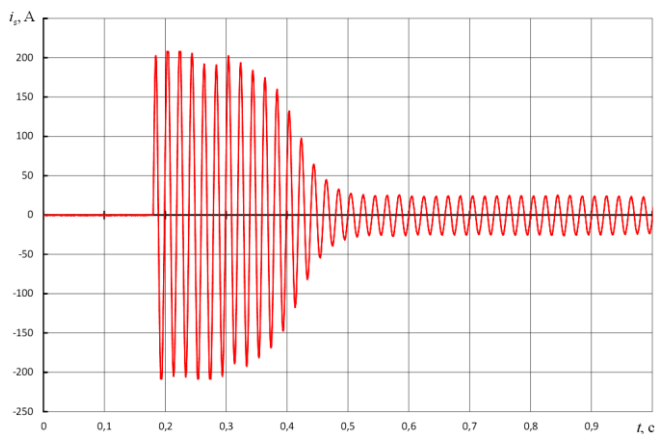


Рис. 4. Осциллограмма переходного процесса при пуске АД

В современных условиях создание модели рационально проводить с использованием пакета Matlab, имеющего широкие возможности по моделированию и анализу процессов в электромеханических системах [1].

Как упоминалось выше, главной причиной высокой аварийности электроприводов являются частые прямые пуски АД, приводящие к термическому и электродинамическому разрушению изоляции статорных обмоток. Таким образом, модернизация электроприводов вагоноопрокидывателей должна обеспечивать пусковой режим, минимизирующий негативное влияние переходных пусковых процессов.

Существуют два очевидных решения, позволяющих достичь поставленной цели:

- 1) применение системы «ПЧ-АД»;
- 2) применение системы «ТРН-АД».

Оба решения при выборе соответствующих режимов позволяют снизить негативное влияние переходных процессов за счет облегчения условий пуска АД. При этом стоимость низковольтных ТПН в 2-3 раза ниже стоимости ПЧ такой же мощности.

При выходе из строя одного из двигателей работа опрокидывателя обеспечивается двумя АД, расположенными на противоположной от неисправного двигателя стороне барабана. В этой связи рационально парное подключение АД, расположенных на одной стороне барабана опрокидывателя к одному ПЧ (рис. 5, а) или ТРН (рис. 5, б).

Следует отметить, что обслуживание электроприводов вагоноопрокидывателей в настоящее время носит преимущественно реактивный характер, т.е. АД работают до отказа, после чего производится их замена. При этом двигатели изнашиваются неравномерно, что не позволяет прогнозировать их остаточный ресурс и минимизировать потери от простоев производства.

Причиной неравномерной выработки ресурса является имеющее место различие фрикционных связей между приводными роликами и барабаном, что приводит к проскальзыванию отдельных роликов (особенно при пуске) и, соответственно, неравномерному распределению нагрузки между электроприводами. Для равномерной выработки ресурса АД необходимо принять меры по синхронизации нагрузочных режимов их работы.

В этой связи представляется необходимым рассмотреть варианты модернизации, суть которых заключается в последовательном соединении статорных обмоток пары двигателей, работающих от одного ТПН [2].

На рис. 6, а приведена схема включения статорных обмоток двигателей в «треугольник» при питании ТРН от сети 380 В.

Шахтные системы электроснабжения часто имеют трехфазную сеть с линейным напряжением 660 В. При питании от такой сети целесообразно применение схемы последовательного соединения

обмоток статора двигателей в «звезду» (рис. 6, б).

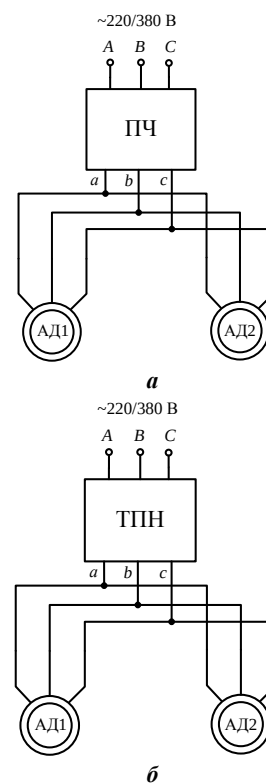


Рис. 6. Традиционные схемы управления параллельным пуском АД:
а – система ПЧ-АД; б – система ТПН-АД

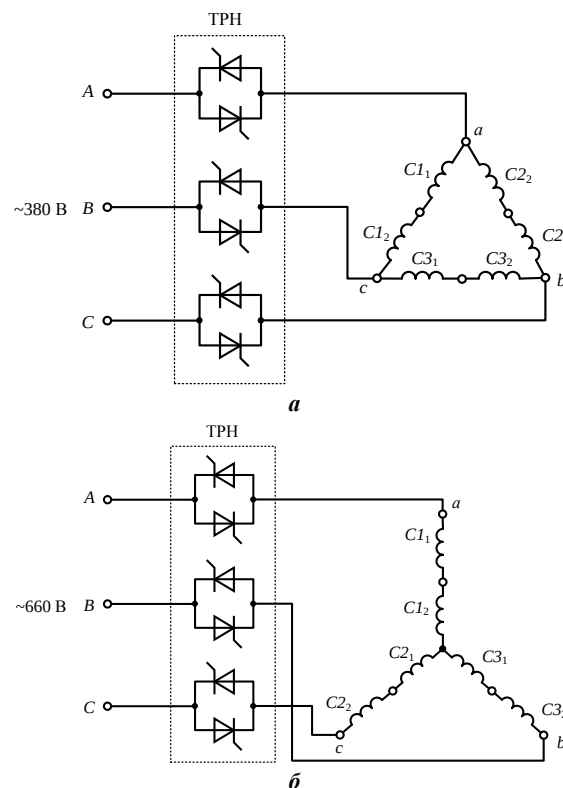


Рис. 7. Двухдвигательная система «ТРН-АД» с последовательным соединением статорных обмоток АД:
а – по схеме «треугольник»; б – по схеме «звезда»

При таких схемах включения токи в статорных обмотках двух двигателей будут одинаковы, что позволяет синхронизировать работу электроприводов, снизить вероятность проскальзывания роликов и равномерно распределить нагрузку на двигатели.

Обе приведенные схемы работают при пониженном значении фазного напряжения статорной обмотки двигателя.

В данной работе ставится задача проведения дальнейших исследований с целью более подробного анализа электромеханических процессов в электроприводе. Отдельно следует рассмотреть проблему обеспечения синхронизации работы двухдвигательного электропривода вагоноопрокидывателя как системы с переменными массой с учетом влияния фрикционной связи

приводных роликов и барабана.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Моделирование пусковых процессов асинхронных двигателей при использовании тиристорных регуляторов напряжения, реакторов, автотрансформаторов и трансформаторно-тиристорных пусковых устройств // Вечеркин М.В., Славгородская Е.В., Славгородский В.Б., Сарваров И.А. Труды VII Международной (VII Всероссийской) научно-технической конференции по автоматизированному электроприводе. Иваново: ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина», 2012. С. 350-355.

2. Электропривод центробежного литья валков по системе ТПН – АД: монография / Сарваров А.С., Петушков М.Ю., Стригов А.Д., Сарваров И.А., Валяева А.М. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2010. 134 с.

INFORMATION IN ENGLISH

UPGRADED VERSIONS OF ELECTRIC DRIVES FOR MINING DUMPERS

Karimsakov T.K.

Production problems of asynchronous electric drives for mine dumpers are considered. Possible ways of electric drive modernization aimed at improvement of their reliability and extension of their service life have been analyzed.

Keywords: mine car dumper, asynchronous electric drive, thyristor voltage regulator.

REFERENCES

1. Vecherkin M.V., Slavgorodskaja E.V., Slavgorodskij V.B., Sarvarov I.A. *Modelirovanie puskovyh processov asinhronnyh dvigatelej pri ispolzovanii tiristornyh reguljatorov naprjazhenija, reaktorov, avtotransformatorov i transformatorno-tiristornyh puskovyh ustrojstv* [Induction

motor start modeling using thyristor voltage regulators, reactors, autotransformers, and transformer-thyristor starting devices]. Scientific papers of VII International (VII All-Russian) scientific conference on automatic electric drive. FSBEI HPE «Ivanovo state power engineering university». Ivanovo, 2012, pp. 350-355.

2. Sarvarov A.S., Petushkov M.Ju., Strigov A.D., Sarvarov I.A., Valjaeva A.M. *Elektroprivod tsentrobezhnogo litya valkov po sisteme TPN - AD* [Electric drive of centrifugal roll casting in the system thyristor voltage converter - induction motor]: monograph. Magnitogorsk. Nosov State Technical University, 2010, 134 p.

УДК 621.771.25 – 83

Сафин И.Р., Лукьянов С.И., Бодров Е.Э.

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ РАЗМОТОЧНОГО АППАРАТА СТАНА ПО ПРОИЗВОДСТВУ СТАЛЬНОЙ АРМАТУРЫ

Приведены результаты экспериментальных и теоретических исследований возможности реализации разработанных технологических требований к электроприводе размоточного аппарата на стане ISF 5 ОАО «ММК-МЕТИЗ». Разработана методика расчета задания на момент электродвигателя размоточного аппарата с целью поддержания натяжения в промежутке размоточный аппарат - клеть профилирования на заданном уровне. Разработана функциональная схема системы управления электроприводом размоточного аппарата и алгоритм расчета задания на момент электродвигателя размоточного аппарата, реализация которых позволит обеспечить требуемое качество профиля арматурной проволоки. Разработанный алгоритм управления электроприводом размоточного аппарата обеспечивает поддержание натяжения перед входом в клеть профилирования на заданном уровне при изменении радиуса заполнения катушки проволокой, диаметра проволоки и технологических условий изготовления арматуры.

Ключевые слова: арматура, глубина насечки, электропривод, размоточный аппарат, система управления, алгоритм.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из новейших технологических решений по производству высокопрочной стабилизированной арматуры для железобетонных шпал является со-

вмещение процессов нанесения насечки на проволоку и стабилизации механических свойств арматуры с применением наноструктурирования поверхности последней. Основным участком, где формируется

качество насечки арматурной проволоки, является участок размотки проволоки.

На рис. 1 приведена структурная схема оборудования и электропривода участка размотки проволоки стана ISF 5. Функционально электропривод размоточного аппарата в рабочем режиме производства арматуры формирует в проволоке натяжение F_p в промежутке размоточный аппарат 1 - клеть профилирования 3. Электроприводы кабестанов 6, 7 обеспечивают требуемую по технологии скорость обработки проволоки на стане (для диаметра проволоки d_1 скорость обработки проволоки $V_{ld1} = 200$ м/мин, для $d_2 - V_{ld2} = 70$ м/мин) [1].

Структурная схема участка размотки содержит: электродвигатели 8 размоточного аппарата, кабестанов 1, 2; преобразователи частоты (ПЧ) 9; контроллер Simatic S7 315-2DP 10 и панель управления 11 оператора Siemens OP 270. Задания на скорость обработки проволоки и величину момента электродвигателя размоточного аппарата задаются оператором в ручном режиме на панели управления 11 станом.

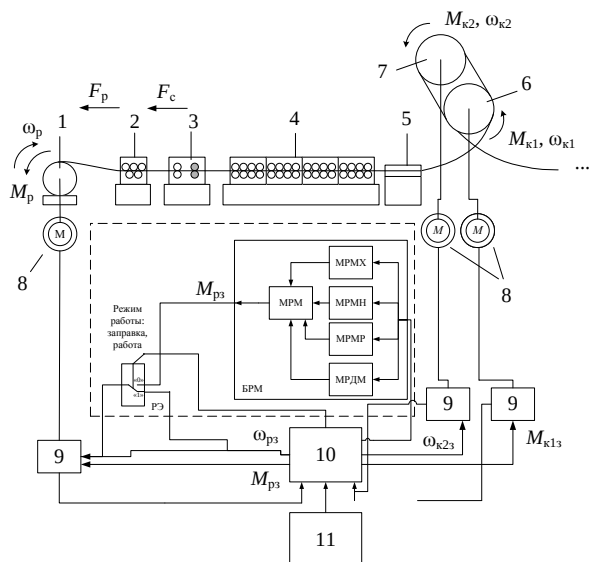


Рис. 1. Структурная схема участка размотки проволоки с катушки стана ISF 5:

1 – размоточный аппарат; 2 – роликовое правильное устройство; 3 – клеть профилирования; 4 – роликовое рихтовальное устройство; 5 – промывочная ванна; 6 – кабестан 1; 7 – кабестан 2; 8 – электродвигатели; 9 – преобразователи частоты; 10 – контроллер Simatic S7 315-2DP; 11 – панель оператора Siemens OP 270

Заданные значения передаются в контроллер 10 Simatic S7 315-2DP. Контроллер выдает задания на ПЧ 9 соответствующих узлов участка размотки стана ISF 5: на ПЧ размоточного аппарата и кабестана 1 в рабочем режиме задание на момент электродвигателей $M_{зр}$, $M_{зк1}$ соответственно; в заправочном - на угловую скорость вращения электродвигателей $\omega_{зр}$, $\omega_{зк1}$, $\omega_{зк2}$; на ПЧ кабестана 2 в рабочем и заправочном режимах задание на угловую скорость вращения электродвигателя кабестана 2 $\omega_{зк2}$ [2].

На рис. 2 изображена система управления электроприводом размоточного аппарата стана ISF

5. Система управления электроприводом включает в себя пульт оператора ПО, блок управления БУ, регулятор скорости РС, регулятор тока РТ, блок ограничения момента БОМ, преобразовательное устройство ПУ и асинхронный двигатель M с датчиком скорости ДС, датчик тока ДТ. В режиме «Работа» персоналом задаются на панели оператора (ПО) все основные настройки стана, которые передаются в блок управления (БУ) для последующей обработки. Сигнал задания на момент на выходе регулятора скорости (РС) поступает на блок ограничения момента (БОМ), где формируется задание на ток электродвигателя (M). Сигнал задания тока на выходе блока ограничения момента (БОМ) поступает на вход регулятора тока (РТ), где формируется управляющее воздействие на преобразовательное устройство (ПУ). На вход регулятора тока (РТ) также поступает сигнал с датчика тока (ДТ). В режиме «Заправка» обработанный сигнал задания на угловую скорость вращения электродвигателя размоточного аппарата, а также сигнал обратной связи по угловой скорости с датчика скорости (ДС) поступает на вход регулятора скорости, сигнал задания на момент электродвигателя не подается на вход блока ограничения момента (БОМ) и система работает в режиме поддержания скорости электродвигателя размоточного аппарата на заданном уровне.

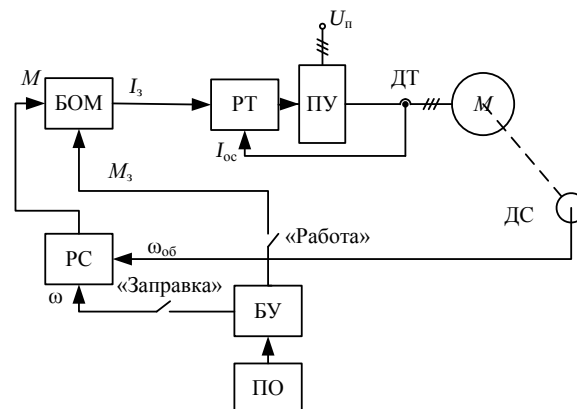


Рис. 2. Система управления электроприводом размоточного аппарата стана ISF 5:

ПО – пульт оператора; БУ – блок управления; РС – регулятор скорости; ДС – датчик скорости; БОМ – блок ограничения момента; РТ – регулятор тока; ДТ – датчик тока; ПУ – преобразовательное устройство; М – электродвигатель

В результате экспериментальных и теоретических исследований влияния параметров работы электроприводов стана ISF 5, установленного в ОАО «ММК-МЕТИЗ», на глубину насечки периодического профиля стальной арматуры было установлено:

– к электроприводам основных электроприводов стана по производству стальной арматуры предъявляются типовые технологические требования по обеспечению безаварийной работы станов по производству армированной проволоки с наноструктурированной поверхностью. Требования к электропри-

водам с позиции обеспечения требуемого качества насечки арматуры в автоматическом режиме отсутствуют;

– изменение величины момента на электродвигателе размоточного аппарата стана значимо влияет на изменение глубины насечки стальной арматуры, влиянием же величины натяжения в проволоке на участке между двумя группами кабестанов в зоне стабилизации механических свойств арматуры и взаимодействием указанных факторов можно пренебречь;

– в результате регрессионного анализа влияния величины натяжения в проволоке F_c на входе в клеть профилирования на изменение глубины насечки Δh были рассчитаны уравнения регрессии: $\Delta h = 0,027 - 0,008 \ln(F_c)$ для случая производства стальной арматуры диаметром $d_1 = 5$ мм; $\Delta h = 0,0467 - 0,009 \ln(F_c)$ для производства арматуры диаметром $d_2 = 9,98$ мм; доверительные интервалы указанных уравнений регрессии;

– определены интервалы допустимого изменения натяжения F_c для обеспечения глубины насечки в пределах допусков для диаметров проволоки d_1 и d_2 , а именно: для диаметра d_1 требуется поддержание натяжения F_c в пределах от 610 до 750 Н; для диаметра d_2 поддержание F_c в пределах от 261 до 700 Н; – сформулированы следующие дополнительные технологические требования:

1) в системе управления электроприводом размоточного аппарата должна быть предусмотрена возможность расчета требуемого по технологии натяжения между размоточным аппаратом и клетью профилирования.

Для реализации данного технологического требования необходимо разработать методику расчета целесообразного изменения момента электродвигателя размоточного аппарата с учетом изменения диаметра смотки проволоки с катушки барабана в целях стабилизации натяжения перед клетью профилирования;

2) в системе управления электроприводом размоточного аппарата должна быть предусмотрена возможность целесообразного изменения момента электродвигателя размоточного аппарата в целях поддержания натяжения в проволоке на входе в клеть профилирования в пределах допустимых значений [3-5].

– для технологических условий изготовления арматуры диаметром d_1 и d_2 на стане ISF 5 рассчитаны регрессионные уравнения изменения величины момента холостого хода M_{xx} при изменении угловой скорости вращения электродвигателя размоточного аппарата и радиуса R_k заполнения катушки проволокой:

для диаметра проволоки d_1

$$M'_{xx} = 0,012\omega_p + 19,04; \quad (1)$$

для диаметра проволоки d_2

$$M''_{xx} = 0,034\omega_p + 16,94. \quad (2)$$

АКТУАЛЬНОСТЬ

Практическая реализация указанных новых технологических требований к электроприводу размоточного аппарата позволит улучшить качество стальной арматуры для производства железнодорожных шпал в части обеспечения изменения глубины насечки на проволоке в пределах допусков в автоматическом режиме непосредственно в рабочем процессе ее изготовления.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В работе поставлена задача разработки функциональной схемы и алгоритма системы управления электроприводом размоточного аппарата, реализующих в автоматическом режиме новые технологические требования.

ТЕХНИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

С целью определения значимости изменения натяжения проволоки в промежутке размоточный аппарат – клеть профилирования при изменении радиуса R_k заполнения катушки проволокой на стане ISF 5 выполнены следующие исследования:

1. По экспериментальным данным построены графики зависимости изменения величины момента M_p в функции изменения радиуса R_k в существующей системе управления для различных уровней задания на величину момента электродвигателя размоточного аппарата в диапазоне $(0,2-0,7)M_{pn}$ (рис. 3).

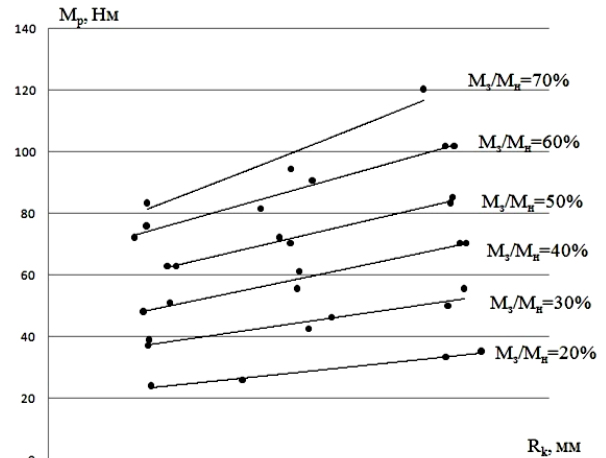


Рис. 3. Экспериментальная зависимость момента электродвигателя размоточного аппарата M_p от радиуса R_k заполнения катушки проволокой размоточного аппарата для диаметров проволоки d_1 и d_2

2. С целью определения эффективности работы существующей на стане ISF 5 системы управления электроприводом размоточного аппарата по стабилизации натяжения в промежутке размоточный аппарат – клеть профилирования при изменении радиуса R_k заполнения катушки по экспериментальным графикам $M_p = f(R_k)$ (см. рис. 3) были рассчитаны изменения натяжения перед входом в клеть профилирования $F_c = f(R_k)$ отдельно для диаметров про-

волокни d_1 и d_2 (рис. 4).

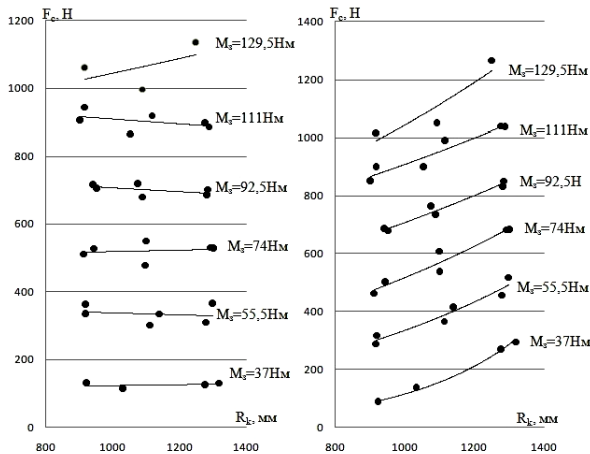


Рис. 4. Экспериментальная зависимость $F_c = f(R_k)$:
а – для диаметра проволоки d_1 ; б – для диаметра проволоки d_2

На основании графиков рис. 4 можно сделать следующие выводы: существующая система управления не обеспечивает стабилизацию величины натяжения перед входом в клеть профилирования F_c при изменении радиуса заполнения катушки на размотке R_k при изготовлении арматуры диаметром d_2 ; существующая система управления не учитывает изменение диаметра d_n обрабатываемой проволоки.

В связи с тем, что в процессе размотки проволоки с катушки изменяются $M_{xx} = f(\omega_p) = f(R_k)$, $M_{нат} = f(R_k)$, $M_r = f(R_k)$, $\omega_p = f(R_k)$, при построении системы стабилизации натяжения перед входом в клеть профилирования необходимо учитывать изменение составляющих от общего момента электродвигателя M_{xx} , $M_{нат}$, M_r [6].

На основании вышесказанного, с целью стабилизации натяжения проволоки перед входом в клеть профилирования была разработана следующая методика расчета целесообразного изменения момента электродвигателя размоточного аппарата при изменении радиуса заполнения катушки R_k :

1. Для рабочей скорости V_l обработки проволоки на стане рассчитывается угловая скорость ω_p электродвигателя размоточного аппарата

$$\omega_p = \frac{i_p \cdot V_l}{R_k}, \quad (3)$$

где i_p – передаточное число редуктора размоточного аппарата.

2. Радиус заполнения катушки проволокой R_k рассчитывается в существующей системе управления станом по формуле

$$R_k = \frac{\omega_{kab2} \cdot R_{k_{coef}}}{\omega_p}, \quad (4)$$

где ω_{kab2} – угловая скорость электродвигателя кабестана 2, об/мин; $R_{k_{coef}}$ – коэффициент смотки материала с катушки, мм.

3. По экспериментальным зависимостям (1) или (2) для диаметра обрабатываемой проволоки d_n и угловой скорости электродвигателя размоточного аппарата ω_p определяется текущая величина момента холостого хода M_{xx} электропривода размоточного аппарата.

4. Выполняется расчет составляющей момента двигателя размоточного аппарата, необходимой для разгиба проволоки с катушки [7]

$$M_r = \frac{S_n}{i_p} \cdot \left(\frac{\sigma_T \cdot d_n}{4} - \frac{\sigma_T^3 \cdot R_k^2}{3 \cdot E_n^2 \cdot d_n} \right), \quad (5)$$

где S_n – площадь поперечного сечения проволоки, m^2 ; σ_T – предел текучести проволоки-заготовки, H/m^2 ; d_n – диаметр проволоки-заготовки, m ; R_k – радиус заполнения катушки проволокой, m ; E_n – модуль упругости Юнга, H/m^2 .

5. Выполняется расчет усилия протягивания проволоки через правильные ролики по методике А. Л. Тарнавского [8].

Угол обхвата катанкой ролика ρ

$$\rho = \frac{1}{2} (d_n + D), \quad (6)$$

где D – диаметр ролика, m .

Усилие протягивания проволоки через n роликов рассчитывается по формуле

$$F_q = 1,36 \left(3 - \left(\frac{(\rho + r_n) \sigma_T}{r_n \cdot E_n} \right)^2 \right) \times \times \frac{\sigma_T \cdot d_n^3}{z} \cdot \left(1 + f \frac{R_1}{R} \right) \cdot \frac{n-1}{2}, \quad (7)$$

где r_n – радиус проволоки-заготовки, m ; z – расстояние между осями первого и последнего роликов, m ; f – коэффициент трения сталь-сталь; R_1 – радиус цапфы ролика, m ; R – радиус ролика, m ; n – количество роликов.

6. Согласно полученным в [1] зависимостям $\Delta h = f(F_c)$ определяется натяжение F_c перед входом в клеть профилирования для минимизации отклонения глубины насечки Δh .

7. Выполняется расчет натяжения проволоки в промежуток размоточный аппарат – правильные ролики:

$$F_p = F_c - F_q. \quad (8)$$

8. Выполняется расчет составляющей момента, идущей на создание натяжения проволоки в промежуток размоточный аппарат – правильные ролики:

$$M_{pa} = \frac{F_p \cdot R_k}{i_p}. \quad (9)$$

9. Выполняется расчет величины статического

момента на валу электродвигателя размоточного аппарата:

$$M_{p_c} = M_{p_a} - M_{xx} - M_r. \quad (10)$$

10. Выполняется расчет приведенного к валу момента инерции [6]:

$$J_{\Sigma} = J_0 + \frac{1}{2i_p} \cdot \pi \cdot b \cdot q \cdot (R_k^2 - R_{k_{\min}}^2), \quad (11)$$

где J_0 – постоянная составляющая момента инерции приведенная к валу двигателя; $R_{k_{\min}}$ – минимальный радиус заполнения катушки проволокой, м; b – ширина мотка в катушке, м; q – удельный вес материала, кг/м².

11. Выполняется расчет динамического момента на валу электродвигателя размоточного аппарата:

$$M_{p_{\text{дин}}} = \frac{i_p \cdot J_{\Sigma}}{R_k} \cdot \frac{dV_l}{dt} + \frac{V_l \cdot i_p \cdot J_{\Sigma}}{R_k^2} \cdot \frac{dR_k}{dt} + \frac{\omega_p}{2} \cdot \frac{dJ_{\Sigma}}{dt}. \quad (12)$$

12. Рассчитывается величина общего момента электродвигателя размоточного аппарата:

$$M_{p_{\Sigma}} = M_{p_c} + M_{p_{\text{дин}}}. \quad (13)$$

Проведенные исследования позволили разработать систему управления электроприводом размоточного аппарата стана по производству стальной арматуры. Блок - схема системы управления электроприводом размоточного аппарата изображена на **рис. 1**.

Дополнительно в существующую систему управления включен блок расчета момента (БРМ) перед входом в клеть профилирования, который состоит из пяти функциональных модулей: модуля расчета момента холостого хода (МРМХ); модуля расчета момента разгиба (МРМР); модуля расчета момента, необходимого для создания натяжения (МРМН); модуля расчета динамического момента (МРДМ); модуля расчета момента размоточного аппарата (МРМ) и релейного элемента (РЭ).

В нормальном режиме работы стана управление электроприводом размоточного аппарата производится от блока расчета момента БРМ. Диаметр проволоки, параметры правильного устройства и другие технологические условия производства арматуры вводятся оператором на панели оператора ОР 270 стана ISF 5.

При задании диаметра проволоки и технологических условий производства арматуры на панели оператора заданные значения передаются в модули блока расчета момента БРМ. По разработанной ме-

тодике в блоках МРМХ, МРМР, МРМН и МРМД рассчитываются составляющие задания на момент электродвигателя размоточного аппарата. В модуле МРМ происходит суммирование всех составляющих момента согласно п. 9, 12 разработанной методики. Радиус заполнения катушки проволокой рассчитывается в контроллере стана по алгоритму, разработанному фирмой Mario Frigerio S.p.a.

В заправочном режиме работы стана входы релейных элементов РЭ переключены в положение «1», и управление электроприводом размоточного аппарата осуществляется от штатной АСУ ТП. При запуске стана в нормальном режиме работы управление электроприводом размоточного аппарата стана для производства арматуры ISF5 передается блоку БРМ путем переключения релейного элемента РЭ в положение «0».

После смотки проволоки с катушки размоточного аппарата происходит автоматическая остановка стана для замены катушки и сварки конца проволоки. В связи с этим происходит перевод стана в заправочный режим работы. РЭ переключается в положение «1», в результате чего управление электроприводом размоточного аппарата вновь передается АСУ ТП стана. После окончания сварки проволоки подготовка размоточного аппарата завершается нажатием кнопки «Пуск» на пульте управления размоточным аппаратом, РЭ переключается в положение «0», управление размоточным аппаратом передается разработанному алгоритму.

Алгоритм управления электроприводом размоточного аппарата линии по производству арматуры предложено реализовать в существующем микропроцессорном контроллере Simatic S7 315 - 2DP. Данный алгоритм реализован в блоке БРМ системы управления электроприводом размоточного аппарата стана (**рис. 1**, пунктирная линия).

Разработанный алгоритм (см. **рис. 5**) позволяет осуществлять управление электроприводом размоточного аппарата в рабочем режиме производства стальной арматуры. При этом размоточный аппарат работает в режиме автоматической стабилизации натяжения между размоточным аппаратом и клетью профилирования. Управление электроприводами кабестанов 1, 2, 3, 4, индукционной печи, тянущих роликов, намоточных аппаратов и отрезного станка по-прежнему осуществляется по заданию АСУ ТП стана.

Предложенная функциональная схема и алгоритм системы управления электроприводом размоточного аппарата позволяют поддерживать на заданном уровне натяжение в промежутке размоточный аппарат – клеть профилирования путем изменения момента на электродвигателе размоточного аппарата при изменении радиуса заполнения катушки с целью обеспечения качества профиля.

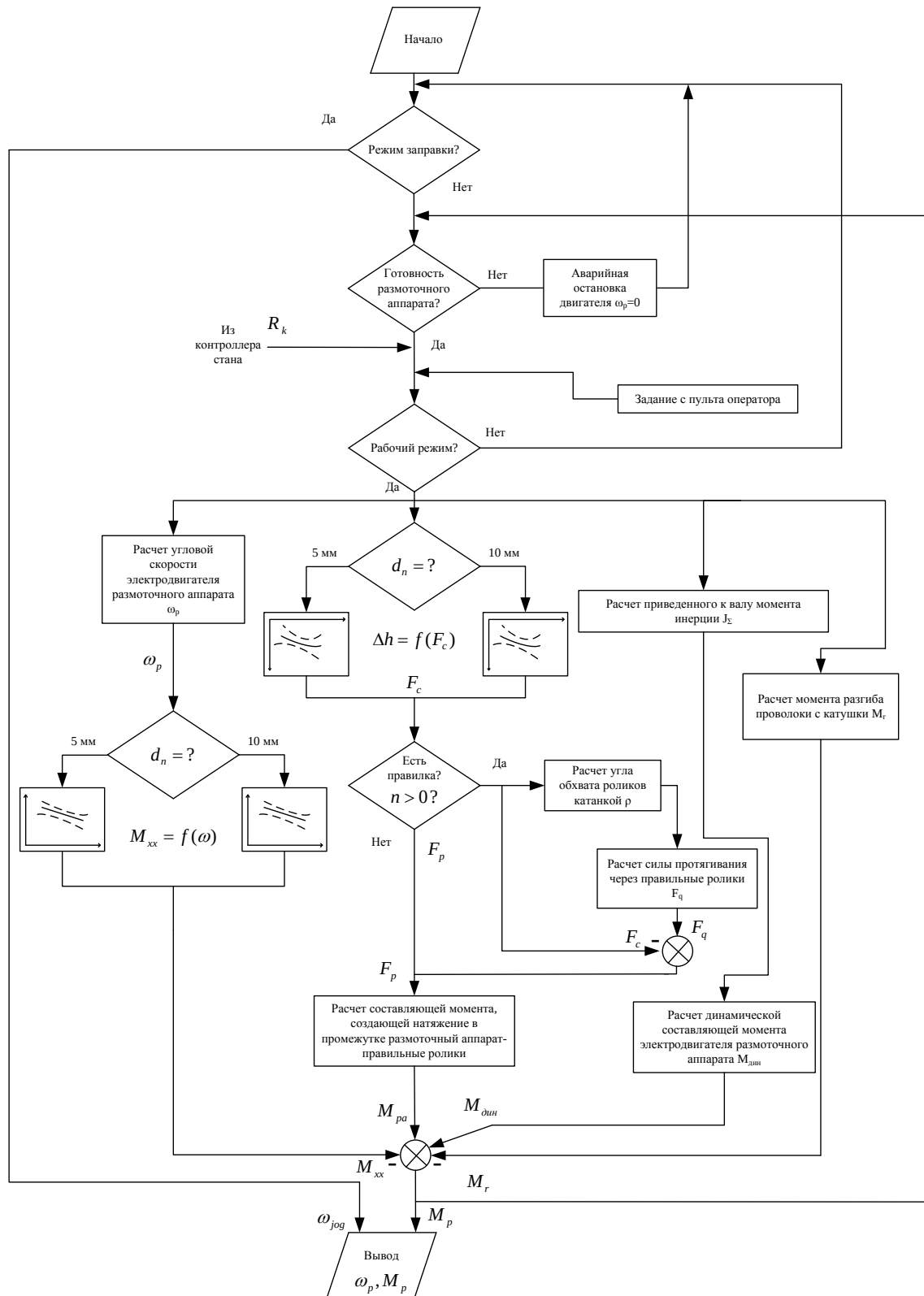


Рис. 5. Графическое представление алгоритма расчета задания на момент электропривода размоточного аппарата стана ISF 5

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сафин И.Р., Лукьянов С.И., Бодров Е.Э. Исследование влияния параметров настройки электроприводов стана ISF5 на качество продукции // Электротехнические системы и комплексы: междунар. сб. науч. тр. / под ред. Г.П. Корнилова, Е.А. Пановой. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им Г.И. Носова, 2013. Вып. 21. С. 33-40.
2. PC WIRE LINE ISF5]: док. к обобщению: Mario Frigerio S.p.A, 2006. 166 с.
3. Сафин И.Р. Разработка системы управления натяжением размоточного аппарата линии по производству арматурной стали с целью повышения качества продукции // Материалы докладов IX Международной молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения» / под общ. ред. ректора КГЭУ Э.Ю. Абдуллазянова. Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2014. Т.1. С. 400-401.
4. Сафин И.Р., Лукьянов С.И., Бодров Е.Э. Разработка математической модели очага деформации роликовой

клетки профилирования стана ISF 5 сталепроволочно-канатного цеха ОАО «ММК-МЕТИЗ» // Интеллектуальные энергосистемы: труды I Международного молодежного форума: Т.2. Материалы I Международного форума «Интеллектуальные энергосистемы». 2013. С.190 - 194.

5. Лукьянов С.И. Панов А.Н., Васильев А.Е. Основы инженерного эксперимента: учеб. пособие. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2006. 94 с.

6. Радионов А.А., Карандаев А.С. Автоматизированный электропривод намоточно-размоточных устройств агрегатов прокатного производства. Магнитогорск: МГТУ, 1999. 131 с.

7. Радионов А.А. Автоматизированный электропривод станов для производства стальной проволоки: монография. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2007. 311 с.

8. Тарнавский А.Л. Силовые условия волочения с использованием роликовых окалиноломателей // Сталь. 1965. №2. С. 182-184.

INFORMATION IN ENGLISH

CONTROL SYSTEM OF LAYOUT MACHINE ELECTRIC DRIVE OF MILL MAN-UFACTURING STEEL REINFORCEMENT

Safin I.R., Lukyanov S.I., Bodrov E.E.

Results of experimental and theoretical studies and the application of the developed technology requirements for the layout machine electric drive of the mill ISF 5 OJSC "MMK-METIZ" are given. A method of calculating the set value for torque of the layout machine electric drive in order to maintain tension between the layout machine and the shaping stand at a given level was developed. The authors developed a functional diagram and an algorithm of layout machine electric drive control system for calculating of set value for torque, which make it possible to ensure the required quality of the reinforcing wire profile. The developed algorithm of the layout machine electric drive control system maintains tension before the shaping stand at a given level when the radius of the wire coil changes, controls wire diameter and technological conditions of reinforcement production.

Keywords: reinforcement, depth of cuts, electric drive, layout machine, control system, algorithm.

REFERENCES

1. Safin I.R., Lukyanov S.I., Bodrov E.E. *Issledovanie vliyaniya parametrov nastroyki elektroprivodov stana ISF 5 na kachestvo produkcyi* [Research of the electric drive settings influence on product quality at ISF5 production line] // *Elektrotekhnicheskie komplekxy I sistemy* [Electro technical complexes and systems]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2013, vol. 21, pp. 33-40.
2. PC WIRE LINE ISF5, Italia, Mario Frigerio S.p.A, 2006. 166 p.
3. Safin I.R. *Razrabotka sistemy upravleniya natyazheniem razmotochnogo apparata linii po proizvodstvu armaturnoy stali s tselyu povysheniya kachestva produkcyi*

[Development of tension control system of layout machine for production of reinforcing steel in order to improve product quality]. Proceedings of the IX International Youth Conference "Tinchurin's reading". Kazan, KGEU, 2014, vol. 1, pp. 400-401.

4. Safin I.R., Lukyanov S.I., Bodrov E.E. *Razrabotka matematicheskoy modeli ochaga deformatsyi rolikovoy kleti profilirovaniya stana ISF 5 staleprovolочно-kanatnogo ceha OJSC "MMK-METIZ"* [Development of a mathematical model of deformation zone of roller cage profiling mill ISF 5 steel wire rope plant OJSC "MMK-METIZ"]. Intellectual energy system: proceedings of the I International Youth Forum, 2013, vol. 2, pp. 190-194.

5. Lukyanov S.I., Panov A.N., Vasilev A.E. *Osnovy inzhenernogo eksperimenta* [Basics of the engineering experiment]. Magnitogorsk, MGTU, 2006. 94 p.

6. Radionov A.A., Karandaev A.S. [Avtomatizirovanny elektropriwod namotochno-razmotochnykh ustroystv agregatov prokatnogo proizvodstva] Automated electric drive of winding – unwinding devices at rolling aggregates. Magnitogorsk, Nosov Magnitogorsk State Technical University, 1999, 131 p.

7. Radionov A.A. *Avtomatizirovanny elektropriwod stanov dlya proizvodstva stalnoy provoloki* [Automated electric drive of steel wire production lines]. Magnitogorsk, Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2007, 311 p.

8. Tarnavskiy A.L. *Silovye usloviya volocheniya s ispolzovaniem rolikovykh okalinolomateley* [Strength terms of drawing process with roller descaling]. *Stal* [Steel], 1965, no.2, pp. 182-184.

Андрюшин И.Ю., Шубин А.Г., Гостев А.Н.

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ВЗАИМОСВЯЗАННЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ЧЕРНОВОЙ ГРУППЫ ПРОКАТНОГО СТАНА

Дана характеристика электроприводов непрерывной подгруппы черновой группы стана 2000 ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат». Представлена структура модели взаимосвязанных электромеханических систем двух межклетевых промежутков. Рассмотрены математическая модель силовой части электропривода клетки и модель прокатываемой полосы как объекта управления. Отмечены особенности моделирования системы автоматического регулирования нулевого натяжения. Дана оценка адекватности математической модели исследуемому объекту. С этой целью выполнено моделирование переходных процессов, зафиксированных при прокатке полосы путем прямого осциллографирования на стане. Показано, что в большинстве характерных точек относительная погрешность результатов менее 5%, поэтому является допустимой. Отмечена целесообразность использования модели для исследования алгоритмов согласования скоростных режимов и ограничения ударных нагрузок в горизонтальных и вертикальных валках универсальных клеток.

Ключевые слова: широкополосный стан горячей прокатки, непрерывная группа клеток, электромеханические системы, взаимосвязь, натяжение, математическая модель, разработка, адекватность.

ВВЕДЕНИЕ

При расширении сортамента полос, производимых на широкополосных станах горячей прокатки (ШСП), значительное внимание уделяется совершенствованию электротехнических систем: автоматизированных электроприводов и систем автоматического регулирования технологических параметров [1–4]. В работах [5–7] представлены разработки, направленные на совершенствование взаимосвязанных электротехнических систем чистовой группы ШСП. Вопросы, связанные с разработкой электроприводов и систем управления непрерывной подгруппы черновой группы, не исследовались. В современных публикациях других авторов информация о подобных исследованиях и разработках также практически отсутствует.

Вместе с тем точность геометрических размеров проката на выходе черновой группы оказывает значительное влияние на размерную точность полосы на выходе стана. Значительное влияние на геометрические размеры проката оказывает точность поддержания натяжения, близкого к нулевому, в межклетевых промежутках непрерывной подгруппы [8, 9]. Кроме того, недостаточно изучены вопросы возникновения мгновенного подпора и повторных колебательных процессов в электромеханических системах вертикальных валков универсальных клеток при захвате полосы горизонтальными валками [10, 11].

Перечисленные вопросы требуют проведения всесторонних исследований. Пассивные эксперименты на действующем прокатном стане, в связи с их ограниченностью, не обеспечивают возможности получения необходимых результатов. Оптимальным способом исследования сложных систем является математическое моделирование. С этой целью разработана математическая модель взаимосвязанных электромеханических систем непрерывной под-

группы стана 2000 ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (ОАО «ММК»), описание которой представлено ниже.

ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА

На **рис. 1** показан фрагмент технологической линии стана 2000: непрерывная подгруппа черновой группы универсальных клеток № 4–6. Универсальные клетки содержат приводные вертикальные валки (двигатели $D_{4в}$ – $D_{6в}$) и горизонтальные валки, приводимые двигателями $D_{4г}$ – $D_{6г}$, взаимосвязанные в процессе прокатки через обрабатываемую полосу [12].

Клетки оснащены автоматизированными электроприводами постоянного тока. Клеть №4 имеет привод горизонтальных валков от двух электродвигателей мощностью 2×8200 кВт (125/250 об/мин) через общий редуктор и шестеренную клетку. Электропривод вертикальных валков мощностью 2×150 кВт (490 об/мин) также выполнен с общим редуктором. Валки клетки №5 имеют аналогичные электроприводы, отличающиеся только передаточными числами редукторов. Клеть №6 имеет безредукторный привод горизонтальных валков от двухъякорного электродвигателя мощностью 2×7200 кВт (50/100 об/мин) и привод вертикальных валков аналогичный приводу клеток №4 и 5.

В настоящее время в составе системы автоматического управления черновой группой функционирует система автоматического регулирования нулевого натяжения (САРНН) [13]. Она представляет собой управляющую программу, загруженную в контроллер АСУ ТП, который задает скоростные режимы главных электроприводов клеток этой группы. САРНН поддерживает заданное натяжение полосы между 4-й и 5-й клетями, изменяя скорость 4-й клетки, а натяжение между клетями №5 и 6 регулируется изменением скорости 6-й клетки. На скорость 5-й клетки САРНН влияния не оказывает.

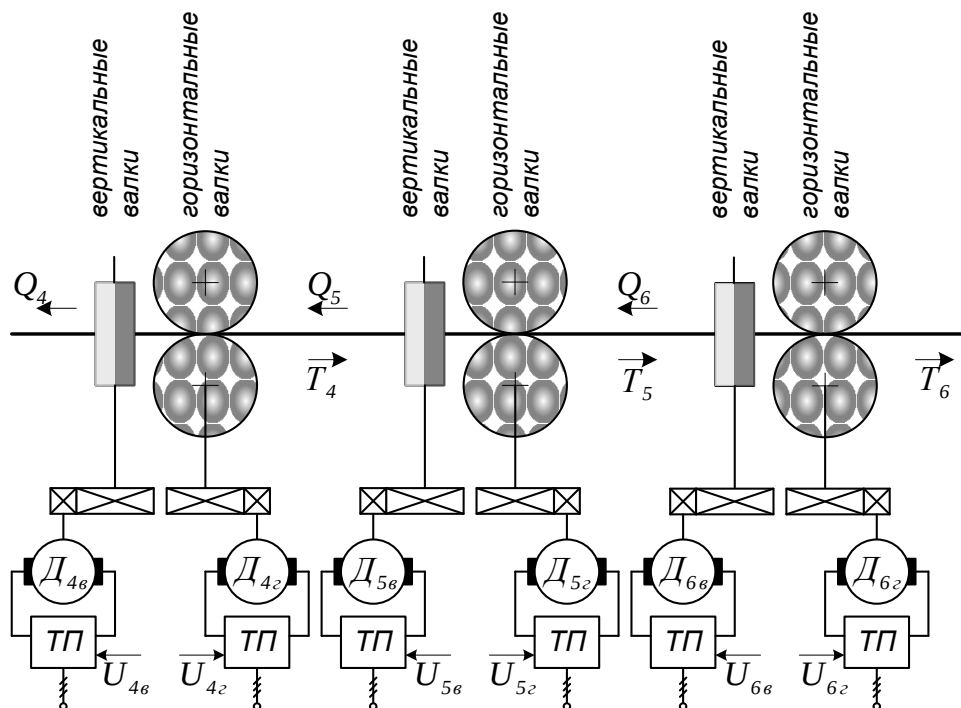


Рис. 1. Схема непрерывной трехклетевой прокатной группы

СТРУКТУРА МОДЕЛИ ВЗАИМОСВЯЗАННЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДВУХ МЕЖКЛЕТЕВЫХ ПРОМЕЖУТКОВ ЧЕРНОВОЙ ГРУППЫ СТАНА 2000

Структурная схема комплексной математической модели взаимосвязанных электромеханических систем трехклетевой группы представлена на рис. 2. Структура содержит модели электроприводов (ЭП) вертикальных (ВВ) и горизонтальных валков (ГВ) клеток №4, 5, 6 и модели полосы как объекта управления.

Модель полосы представлена блоками «Очаг деформации в валках i -й клетки», содержащими математическое описание изменения давления и момента прокатки. В нее также входят блоки «Межклетевой промежуток $i-1-i$ » и «Промежуток i -й клетки», включающие математическое описание упругих свойств полосы между горизонтальными валками смежных клеток и вертикальными и горизонтальными валками одной универсальной клетки. Как будет показано ниже, свойства полосы в этих промежутках описываются одинаковыми аналитическими зависимостями.

Модель имеет входные воздействия в виде напряжений управления на входах тиристорных электроприводов и шесть выходных координат: скорости полосы на выходе из вертикальных и горизонтальных валков, натяжения либо подпор в межклетевых промежутках и два возмущающих воздействия: заднее натяжение в первом очаге и переднее натяжение в последнем очаге деформации непрерывной подгруппы. В структуре модели содержатся логически связанные объекты, которые должны иметь входные и выходные координаты, согласующиеся между собой в количественных соотношениях.

Расшифровка обозначений, принятых на **рис. 2**,

приводится ниже при описании математических моделей объектов регулирования. Модель реализована в программной среде Simulink, являющейся приложением пакета MATLAB.

ДОПУЩЕНИЯ, ПРИНЯТЫЕ ПРИ МАТЕМАТИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

Силовая часть электропривода постоянного тока с питанием обмотки якоря от тиристорного преобразователя представляет собой электромеханическую систему, при математическом моделировании которой используется ряд допущений [5]:

- тиристорный преобразователь рассматривается как управляемый эквивалентный генератор ЭДС с внутренним активным сопротивлением и внутренней индуктивностью, не зависящими от нагрузки преобразователя; ток двигателя считается непрерывным; пульсирующие составляющие ЭДС и тока двигателя не учитываются; полезная ЭДС преобразователя пропорциональна управляющему воздействию на входе его системы управления. Таким образом, тиристорный преобразователь совместно с системой импульсно-фазового управления рассматривается как апериодическое звено первого порядка, коэффициент которого равен коэффициенту усиления тиристорного преобразователя;
- приводные двигатели горизонтальных и вертикальных валков моделируются нагрузкой с противо-ЭДС, внутренними активными сопротивлениями и индуктивностями, не зависящими от нагрузки; влияние реакции якоря двигателя на возбуждение, а также действие вихревых токов не учитываются;
- механическая часть рассматривается как абсолютно жесткая приведенная одностепенная система с постоянной величиной момента инерции.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИЛОВОЙ ЧАСТИ
ЭЛЕКТРОПРИВОДА КЛЕТИ

Модель каждого межклетевого промежутка включает модели электроприводов горизонтальных и вертикальных валков в замкнутой двухконтурной системе однозонного регулирования скорости. Поскольку структуры и настройки систем управления этих электроприводов взаимно идентичны, ниже приводится описание модели якорной цепи, общей для обеих групп электроприводов.

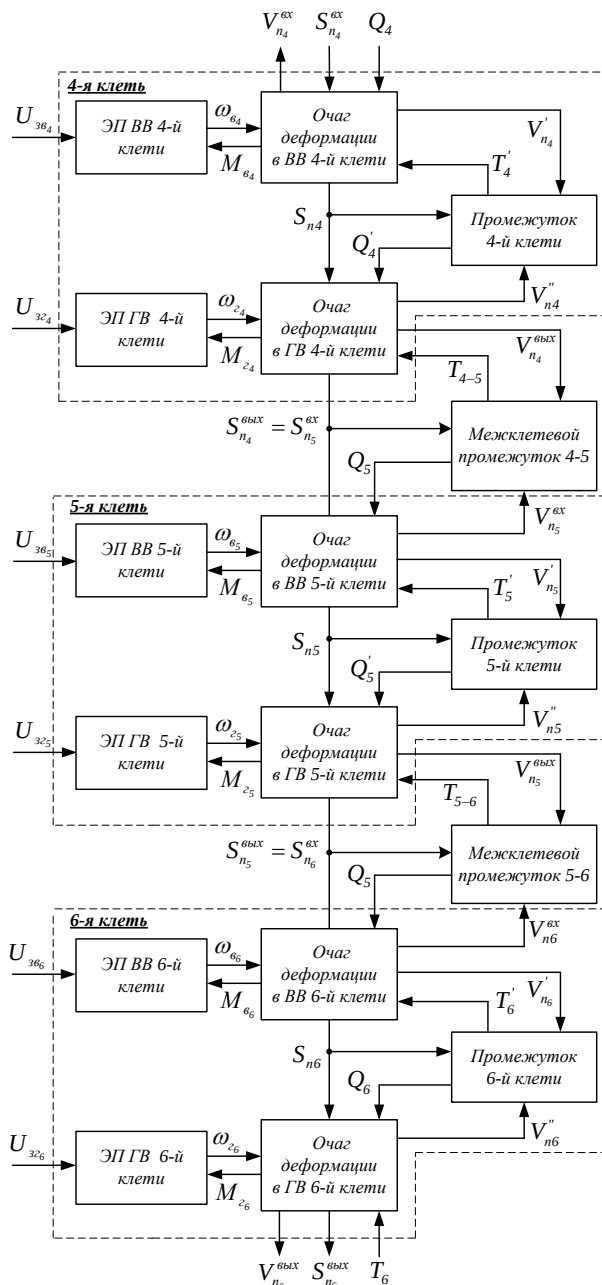


Рис. 2. Структурная схема математической модели взаимосвязанных электроприводов клеток №4-6 стана 2000

При принятых выше допущениях математическая модель якорной цепи электропривода описывается известной системой операторных уравнений [14]:

$$\begin{cases} E_{di} = \frac{\kappa_{тп i}}{T_{\mu i} p + 1} u_{yi}; \\ E_{di} = E_{дв i} + R_{\Sigma i} I_{\Sigma i} (T_{\Sigma i} p + 1); \\ M_i = \kappa \Phi_{\Sigma i} I_{\Sigma i}; \\ E_{дв i} = \kappa \Phi_{\Sigma i} \omega_i; \\ M_i - M_{ci} = J_{\Sigma i} p \omega_i. \end{cases} \quad (1)$$

где E_d и $E_{дв}$ – ЭДС тиристорного преобразователя (ТП) и двигателя; $\kappa_{тп}$ и T_{μ} – коэффициент усиления и постоянная времени ТП; u_y – напряжение управления ТП; R_{Σ} и T_{Σ} – эквивалентные активное сопротивление и постоянная времени якорной цепи; M и M_c – моменты двигателя и статических сопротивлений, приведенные к валу двигателя; I_{Σ} – ток якорной цепи; J_{Σ} – суммарный момент инерции, приведенный к валу двигателя; $p = d/dt$ – оператор дифференцирования по времени; i – порядковый номер клетки.

Структурная схема математической модели силовой части электропривода горизонтальных либо вертикальных валков, соответствующая системе уравнений (1), представлена на рис. 3. На схеме показаны каналы обратных связей по якорному току и скорости, предназначенные для подключения соответствующих сигналов в двухконтурной системе регулирования скорости с внутренним контуром тока.

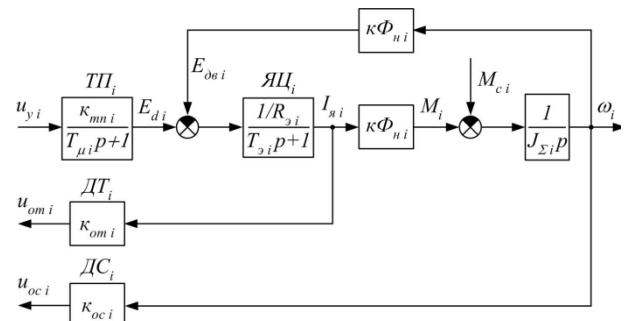


Рис. 3. Математическая модель силовой части электропривода как объекта управления:

ТП – тиристорный преобразователь; ЯЦ – якорная цепь;
ДТ – датчик тока; ДС – датчик скорости;
 $\kappa_{от}$, $\kappa_{ос}$ – коэффициенты датчиков

Синтез регуляторов тока и скорости для каждого электропривода выполнен по известной методике синтеза систем подчиненного регулирования [15].

ОПИСАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОКАТЫВАЕМОЙ ПОЛОСЫ КАК ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ

Взаимосвязь между электроприводами описывается следующими моделями [16–18]:

- прокатываемой полосы в межклетевом промежутке на основе зависимостей, предложенных Н.Н. Дружининым и Д.П. Морозовым;
- момента прокатки, в основу которой положены зависимости, предложенные А.И. Целиковым и А.А.

Королевым;

– опережения и отставания, основанной на формуле Дрездена.

Изменение свойств полосы на участках между очагами деформации поясняется с помощью **рис. 4**. Вследствие несоответствия мгновенных значений скоростей выхода полосы из предыдущей и входа в последующую клетки возникает натяжение (подпор). Под действием этих сил полоса упруго деформируется: при натяжении – удлиняется и утончается; при подпоре – укорачивается и уширяется. При этом упругая деформация может быть описана интегральными уравнениями [19]:

$$T_i = \frac{E \cdot S_{n_i}^{БВХ}}{L_{T_i}} \cdot \int_0^t (V_{n_{(i+1)}}^{БВХ} - V_{n_i}^{БВХ}) \cdot dt - T_{нач_i}; \quad (2)$$

$$Q_i = \frac{E \cdot S_{n_i}^{БВХ}}{L_{Q_i}} \cdot \int_0^t (V_{n_i}^{БВХ} - V_{n_{(i-1)}}^{БВХ}) \cdot dt - Q_{нач_i}, \quad (3)$$

где E_i – модуль упругости; $S_{n_i}^{БВХ}$, $S_{n_i}^{ВЫХ}$ – площади поперечного сечения полосы на входе и выходе i -ого очага деформации; L_{T_i} , L_{Q_i} – длины участков полосы, на которых действуют силы T_i и Q_i ; $T_{нач_i}$, $Q_{нач_i}$ – начальные переднее и заднее натяжения.

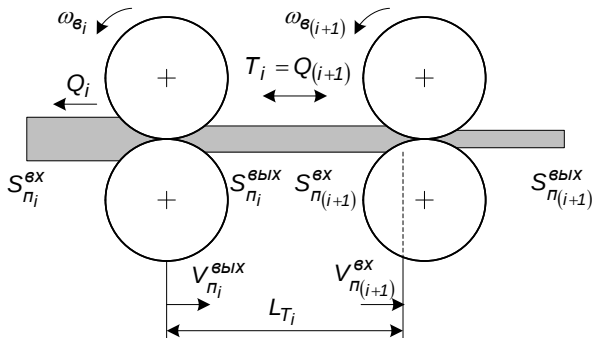


Рис. 4. Расчетная схема межклетевого промежутка

Дифференцируя зависимости (2), (3)

$$\frac{dT_i}{dt} = \frac{E_i \cdot S_{n_i}^{БВХ}}{L_{T_i}} \cdot (V_{n_{(i+1)}}^{БВХ} - V_{n_i}^{БВХ});$$

$$\frac{Q_i}{dt} = \frac{E_i \cdot S_{n_i}^{БВХ}}{L_{Q_i}} \cdot (V_{n_i}^{БВХ} - V_{n_{(i-1)}}^{БВХ})$$

и переходя к операторным изображениям, получаем

$$p \cdot T_i(p) = \frac{E \cdot S_{n_i}^{БВХ}}{L_{T_i}} \cdot (V_{n_{(i+1)}}^{БВХ} - V_{n_i}^{БВХ}); \quad (4)$$

$$p \cdot Q_i(p) = \frac{E \cdot S_{n_i}^{БВХ}}{L_{Q_i}} \cdot (V_{n_i}^{БВХ} - V_{n_{(i-1)}}^{БВХ}). \quad (5)$$

Согласно (4), (5) в условиях свободной прокат-

ки $T_i = Q_{(i+1)}$. При возникновении натяжения $T_i = Q_{(i+1)} > 0$, при подпоре $T_i = Q_{(i+1)} < 0$.

Влияние вертикальных валков на процесс формирования межклетевого натяжения и подпора значимо, но невелико, поскольку мощность установленных электродвигателей составляет 150 кВт, что меньше мощности двигателей приводов горизонтальных валков более чем в 50 раз. Поэтому влияние на натяжение (подпор) от несогласованности окружной скорости вертикальных валков может быть учтено выражением

$$\Delta T_i = \Delta Q_{(i+1)} = \frac{M_{в3} - M_{хх3} - M_{деф3}}{R_{в3}}, \quad (6)$$

где $M_{в3}$ – момент на бочке вертикального вала (эджера); $M_{хх3}$ – момент холостого хода; $M_{деф3}$ – момент, необходимый для деформации металла в вертикальных валках; $R_{в3}$ – радиус вертикальных валков.

На **рис. 5** приведена структурная схема динамической модели межклетевого промежутка прокатного блока, составленная на основе уравнений (4)–(6). Она наглядно представляет взаимосвязь между тремя входными, одной выходной координатами и одним возмущающим воздействием.

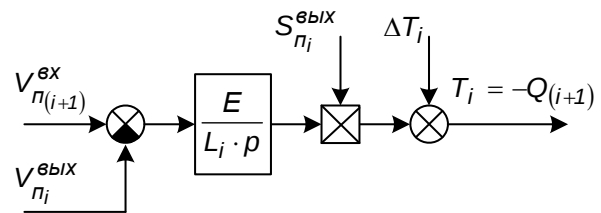


Рис. 5. Структурная схема математической модели межклетевого промежутка

Моделирование системы автоматического регулирования нулевого натяжения выполнено упрощенно. Для этого в модель введены сигналы, пропорциональные натяжениям в межклетевых промежутках, рассчитанные по статическим токам двигателей валков горизонтальных клеток (на **рис. 2** не показаны). При этом влияние вертикальных валков на натяжение не учитывается. Такое допущение обосновано ранее при экспериментальных исследованиях, результаты которых представлены в [20]. В реальных условиях величина натяжения вычисляется по сигналу давления, поступающему от месдоз, установленных под подушками опорных валков, при этом вычисляется плечо прокатки [9]. Принятый вариант вычисления позволяет упростить модель и повышает точность определения натяжения.

ОЦЕНКА АДЕКВАТНОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Адекватность разработанной математической модели исследуемому объекту исследовалась путем сравнения переходных процессов координат элек-

троприводов и параметров прокатки, полученных при моделировании и осциллографировании на стане.

При моделировании приняты параметры прокатки полосы из сляба шириной 1600 мм, марка стали 08Ю, экспериментальное исследование прокатки которого проводилось на стане. Толщина полосы на входе в клету №4 – 120 мм, обжатие в клету №4 – 40 мм (33%), в клету №5 – 30 мм (38%), в клету №6 – 20 мм (40%). Скорости полосы при свободной прокатке на выходе клету №4, 5 и 6: 1,05, 1,91 и 3,66 м/с соответственно [21].

Характерные осциллограммы переходных про-

цессов, полученные экспериментальным путем для электроприводов вертикальных и горизонтальных валков клету №4, представлены на **рис. 6, а** и **7, а** соответственно. На **рис. 6, б** и **7, б** показаны аналогичные переходные процессы, полученные расчетным путем с использованием разработанной математической модели. На осциллограммах и расчетных кривых указаны фиксированные параметры (маркеры), по которым производилось сравнение данных в характерных точках. Для других параметров электромеханических систем межклетевого промежутка адекватность оценивалась аналогично.

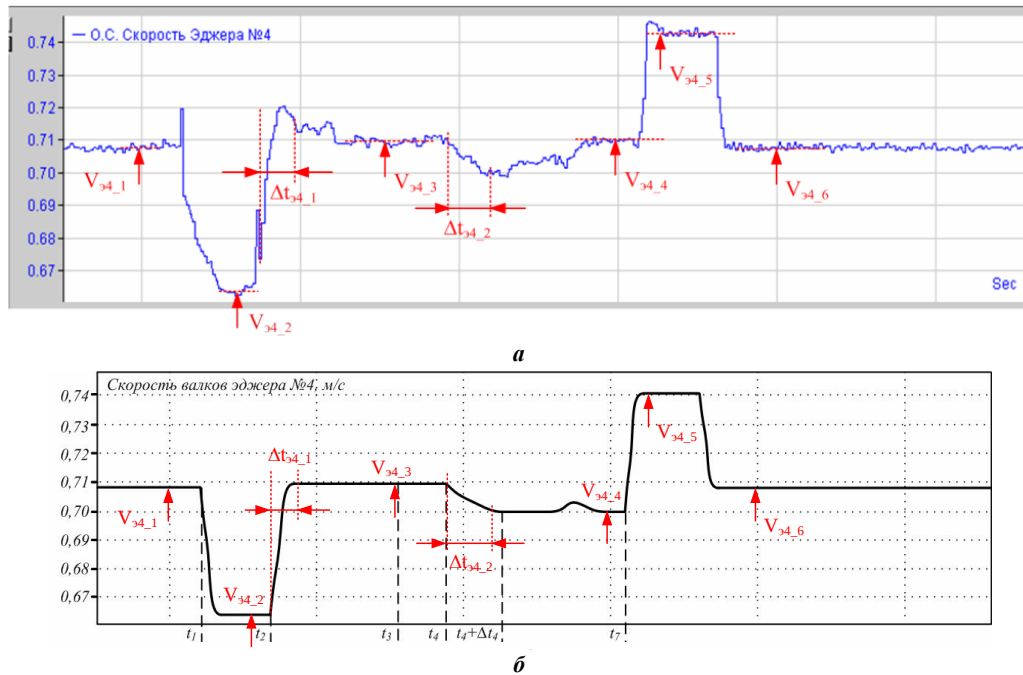


Рис. 6. Оценка адекватности математической модели по скорости вертикальных валков клету №4

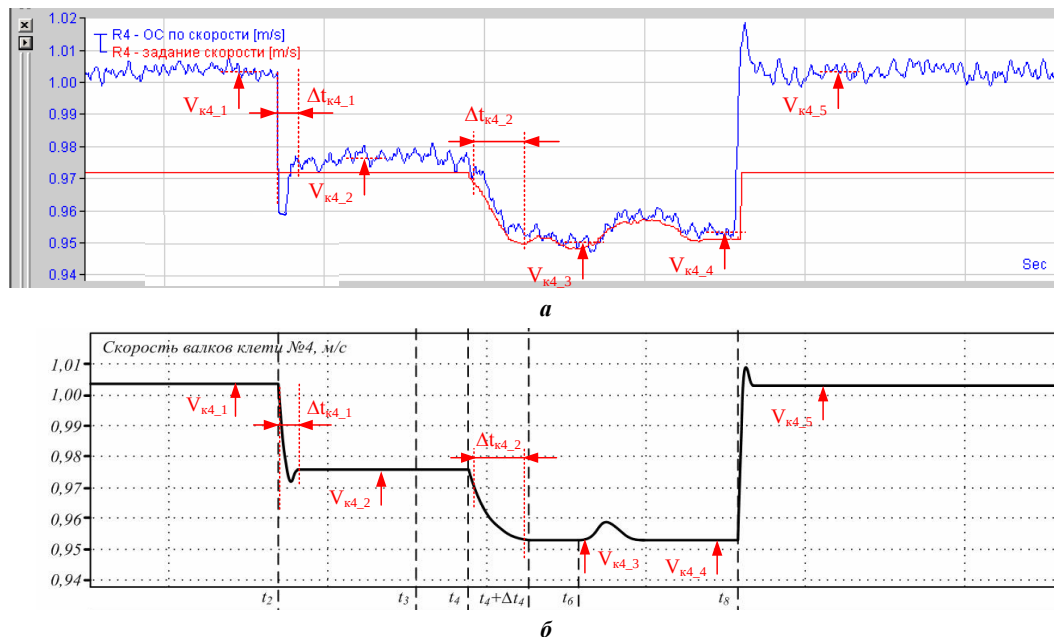


Рис. 7. Оценка адекватности математической модели по скорости горизонтальных валков клету №4

В табл. приведены значения фиксированных параметров и указаны относительные погрешности результатов моделирования. Из них следует, что в большинстве характерных точек относительная погрешность не превышает 5%. Такие расхождения находятся в пределах погрешности измерений и являются допустимыми при моделировании сложного взаимосвязанного объекта.

Результаты сравнения экспериментальных и расчетных данных, представленных на рис. 6 и 7

Маркеры на осциллограммах	Эксперимент на стане	Расчет на модели	Прим.
V_{34_1}	0,708 об/мин	0,708 об/мин	<5 %
V_{34_2}	0,674 об/мин	0,673 об/мин	<5 %
V_{34_3}	0,709 об/мин	0,710 об/мин	<5 %
V_{34_4}	0,710 об/мин	0,700 об/мин	<5 %
V_{34_5}	0,743 об/мин	0,740 об/мин	<5 %
V_{34_6}	0,707 об/мин	0,708 об/мин	<5 %
Δt_{34_1}	2,62 с	2,44 с	6,8 %
Δt_{34_2}	2,82 с	2,94 с	<5 %
$V_{к4_1}$	1,003 об/мин	1,003 об/мин	<5 %
$V_{к4_2}$	0,977 об/мин	0,976 об/мин	<5 %
$V_{к4_3}$	0,950 об/мин	0,953 об/мин	<5 %
$V_{к4_4}$	0,953 об/мин	0,953 об/мин	<5 %
$V_{к4_5}$	1,003 об/мин	1,003 об/мин	<5 %
$\Delta t_{к4_1}$	1,33 с	1,36 с	<5 %
$\Delta t_{к4_2}$	3,32 с	2,29 с	<5 %

Таким образом, по представленным результатам можно сделать вывод об адекватности разработанной математической модели реальному физическому объекту: взаимосвязанным электромеханическим системам трехклетевой непрерывной подгруппы стана 2000.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная математическая модель взаимосвязанных электромеханических систем непрерывной подгруппы черновой группы стана 2000 ОАО «ММК» адекватна промышленному объекту. Модель рекомендуется для исследования динамических режимов, возникающих при управляющих и возмущающих воздействиях. Достоверное математическое описание силовой взаимосвязи электроприводов смежных горизонтальных клеток позволяет анализировать причины отклонений натяжения либо возникновения подпора в межклетевых промежутках. Это позволит выполнить исследование усовершенствованных алгоритмов регулирования нулевого натяжения. Применение модели также це-

лесообразно для исследования динамических нагрузок, возникающих при захвате полосы валками горизонтальных и вертикальных клеток, и для исследования способа автоматического регулирования натяжения полосы в черновой группе клеток [22], разработанного при участии авторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тонкослябовые литейно-прокатные агрегаты для производства стальных полос / В.М. Салганик, И.Г. Гун, А.С. Карандаев, А.А. Радионов. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. 506 с.
2. Новые технические решения в электроприводах и системах регулирования технологических параметров станов горячей прокатки / А.С. Карандаев, В.Р. Храмшин, И.Ю. Андрияшин, В.В. Головин, П.В. Шиляев, С.А. Петряков, А.А. Лукин // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 3: в 5 ч. Тула: Изд-во ТулГУ, 2010. Ч. 2. С. 34-40.
3. Карандаев А.С., Храмшин В.Р. Совершенствование электроприводов и систем автоматического регулирования технологических параметров широкополосных станов горячей прокатки при расширении сортамента полос // Электротехнические системы и комплексы, 2014. № 1. – С. 22-31.
4. Карандаев А.С. Совершенствование автоматизированных электроприводов агрегатов прокатного производства // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2014. №1. С. 3-15.
5. Храмшин В.Р. Разработка электротехнических систем непрерывной группы стана горячей прокатки при расширении сортамента полос: дис. ... д-ра техн. наук. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. тех. ун-та им. Г.И. Носова, 2013. 360 с.
6. Андрияшин И.Ю. Совершенствование системы управления скоростными режимами электроприводов непрерывной группы широкополосного стана горячей прокатки: дис. ... канд. техн. наук. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2011. 204 с.
7. Храмшин В.Р. Способы компенсации статических отклонений скорости электроприводов клеток широкополосного стана горячей прокатки // Электротехника. 2013. №4. С. 49-55.
8. Определение энергосиловых параметров процессов обработки металлов давлением косвенным методом / А.А. Радионов, Д.Ю. Усатый, А.С. Карандаев, А.С. Сарваров. Магнитогорск, 2000. Деп. в ВИНТИ 20.04.2000, №1085-В00.
9. Согласование скоростных режимов электроприводов клеток непрерывной группы прокатного стана / А.С. Карандаев, В.Р. Храмшин, А.А. Радионов, И.Ю. Андрияшин, В.В. Галкин, А.Н. Гостев // Вестник ИГЭУ. 2013. Вып. 1. С. 98-103.
10. Снижение динамических нагрузок механического и электрического оборудования черновой подгруппы клеток стана горячей прокатки / В.Р. Храмшин, А.С. Карандаев, А.А. Радионов, И.Ю. Андрияшин, А.Н. Гостев // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2013. №2. С. 69-77.
11. Басков С.Н., Карандаев А.С., Осипов О.И. Энергосиловые параметры приводов и система профилированной прокатки слябов стана 2800 // Приводная техника. 1999. № 1-2. С. 21-24.
12. Согласование скоростей взаимосвязанных электроприводов клеток черновой группы прокатного стана / А.С. Карандаев, В.Р. Храмшин, А.А. Радионов, И.Ю. Андрияшин, В.В. Галкин, А.Н. Гостев // Труды VII Международной (XVIII Всероссийской) научно-технической кон-

ференции по автоматизированному электроприводу: ФГОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет». Иваново, 2012. С. 652-657.

13. Совершенствование алгоритма согласования скоростей электроприводов клеток черновой группы стана горячей прокатки / А.С. Карандаев, В.Р. Храмшин, В.В. Галкин, А.Н. Гостев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия Энергетика. Вып. 16. 2011. № 34 (251). С. 35-41.

14. Математическое моделирование тиристорного электропривода с переключающейся структурой / А.С. Карандаев, В.Р. Храмшин, В.В. Галкин, А.А. Лукин // Известия вузов. Электромеханика. 2010. №3. С. 47-53.

15. Шрейнер, Р.Т. Системы подчиненного регулирования электроприводов. Часть 1. Электроприводы постоянного тока с подчиненным регулированием координат: Учеб. пособие для вузов. Екатеринбург: Урал. гос. проф.-пед. ун-та, 1997. 279 с.

16. Математическое моделирование взаимосвязанных электромеханических систем межклетового промехотка широкополосного стана горячей прокатки / А.С. Карандаев, В.Р. Храмшин, И.Ю. Андрияшин, П.В. Шильев, В.В. Головин // Известия вузов. Электромеханика. 2009. №1. С. 12-20.

17. Khrumshin, V.R. Study of Thickness Control of Strip Head Section Using Mathe-matical Simulation Methods [Исследование способа коррекции толщины головного участка полосы методом математического моделирования] / V.R. Khrumshin, A.S. Karandaev, A.A. Radionov,

R.R. Khrumshin // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия Энергетика. Вып. 13. 2013. № 1. С. 144-151.

18. Математическая модель взаимосвязанных электротехнических систем непрерывной группы широкополосного стана / В.Р. Храмшин, И.Ю. Андрияшин, А.Н. Гостев, А.С. Карандаев // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2013. №1. С. 12-21.

19. Дружинин, Н.Н. Непрерывные станы как объект автоматизации. М.: Металлургия, 1967. 336 с.

20. Способ коррекции скоростей захвата полосы в непрерывной подгруппе клеток широкополосного стана горячей прокатки / А.С. Карандаев, А.А. Радионов, В.Р. Храмшин, А.Н. Гостев // Электротехнические системы и комплексы: Межвуз. сб. науч. трудов. Вып. 20. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2012. С. 141-149.

21. Автоматическая коррекция скоростей электроприводов клеток стана 2000 при прокатке трубной заготовки / И.Ю. Андрияшин, В.В. Галкин, В.В. Головин, А.С. Карандаев, А.А. Радионов, В.Р. Храмшин // Известия вузов. Электромеханика. 2011. № 4. С. 31-35.

22. Способ автоматического регулирования натяжения полосы в черновой группе клеток непрерывного прокатного стана / И.Ю. Андрияшин, В.В. Галкин, А.Н. Гостев, И.В. Казаков, С.А. Евдокимов, А.С. Карандаев, В.Р. Храмшин, Р.Р. Храмшин // Патент РФ №2494828, МПК В21В37/52. Оpubл. 10.10.2013. Бюл. №28.

INFORMATION IN ENGLISH

DEVELOPMENT OF MATHEMATICAL MODEL FOR INTERRELATED ELECTRICAL AND MECHANICAL SYSTEMS OF ROLLING MILL ROUGHING TRAIN

Andryushin I.Yu., Shubin A.G., Gostev A.N.

Electric drives of the continuous roughing train of the rolling mill 2000 OJSC «Magnitogorsk Iron and Steel Works» are described. The model structure of the interrelated electrical and mechanical systems of two interstand gaps is introduced. Mathematical model of the rolling stand electric drive and the model of the strip plate are considered as control objects. The research group noted some specific features of the modeling process for the no pull automatic control system. Model validity to the study object was evaluated. To evaluate it, transient processes characteristic for rolling were recorded by means of oscillographic testing. It was proved that in the majority of characteristic points the output error was less than 5%, which is quite acceptable. The authors believe it is reasonable to use this model to study the algorithms of speed modes coordination and to limit the impact loads in horizontal and vertical rolls of universal rolling stands.

Keywords: wide strip hot rolling mill, continuous train, electromechanical systems, interrelation, tension, mathematical model, development, adequacy.

REFERENCES

1. Salganik V.M., Gun I.G., Karandaev A.S., Radionov A.A. *Tonkoslyabovye liteino-prokatnye agregaty dlya proizvodstva stalnykh polos* [Thin slab casting and rolling units for steel strip production]. Moscow: Bauman MSTU, 2003, 506 p.

2. Karandaev A.S., Khrumshin V.R., Andryushin I.Yu., Golovin V.V., Shilyaev P.V., Petryakov S.A., Lukin A.A. *Novye tehicheskie resheniya v elektroprivodah i sistemah*

regulirovaniya tehnologicheskikh parametrov stanov goryachei prokatki [New technical solutions in electric drives and control systems of manufacturing parameters of hot rolling mills]. Proceedings of TulGU. Technical sciences. Issue 3. Tula: Publishing center of TulGU, 2010, part 2, pp. 34-40.

3. Karandaev A.S., Khrumshin V.R. *Sovershenstvovanie elektroprivodov i sistem avtomaticheskogo regulirovaniya tehnologicheskikh parametrov shirokopolosnykh stanov goryachei prokatki pri rasshirenii sortamenta polos* [Improvement of electric drives and automatic control systems of manufacturing parameters of wide strip hot rolling mills in the process of product range expansion]. Electrotechnical systems and complexes, 2014, no. 1, pp. 22-31.

4. Karandaev A.S. *Sovershenstvovanie avtomatizirovannykh elektroprivodov agregatov prokatnogo proizvodstva* [Improvement of automatic electric drives of rolling stands]. *Mashinostroenie* [Machine-building]: network electronic scientific journal, 2014, no.1, pp. 3-15.

5. Khrumshin, V.R. *Razrabotka elektrotehnicheskikh sistem nepreryvnoi gruppy stana goryachei prokatki pri rasshirenii sortamenta polos* [Development of electrotechnical systems for continuous train of hot rolling mill in the process of product range expansion]: Dissertation for a D.Sc. degree in Engineering. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2013, 360 p.

6. Andryushin, I.Yu. *Sovershenstvovanie sistemy upravleniya skorostnymi rezhimami elektroprivodov nepreryvnoi gruppy shirokopolosnogo stana goryachei prokatki* [Improvement of speed control system for electric

drives of continuous train of a wide strip hot rolling mill]: dissertation for a Ph.D. in Engineering, Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2011, 204 p.

7. Khramshin, V.R. Sposoby kompensatsii staticheskikh otklonenii skorosti elektroprivodov kletei shirokopolosnogo stana goryachei prokatki [Ways of speed static deflection compensation for electric drives of rolling stands of wide strip hot rolling mill]. *Elektrotehnika* [Electrical engineering]. 2013, no.4, pp. 49-55.

8. Radionov A.A., Usatyi D.Yu., Radionov A.A., Karandaev A.S., Sarvarov A.S. *Opreделение energosilovyykh parametrov protsessov obrabotki metallov davleniem kosvennym metodom* [Calculation of power parameters of plastic metal working by indirect method]. Magnitogorsk, 2000, dep. in VINITI 20.04.2000, no. 1085-B00.

9. Karandaev A.S., Khramshin V.R., Radionov A.A., Andryushin I.Yu., Galkin V.V., Gostev A.N. *Soglasovanie skorostnykh rezhimov elektroprivodov kletei nepreryvnoi gruppy prokatnogo stana* [Coordination of rolling stand electric drive speed of continuous train of rolling mill]. *Vestnik IGEU* [Bulletin of ISPU]. 2013, issue 1, pp. 98-103.

10. Khramshin V.R., Karandaev A.S., Radionov A.A., Andryushin I.Yu., Gostev A.N. *Snizhenie dinamicheskikh nagрузок mehanicheskogo i elektricheskogo oborudovaniyachernovoi podgruppy kletei stana goryachei prokatki* [Reduction of dynamic loads on mechanical and electrical equipment of roughing train of hot rolling mill]. *Mashinostroyeniye* [Machine building]: network electronic scientific journal. 2013, no.2, pp. 69-77.

11. Baskov S.N., Karandaev A.S., Baskov S.N., Osipov O.I. *Energosilovyye parametry privodov i sistema profilirovannoi prokatki slyabov stana 2800* [Power parameters of electric drives and system of shape rolling of slabs at rolling mill 2800]. *Privodnaya tekhnika* [Driving equipment]. 1999, no. 1-2, pp. 21-24.

12. Karandaev A.S., Khramshin V.R., Radionov A.A., Andryushin I.Yu., Galkin V.V., Gostev A.N. *Soglasovanie skorostei vzaimosvyazannykh elektroprivodov kletei chernovoi gruppy prokatnogo stana* [Speed coordination of interrelated electric drives of roughing train stands of rolling mill]. *Trudy VII mezhdunarodnoi (XVII Vserossiiskoi) nauchno-tekhnicheskoi konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu* [Proceedings of VII International (XVIII All-Russian) scientific conference on automatic electric drive]: FSBEI HPE «Ivanovo state power university», Ivanovo. 2012, pp. 652-657.

13. Karandaev A.S., Khramshin V.R., Galkin V.V., Gostev A.N. *Sovershenstvovanie algoritma soglasovaniya skorostei elektroprivodov kletei chernovoi gruppy stana goryachei prokatki* [Improvement of electric drives speed coordination algorithm for roughing train of hot rolling mill]. *Vestnik YuURGU. Seriya energetika* [Bulletin of South-Ural state university. Power engineering]. Issue 16, 2011, no. 34(251), pp. 35-41.

14. Karandaev A.S., Khramshin V.R., Galkin V.V., Lukin A.A. *Matematicheskoe modelirovaniye tiristornogo elektropriroda s pereklyuchayuscheisya strukturoi* [Mathematical modeling of thyristor electric drive with a flipper].

Izvestiya vuzov. Elektromekhanika [Proceedings of universities. Electrical engineering]. 2010, no.3, pp. 47-53.

15. Shreiner R.T. *Sistemy podchinennogo regulirovaniya elektroprivodov* [Slave control systems of electric drives]. Part 1. DC electric drives with slave coordinate control: Textbook for universities. Yekaterinburg: Ural state vocational pedagogical university, 1997, 279 p.

16. Karandaev A.S., Khramshin V.R., Andryushin I.Yu., Shilyaev, Golovin V.V. *Matematicheskoe modelirovaniye vzaimosvyazannykh elektromekhanicheskikh sistem mezhkletjevogo promezhnutka shirokopolosnogo stana goryachei prokatki* [Mathematical modeling of interrelated electrical systems of interstand gap of wide strip hot rolling mill]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika* [Proceedings of universities. Electrical engineering]. 2009, no.1, pp. 12-20.

17. Khramshin V.R., Karandaev A.S., Radionov A.A., Khramshin R.R. *Issledovaniye sposoba korrektsii golovnoy uchastka polosy metodom matematicheskogo modelirovaniya* [Study of Thickness Control of Strip Head Section Using Mathematical Simulation Methods]. *Vestnik YuURGU. Seriya energetika* [Bulletin of south-Ural state university. Power engineering series]. Issue 13, 2013, no. 1, pp. 144-151.

18. Khramshin V.R., Andryushin I.Yu., Gostev A.N., Karandaev A.S. *Matematicheskaya model vzaimosvyazannykh elektrotehnicheskikh sistem nepreryvnoi gruppy shirokopolosnogo stana* [Mathematical model of interrelated electrical systems of continuous train of wide strip rolling mill]. *Mashinostroyeniye* [Machine building]: network electronic scientific journal, 2013, no.1, pp. 12-21.

19. Druzhinin N.N. *Nepreryvnye stany kak objekt avtomatizatsii* [Continuous mills as automation object]. – Moscow: Metallurgy, 1967, 336 p.

20. Karandaev A.S., Radionov A.A., Khramshin V.R., Gostev A.N. *Sposob korrektsii skorostei zahvata polosy v nepreryvnoi podgruppe kletei shirokopolosnogo stana goryachei prokatki* [Way of strip clamp speed in continuous train of wide strip hot rolling mill]. *Electromechanical systems and complexes: Interuniversity collection of scientific papers*. Issue 20. Magnitogorsk: Publishing center of Nosov Magnitogorsk state technical university, 2012, pp. 141-149.

21. Andryushin I.Yu., Galkin V.V., Golovin V.V., Karandaev A.S., Radionov A.A., Khramshin V.R. *Avtomaticheskaya korrektsiya skorostei elektroprivodov kletei stana 2000 pri prokatke trubnoi zagotovki* [Automatic control of stand electric drive speed of 2000 rolling mill during tube stock rolling]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika* [Proceedings of universities. Electrical engineering]. 2011, no. 4, pp. 31-35.

22. Andryushin I.Yu., Galkin V.V., Gostev A.N., Kazakov I.V., Evdokimov S.A., Karandaev A.S., Khramshin V.R., Khramshin R.R. *Sposob avtomaticheskogo regulirovaniya natyazheniya polosy v chernovoi gruppe kletei nepreryvnogo prokatnogo stana* [Way of automatic strip tension control in roughing train of continuous rolling mill]. // RF №2494828, МПК В21В37/52. Published 10.10.2013. Bulletin no.28.

Басков С.Н., Лицин К.В.

ИССЛЕДОВАНИЕ БЕЗДАТЧИКОВОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ УГЛОВОГО ПОЛОЖЕНИЯ РОТОРА СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПОМОЩЬЮ НАЛОЖЕНИЯ ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ

В статье рассматривается метод бездатчикового определения углового положения ротора синхронного двигателя с помощью наложения высокочастотного сигнала. Приведена схема лабораторного стенда для проведения эксперимента. Осуществлен вывод формулы для расчета углового положения ротора синхронного двигателя. Представлены выводы, позволяющие заключить о снижении стоимости и размеров системы определения углового положения и увеличении ее надежности.

Ключевые слова: бездатчиковый контроль, высокочастотная инжекция сигнала, синхронный двигатель.

Для того чтобы оптимально контролировать синхронный двигатель, должно быть известно положение и (или) скорость вала. Положение и скорость вала обычно определяют с помощью датчика положения [1].

В настоящее время просматривается тенденция к отказу от использования датчиков механических величин (Sensorless Control) и восстановления вектора состояния системы с помощью различных оценивающих моделей [2,3]. Это приведет к таким преимуществам, как повышение надежности системы электропривода; снижение стоимости привода; улучшение массогабаритных показателей; отсутствие датчиков определения механических величин позволит избежать помехи.

Существует достаточно большое число способов определения положения ротора без использования механического датчика, каждый из них имеет свои преимущества, недостатки и ограничения [4-8].

Главный недостаток большинства этих способов – это проблема определения положения ротора синхронного двигателя при нулевых и низких скоростях.

Метод с использованием высокочастотной инжекции сигналов может оценивать положение ротора при нулевой и низкой скорости [3]. Принцип этого способа заключается в том, что высокочастотный ток или напряжение накладывается на сигнал возбуждения двигателя. В результате сигнал высокой частоты возбуждает напряжение или ток, которые содержат информацию о положении ротора. Используя подходящие методы обработки сигналов, можно оценить положение ротора.

Целью данной статьи является описание метода, позволяющего определить угловое положение ротора синхронного двигателя с помощью метода высокочастотной инжекции.

Схема лабораторного стенда представлена на рисунке.

Схема исследования углового положения ротора включает в себя:

- источник тока DC Power Supply HY 3003-2;
- генератор сигналов ГЗ-112/1;
- две емкости по 20 мкФ;
- два дросселя по 0,1 Гн;
- синхронная машина ГАБ-1-Т/230.

Параметры синхронного двигателя приведены

в таблице.

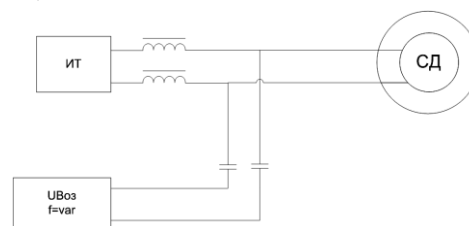


Схема исследования углового положения ротора синхронного двигателя

Параметры синхронной машины ГАБ-1-Т/230

Параметр	Значение
Номинальное напряжение, В	220
Номинальная частота, Гц	50
Синхронная частота вращения ротора, об/мин	3000
Номинальная мощность в режиме генератора, кВт	0,75
Номинальный ток статора, А	3,0
Номинальный коэффициент мощности	0,8
Номинальная мощность в режиме двигателя, кВт	0,7
Номинальный КПД	0,78
Номинальный ток возбуждения, А	2,0
Максимальный ток возбуждения, А	6,0

Сигнал возбуждения, имеющий частоту в 1000 Гц, проходит через емкость и накладывается на сигнал, вырабатываемый источником тока, который имеет значение в 2 А. Значения фазных напряжений, снимаемых с двигателя, через АЦП поступают в компьютер для последующей обработки.

Для определения формулы расчета углового положения ротора рассмотрим систему уравнений синхронного двигателя при заданных начальных условиях: статор синхронного двигателя еще не подключен к трехфазной сети переменного тока, фазные токи в обмотках статора равны нулю.

По формуле преобразования координат известно:

$$u_q = \frac{3}{2} \left(u_a \cos(\gamma) + u_b \cos\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) + u_c \cos\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) \right), \quad (1)$$

где u_a , u_b , u_c – мгновенные значения фазных напря-

жений; u_q – напряжение якоря по оси q .

Учитывая, что статор не подключен к сети, $i_a=0$, $i_b=0$, $i_c=0$ и ротор неподвижен, то $\omega_R=0$.

Таким образом, получим

$$\begin{aligned} & \frac{3}{2} \left(u_a \cos(\gamma) + u_b \cos\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) + \right. \\ & \left. + u_c \cos\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) \right) = 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Так как трехфазная система симметричная, то можно принять, что

$$u_c = -(u_a + u_b). \quad (3)$$

Подставив выражение (3) в (2), имеем:

$$\begin{aligned} & u_a \cos(\gamma) + u_b \cos\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) - \\ & - (u_a + u_b) \cdot \cos\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) = 0. \end{aligned} \quad (4)$$

Сгруппировав выражение (4) и применив формулы сложения косинусов, получим:

$$\begin{aligned} & u_a \cos(\gamma) - u_a \cos\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) + \\ & + u_b \cos\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) - u_b \cdot \cos\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) = 0; \\ & - 2 \cdot u_a \sin\left(\frac{\gamma + \gamma + \frac{2\pi}{3}}{2}\right) \cdot \sin\left(\frac{\gamma - \gamma - \frac{2\pi}{3}}{2}\right) - \\ & - 2u_b \sin\left(\frac{\gamma - \frac{2\pi}{3} + \gamma + \frac{2\pi}{3}}{2}\right) \times \\ & \times \sin\left(\frac{\gamma - \frac{2\pi}{3} - \gamma - \frac{2\pi}{3}}{2}\right) = 0; \\ & \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot u_a \sin\left(\gamma + \frac{\pi}{3}\right) + \frac{\sqrt{3}}{2} u_b \sin(\gamma) = 0; \\ & u_a \sin\left(\gamma + \frac{\pi}{3}\right) + u_b \sin(\gamma) = 0; \\ & u_a \sin\left(\gamma + \frac{\pi}{3}\right) = -u_b \sin(\gamma); \end{aligned}$$

$$\frac{\sin\left(\gamma + \frac{\pi}{3}\right)}{\sin(\gamma)} = -\frac{u_b}{u_a}. \quad (5)$$

Применив к выражению (5) формулу синусов суммы:

$$\frac{\sin(\gamma) \cos\left(\frac{\pi}{3}\right) + \cos(\gamma) \sin\left(\frac{\pi}{3}\right)}{\sin(\gamma)} = -\frac{u_b}{u_a}. \quad (6)$$

Учтем, что $\sin(\gamma) \neq 0$, тогда

$$\begin{aligned} & \cos\left(\frac{\pi}{3}\right) + \operatorname{ctg}(\gamma) \sin\left(\frac{\pi}{3}\right) = -\frac{u_b}{u_a}; \\ & 0,5 + \operatorname{ctg}(\gamma) \frac{\sqrt{3}}{2} = -\frac{u_b}{u_a}; \\ & \operatorname{ctg}(\gamma) = \frac{2\left(-0,5 - \frac{u_b}{u_a}\right)}{\sqrt{3}}. \end{aligned} \quad (7)$$

В выражении (7) используем формулу приведения $\operatorname{ctg}(\gamma) = \operatorname{tg}(\pi/2 - \gamma)$, в результате

$$\operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{2} - \gamma\right) = \frac{2 \cdot \left(-0,5 - \frac{u_b}{u_a}\right)}{\sqrt{3}}. \quad (8)$$

Решая уравнение (8), получим:

$$\begin{aligned} & \frac{\pi}{2} - \gamma = \operatorname{arctg}\left(\frac{2 \cdot \left(-0,5 - \frac{u_b}{u_a}\right)}{\sqrt{3}}\right); \\ & \gamma = \frac{\pi}{2} - \operatorname{arctg}\left(\frac{2 \cdot \left(-0,5 - \frac{u_b}{u_a}\right)}{\sqrt{3}}\right). \end{aligned} \quad (9)$$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Басков С.Н., Лицин К.В. Принцип векторно-импульсного управления электродвигателями переменного тока // Вестник Южно-Уральского Государственного Университета «Энергетика». 2013. Т.13. №1. С. 92-95.
2. Исследование положения вектора потокоцепления ротора при векторно-импульсном пуске / С.Н. Басков, К.В. Лицин К.В., А.С. Коньков, Т.В. Черкас // Вестник Южно-Уральского Государственного Университета «Энергетика». 2012. Вып.18. №37(296). С. 68-72.
3. Басков С.Н., Лицин К.В. Высокочастотная инжекция сигналов при бездатчиковом методе определения углового положения ротора // Электронный журнал «Маши-

ностроение». 2013. №1. С. 28-34. URL: <http://indust-engineering.ru/>

4. O. Goksu. Shaft transducerless vector control of the interior permanent magnet motor with speed and position estimation using high frequency signal injection and flux observer methods," Master's thesis, The Graduate School of Natural and Applied Sciences of Middle East Technical University, May 2008.

5. Persson Jan. Innovative standstill position detection combined with sensorless control of synchronous motors. Lausanne, Switzerland.: École polytechnique fédérale de Lau-

sanne (EPFL), 2005.

6. Busca Cristian. Open loop low speed control for PMSM in high dynamic application. Aalborg, Denmark.: Aalborg universitet, 2010.

7. Vas Peter. Sensorless vector and direct torque control. Oxford, UK.: Oxford University Press, 1998.

8. Sun Don, He Yikang, Zhi Dawex. Direct torque control of synchronous motor with permanent magnets based on fuzzy logic // Trans. China Electrotech. Soc, 2003, № 1, p. 33-38.

INFORMATION IN ENGLISH

SENSORLESS CONTROL OF ROTOR ANGULAR POSITION IN SYNCHRONOUS MOTOR BY OVERLAYING HIGHFREQUENCY SIGNAL

Baskov S.N., Litsin K.V.

The article describes a method for sensorless determining of rotor angular position in a synchronous motor by means of superimposing a high frequency signal. The scheme of the laboratory bench for the experiment is described. A formula for rotor angular position calculation of a synchronous motor was developed. It was concluded that the developed method makes it possible to reduce the cost and the size of the system for determining the angular position and increase its reliability.

Keywords: sensorless control, high frequency injection, synchronous machine.

REFERENCES

1. Baskov S.N., Litsin K.V., *Princip vektornogo impulsnogo upravleniya electrodvigatelyami peremennogo toka* [Vector-pulse principle to control AC motors]. *Vestnik YuURGU. Seriya energetika* [Bulletin of South-Ural state university. Power engineering]. 2013, vol. 13, no. 1, pp. 92-95.

2. Baskov S.N., Konkov A.S., Cherkas T.V., Litsin K.V. *Issledovanie polozheniya vektora potokoscepleniya rotora pri vektorno-impul'snom puske* [Study of rotor flux linkage vector in vector-pulse start]. *Vestnik YuURGU. Seriya energetika* [Bulletin of South-Ural state university. Power engineering]. 2012, vol. 18, no.37, pp. 68-72.

3. Baskov S.N., Litsin K.V. Vysokochastotnaja

inzhekcija signalov pri bezdatchikovom metode opredeleniya uglovogo polozheniya rotora [High-frequency signal injection in sensorless method for determining the angular position of the rotor]. *Elektronnii zhurnal «Mashinostroenie»* [Electronic Journal «Engineering»]. 2013, no.1, pp.28-34 (available at: <http://www.indust-engineering.ru/issues/2013/2013-1.pdf>).

4. O. Goksu. Shaft transducerless vector control of the interior permanent magnet motor with speed and position estimation using high frequency signal injection and flux observer methods," Master's thesis, The Graduate School of Natural and Applied Sciences of Middle East Technical University, May 2008.

5. Persson Jan. Innovative standstill position detection combined with sensorless control of synchronous motors. Lausanne, Switzerland.: École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL), 2005.

6. Busca Cristian. Open loop low speed control for PMSM in high dynamic application. Aalborg, Denmark.: Aalborg universitet, 2010.

7. Vas Peter. Sensorless vector and direct torque control. Oxford, UK.: Oxford University Press, 1998.

8. Sun Don, He Yikang, Zhi Dawex. Direct torque control of synchronous motor with permanent magnets based on fuzzy logic // Trans. China Electrotech. Soc, 2003, № 1, p. 33-38.

УДК: 621:83

Омельченко Е.Я., Фомин Н.В., Тележкин О.А., Танич В.О., Лымарь А.Б.

УСТРОЙСТВО КОНТРОЛЯ ПЕРЕМЕННЫХ ТРЕХФАЗНОЙ СЕТИ НА БАЗЕ МИКРОПРОЦЕССОРНОГО КОМПЛЕКТА ARDUINO

Разработано микропроцессорное устройство контроля переменных трехфазной сети. По текущей информации от датчиков тока и напряжения выполняется расчет мгновенных значений несимметрии и модулей тока и напряжения, активной и реактивной мощности, коэффициента активной мощности. В среде Matlab Simulink разработана дискретная модель микропроцессорного устройства для анализа точности выполняемых расчетов. Устройство реализовано на плате Arduino Due. Результаты разработки можно применить для оценки качества работы трехфазной нагрузки, например асинхронного двигателя.

Ключевые слова: датчики напряжения и тока, микропроцессор, активная, реактивная мощность, Arduino, измерение, алгоритм, дискрета.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в связи с повышением требований к качеству питающего напряжения растет потребность в устройствах, осуществляющих мониторинг параметров питающей сети в реальном времени. Ведущие производители промышленной электроники, такие как Siemens, ABB, OMRON уже выпускают подобные устройства. Однако стоимость подобных технических решений очень высока. В данной статье рассматривается возможность создания такого устройства, используя микроконтроллеры фирмы Arduino [1], имеющие до 8 аналоговых входов 0-5 В, сделанные на основе микропроцессоров фирмы Atmel. Целью разработки является создание микропроцессорного устройства, позволяющего на основе информации о токах и напряжениях в трехфазной сети проводить расчет мгновенных значений активной и реактивной мощности, cosφ, несимметрии и модуля напряжений и токов. Для этого необходима разработка программного обеспечения для дискретного расчета переменных трехфазной сети и оценка точности этих расчетов в зависимости от дискретности по времени и алгоритмов расчета.

Основные показатели, необходимые для оценки переменных питающей сети: активная, реактивная, полная мощность, cosφ, несимметрия токов и напряжений и их модули.

ТЕОРИЯ

Активная мощность P равна среднему значению мгновенной мощности за период питающего напряжения и определяет количество электрической энергии, необратимо преобразующейся за секунду в тепло или другие формы энергии [2]. Полная мощность S определяется действующими значениями токов и напряжений сети, она всегда больше фактически передаваемой нагрузке активной мощности из-за существования неактивных составляющих мощности, которые увеличивают потери в источнике, не совершая полезной работы. Реактивная мощность, или мощность сдвига, Q в рассматриваемом случае обусловлена сдвигом по фазе основной гармоники тока нагрузки относительно синусоидального напряжения питающей сети. При этом под основной гармоникой тока понимается его составляющая, изменяющаяся с частотой напряжения сети. Поэтому появляется реактивная составляющая тока, которая не участвует в передаче активной мощности нагрузке, так как среднее арифметическое мгновенной мощности за период от этой составляющей равно нулю. Мощность искажения T обусловлена протеканием гармоник тока, не совпадающих по частоте с напряжением сети. Среднее арифметическое мгновенной мощности, связанной с этими гармониками, за период, также равно нулю, однако они вызывают дополнительные потери энергии. Мощность несимметрии N учитывает дополнительные потери энергии, связанные с неравномерным распределением тока по фазам многофазной цепи. Потери про-

порциональны квадрату тока, и увеличение тока в одной фазе за счет других фаз приводит к увеличению суммарных потерь.

Мгновенное значение активной мощности одной фазы содержит существенную переменную составляющую двойной частоты сети. В трехфазной сети при симметричной нагрузке эти переменные составляющие взаимно компенсируются и возможно рассчитывать мгновенные значения модулей тока и напряжения, активную и реактивную мощность.

Расчет модуля тока выполняется по формуле

$$I_m(t) = \left[(i_a^2(t) + i_b^2(t) + i_c^2(t)) \cdot 2/3 \right]^{0.5}. \quad (1)$$

Мгновенная активная мощность, потребляемая из трехфазной сети, определяется как сумма мгновенных активных мощностей трех фаз (скалярное произведение трехмерного вектора фазного напряжения на трехмерный вектор тока)

$$\begin{aligned} P_\Sigma(t) &= \sum_{j=1}^3 (u_j(t) \cdot i_j(t)) = \\ &= u_a(t)i_a(t) + u_b(t)i_b(t) + u_c(t)i_c(t). \end{aligned} \quad (2)$$

Мгновенное значение реактивной мощности одной фазы прямо пропорционально мгновенному значению тока первой производной напряжения и обратно пропорционально частоте питающего напряжения [2]. Мгновенное значение суммарной реактивной мощности трехфазной цепи равно сумме реактивных мощностей фаз

$$\begin{aligned} Q_\Sigma(t) &= -\frac{1}{\Omega} \sum_{j=1}^3 (u_j^*(t) \cdot i_j(t)) = \\ &= -\frac{1}{\Omega} (u_a^*(t) \cdot i_a(t) + \\ &+ u_b^*(t) \cdot i_b(t) + u_c^*(t) \cdot i_c(t)). \end{aligned} \quad (3)$$

Полная потребляемая мощность может быть рассчитана по формуле

$$\begin{aligned} S_\Sigma(t) &= 3U_m(t)I_m(t)/2 = \\ &= \sqrt{P_\Sigma^2(t) + Q_\Sigma^2(t)}. \end{aligned} \quad (4)$$

Коэффициент активной мощности рассчитывается по формуле

$$\cos \varphi = P_\Sigma(t) / S_\Sigma(t). \quad (5)$$

Несимметрия токов и напряжений будет проявляться в наличии переменной составляющей двойной частоты в мгновенных значениях активной и реактивной мощности.

МОДЕЛЬ МИКРОПРОЦЕССОРНОЙ СИСТЕМЫ

В среде Matlab Simulink на основании формул (1)–(5) разработана компьютерная модель микропроцессорной системы с учетом дискретных преоб-

разований аналоговых входных сигналов токов и напряжений по времени, измеренных непрерывными датчиками в трехфазной сети. В структурную схему модели (рис. 1) входят блоки: Fz (задается линейное изменение частоты и напряжения); U3(F, Um) (формируется система трехфазного напряжения); IdU(u r l) (по заданным сопротивлениям и индуктивностям рассчитываются трехмерные векторы токов и производных по напряжению по схеме с изолированной нейтралью); I(p)U(p)-dU(z)I(z)U(z) (выполняется дискретное преобразование по времени трехмерных аналоговых сигналов тока и напряжения, закладывает основы дискретных расчетов в микропроцессорной системе); PQIUcos(UIW) (выполняется по формулам (1)-(4) расчет мощностей и модулей тока и напряжения как в аналоговой, так и в дискретной системах). С помощью осциллографа U(3)I(3) фиксируются текущие значения трехфазных токов и напряжений. На осциллографе PQSIIm выполняется сравнение значений активной, реактивной, полной мощности и модуля тока, рассчитанных в аналоговой форме и по алгоритмам микропроцессорной системы.

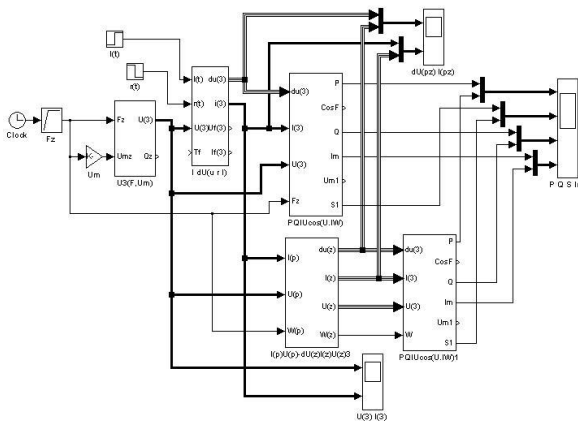


Рис. 1. Структурная схема компьютерной модели

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для исследования работы микропроцессорной системы задавалась сложная форма входного питающего напряжения (рис. 2), состоящая из двух участков.

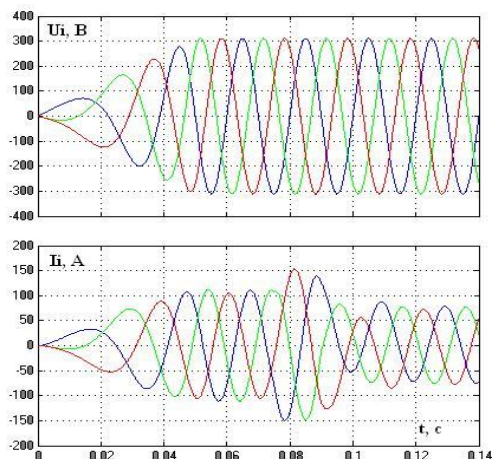


Рис. 2. Трехфазная система напряжений и токов

На первом участке на интервале времени от 0 до 0,05 с задавалось линейное нарастание частоты и амплитуды фазного напряжения до 50 Гц и 311 В. На втором участке амплитуда и частота оставались постоянными.

При осциллографировании скачком изменялись значения индуктивности и активного сопротивления трехфазной нагрузки. В момент времени 0,075 с производились изменения индуктивностей от 0,00625 до 0,0125 Гн, а в момент времени 0,09 с изменены активные сопротивления с 2 до 1 Ом. Форма тока имеет сложный характер. Для исследования нелинейных режимов в фазе С активное сопротивление больше на 10% по сравнению с сопротивлениями фаз А и В. Это четко прослеживается в установившихся режимах на диаграмме токов рис. 2.

Временные зависимости мощностей P , S , Q и модуля тока I_m имеют колебательный характер (рис. 3). Этот характер определяется параметрами нагрузки и полностью подтверждается материалами [3].

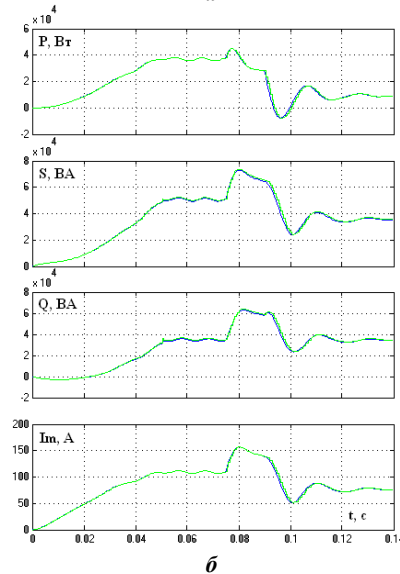
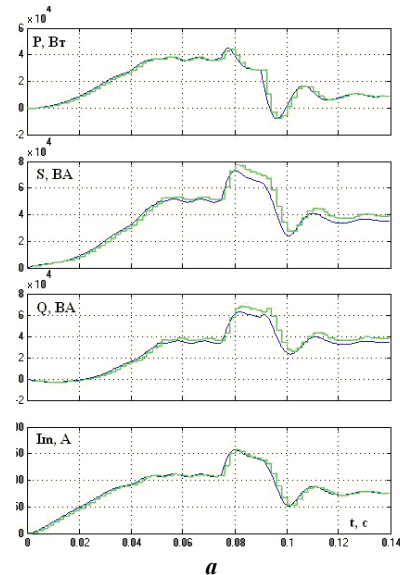


Рис. 3. Осциллограммы мощностей P , S , Q и модуля тока I_m при дискрете по времени 2 мс (а) и 0,5 мс (б)

Четко прослеживается влияние дискреты по времени на точность расчета полной и реактивной мощности. Возникает существенная динамическая ошибка при резких изменениях модуля тока. Максимальные ошибки в кривой S (рис. 3, а, б) при дискретах 2,0, 1,0 и 0,5 мс равны 7,0, 2,8 и 1,25%, соответственно. В кривых активной мощности и модуля тока динамические ошибки отсутствуют. Достаточная по точности расчетов дискрета по времени не должна превышать 1,0 мс.

Несимметричная нагрузка в фазе C проявилась в дополнительных колебаниях мощностей и модуля тока с частотой 100 Гц и амплитудой не более 3,1%.

Принципиальная электрическая схема микропроцессорной системы (рис. 4) включает в себя датчики тока $UT1$, $UT2$, датчики напряжения $UU1$, $UU2$, микроконтроллер $A1$ (Arduino Due) и обвязывающие сопротивления.

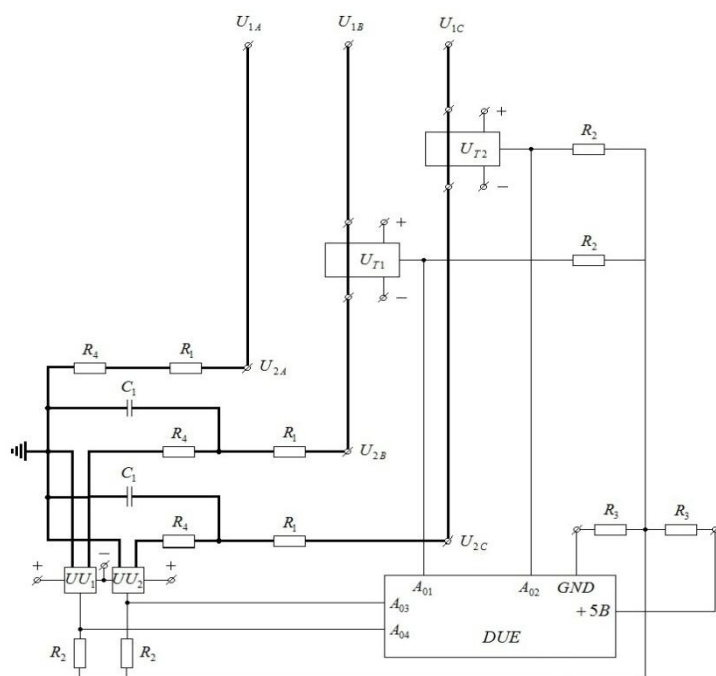


Рис. 4. Принципиальная электрическая схема микропроцессорного устройства

Конденсаторы $C1$ и сопротивления $R1$, $R4$ обеспечивают деление входного напряжения, фильтрацию (при питании от преобразователя частоты с ШИМ) и ограничение входного тока датчика напряжения. Сопротивления $R2$ являются нагрузочными для выходных цепей датчиков тока и напряжения. С помощью сопротивлений $R3$ выполняется сдвиг общих точек датчиков на 2,5 В по отношению к общей точке $A1$. Плата микроконтроллера $A1$ получает питание через USB разъем от ПЭВМ или от адаптера +12 В.

На схеме представлен 2-фазный вариант подключения датчиков. Информация фазы A в устрой-

стве вычисляется по формуле

$$i_a(t) = -i_b(t) - i_c(t).$$

В качестве обратных связей по напряжению и току могут использоваться датчики тока и напряжения любой фирмы с частотой пропускания не менее 1 кГц, обеспечивающие надежную гальваническую развязку.

Применение рассмотренного МПУК не ограничивается функциями мониторинга трехфазной нагрузки. Есть потребность на базе подобных устройств в разработке аппаратной части и программного обеспечения:

- устройство контроля подключения статорной обмотки вращающегося асинхронного двигателя к трехфазной сети;
- устройство контроля подключения транзисторного преобразователя частоты на роторную обмотку асинхронного двигателя в схеме машины двойного питания;
- устройство контроля подключения статорной обмотки вращающегося асинхронного двигателя к транзисторному преобразователю в системе «преобразователь частоты-асинхронный двигатель».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработанное устройство мониторинга переменных трехфазной сети является компактным, дешёвым, свободно программируемым микропроцессорным устройством, обеспечивающим необходимые алгоритмы расчетов.

2. На основной частоте 50 Гц дискрета по времени не должна превышать 1 мс. Максимальная ошибка при этом не будет превышать 3%.

3. Разработанная компьютерная модель микропроцессорного устройства позволяет выполнять анализ различных режимов работы трехфазных сетей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Краткий обзор и перспективы применения микропроцессорной платформы Arduino / Е.Я.Омельченко, В.О.Танич, А.С.Маклаков, Е.А.Карякина // Электротехнические системы и комплексы: междунар. сб. науч. тр. / под ред. Г.П. Корнилова, Е.А. Пановой. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им Г.И. Носова, 2013. Вып. 21. С. 28-33.
2. Маевский О.А. Энергетические показатели вентильных преобразователей. – М.: Энергия, 1978. – 320 с.
3. Селиванов И.А. Омельченко Е.Я. Электромеханические свойства асинхронных двигателей // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2011. №3(35). С. 35-38.

INFORMATION IN ENGLISH

CONTROL DEVICE OF PARAMETERS OF THREE-PHASE MAINS BASED ON ARDUINO MICROPROCESSOR CHIP SET

Omelchenko E.Ya., Fomin N.V., Telezhkin O.A., Tanich V.O., Lymar A.B.

Microprocessor control device of three-phase mains parameters was developed. By actual data of current and voltage sensors it computes transient values of asymmetry and current and voltage magnitude, actual and reactive power, electrical power factor. On the basis of Matlab Simulink discrete time module of microprocessor device analyzing accuracy of performing calculations was developed. This device has been implemented on the Arduino Due processor board. The results of the development may be applied for quality control of three-phase load, for example, of asynchronous motor.

Keywords: current and voltage sensors, microprocessor, actual and reactive power, electrical power factor.

REFERENCES

1. Omelchenko E.Y., Tanich V.O., Maklakov A.S., Karyakina E.A. *Kratkii obzor i perspektivy primeneniya mikroprotsessornoi platformy Arduino* [Brief summary and prospects of application of Arduino microprocessor platform]. *Elektrotekhnicheskie komplekxy I sistemy* [Electro technical complexes and systems]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2013, vol. 21, pp. 28-33.
2. Mayevskiy, O.A. *Energeticheskie pokazateli ventilnykh preobrazovatelei* [Energy parameters of valve inverters]. Moscow: Energy, 1978.
3. Selivanov I.A., Omelchenko E.Y. *Elektromekhanicheskie svoistva asinhronnykh dvigatelei* [Electromechanical properties of asynchronous motors]. *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*, 2011, no.3(35). pp.35-38.

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ СБЫТОВОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

Условия работы энергосбытовых предприятий на оптовом рынке электроэнергии устанавливают жесткие требования к точности прогнозов, на основе которых происходит закуп объемов электроэнергии. Неточные прогнозы приводят к финансовым потерям на предприятии и снижают экономические показатели. Актуальная задача энергосбытовых предприятий – разработать математическую модель прогнозирования объемов электропотребления для получения прогнозов с заданной точностью. Для решения данной задачи в статье исследованы статистические методы, применяемые на промышленных предприятиях, исследованы факторы, влияющие на электропотребление региона. Для составления прогноза в качестве исходных данных использованы объемы потребления электроэнергии региона одного из энергосбытовых предприятий за 2013 год. По требованию предприятия погрешность прогноза должна быть менее 3%. В работе выполнено краткосрочное прогнозирование методом регрессионного анализа и методом главных компонент с учетом отобранных факторов. Доказано, что метод главных компонент является более эффективным для прогнозирования объемов электропотребления на энергосбытовом предприятии. Полученные результаты прогноза при использовании метода главных компонент имеют погрешность менее 3%.

Ключевые слова: регрессионный анализ, метод главных компонент, прогнозирование объемов потребления электроэнергии.

Основой финансового планирования и прогнозирования, а также эффективного управления и оптимизации объемов закупа и продаж товаров и услуг предприятия является прогнозирование данных процессов на основе использования временных рядов.

Они позволяют выявлять и изучать складывающиеся на предприятии закономерности на основе экономических и физических показателей в базах данных, что существенно увеличивает объемы входной информации для задачи прогнозирования.

С учетом того, что современные подходы к экономическому и техническому управлению предъявляют все более жесткие требования к точности прогнозирования, задача прогнозирования временных рядов усложняется одновременно с развитием информационных технологий.

Задача прогнозирования временных рядов актуальна в любое время и ее решение является неотъемлемой частью ежедневной работы большинства компаний. Данная задача решается созданием модели прогнозирования, адекватно описывающей исследуемый процесс.

В статье приведено описание построения математической модели с помощью метода главных компонент для составления прогноза объемов электроэнергии, которые необходимо закупать на оптовом рынке. Энергосбытовое предприятие является участником оптового рынка электроэнергии и посредником между рынком оптового закупа и конечным потребителем. Обычно объемы электроэнергии, которые энергосбытовому предприятию необходимо закупить на оптовом рынке, равны спрогнозированным объемам. При этом очень важно составить прогноз с наименьшей погрешностью. В случае составления неточного прогноза закупленного объема может не хватить потребителям либо останется из-

лишнее закупленный нереализованный объем электроэнергии. При отклонении фактически реализованного объема от спрогнозированного в большую или меньшую сторону энергосбытовое предприятие вынуждено докупать либо продавать излишне закупленную электроэнергию по невыгодной для предприятия цене на оптовом рынке [1]. Эти ситуации приводят к финансовым потерям предприятия. Кроме того, в случае больших погрешностей отклонения факта от плана на энергосбытовое предприятие накладываются штрафы, с возможным отстранением его от участия в торгах. Для возмещения финансовых затрат предприятие вынуждено поднимать цену на электроэнергию для потребителя. Недовольные потребители в этом случае могут перейти к другому гарантирующему поставщику для приобретения электроэнергии по более низкой цене [2,3].

Основным требованием при создании математической модели была точность прогнозирования, которая не должна превышать 3%.

Первым шагом при создании модели был выбор факторов, которые необходимо учитывать при составлении прогноза и которые оказывают влияние на прогноз. Учет большого количества факторов при составлении прогноза повышает точность прогноза. Среди множества факторов экспертно были отобраны те, которые могли оказывать влияние на исследуемое значение. Эта оценка не являлась окончательной. Возможны ситуации, когда экспертно отобранный в процессе анализа фактор, который, на первый взгляд, может оказывать существенное влияние, в результате расчета оказывается малозначимым. И наоборот, незначимый на взгляд эксперта фактор в результате расчетов показывает значительное влияние на исследуемый объект в конкретном случае. Для более точного отбора необходимо было проанализировать как можно большее количество

таких факторов. При этом внимание было уделено их доступности. Дело в том, что некоторые данные легко доступны, например, их можно извлечь из существующих информационных систем, они хранятся в архивных базах и просты к получению. Но есть информация, которую не просто собрать, в том числе и информация за давно прошедшие года, которые необходимо было изучить для исследования динамики изменения процессов [4]. В результате экспертного отбора факторов решено было оставить следующие: облачность, влажность, атмосферное давление, день недели, сезонность, температура воздуха, продолжительность светового дня, потребление электроэнергии в кВт·ч.

Анализ корреляции факторов показывает, что напрямую на изменение объемов электроэнергии влияют сезонность, температура окружающей среды и продолжительность светового дня. Основываясь на этих данных, можно спрогнозировать потребление электроэнергии (рис. 1).

Вторым шагом создания модели является выбор статистического метода, который будет использован в математической модели для построения прогноза. В настоящее время статистических методов известно большое количество и все они имеют свои достоинства и недостатки.

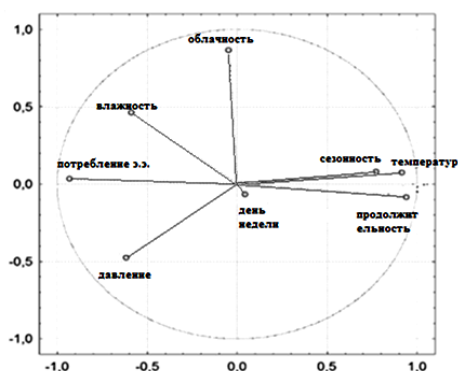


Рис. 1. Корреляция факторов

Выбор статистического метода – очень важный этап в задаче планирования и прогнозирования. Его необходимо выбирать под задачи и требования конкретного предприятия. Невозможно использовать один метод решая разные задачи, с разными поставленными условиями. При составлении прогнозов выбирают такой метод, который может учитывать специфику предприятия и давать прогнозы с заданной точностью. При рассмотрении методов прогнозирования на крупных предприятиях России, работающих в отрасли электроэнергетики, было выявлено, что все методы условно можно разбить на пять групп, в зависимости от общих принципов действия [5,6]:

- прогнозная экстраполяция;
- регрессионный анализ (прогнозирование с использованием искусственных нейронных сетей и на базе АРИМА моделей);
- адаптивные методы прогнозирования;
- прогнозирование с использованием гибридных

систем;

– техноценоз.

Анализ показал, что основным методом для составления прогноза являются методы регрессионного анализа. Этот метод включает в себя методы исследования регрессионной зависимости между величинами по статистическим данным. Цель регрессионного анализа состоит в определении общего вида уравнения регрессии, построении оценок неизвестных параметров, входящих в уравнение регрессии, и проверке статистических гипотез о регрессии. В методах регрессионного анализа различают линейную и множественную регрессию. Задача построения регрессии сводится к определению регрессионных коэффициентов на основе имеющихся данных об объекте прогноза и влияющих на него факторов. Таким образом, корреляционные и регрессионные методы могут учитывать влияние широкого набора параметров на выходную прогнозную величину электропотребления. Этим объясняется тот факт, что большинство из существующих прогнозных моделей электропотребления построено на основе этих методов [7]. В то же время получение прогнозов с помощью многофакторных регрессионных моделей предполагает неизменность значений коэффициентов этих моделей во времени [8]. А, как известно, в процессе работы предприятия возможно появление новой информации, что требует корректировки значений регрессионных коэффициентов его прогнозных моделей. Такая корректировка является весьма трудоемкой процедурой, требующей большого количества исходных данных и объемов вычислений. Этот факт наряду с весьма жесткими требованиями, предъявляемыми к исходной информации, приводит к тому, что динамическое изменение характеристик прогнозных моделей электропотребления промышленного предприятия зачастую невозможно. В ряде случаев требования прогнозных моделей к исходной информации для реальных наблюдений оказываются невыполнимыми, поэтому получаемые оценки оказываются неэффективными, а прогноз – неточным. Достаточно сложной является проблема выбора независимых влияющих факторов для регрессионной модели. Все это приводит к довольно сложной реализации многофакторных регрессионных прогнозных моделей электропотребления при условии соблюдения заданной точности прогноза. В то же время получение прогнозов с помощью многофакторных регрессионных моделей предполагает неизменность значений коэффициентов этих моделей во времени [9].

Наиболее часто используемая множественная линейная модель регрессионного анализа имеет вид:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \dots + \beta_j x_{ij} + \dots + \beta_k x_{ik} + \varepsilon_i, \quad (1)$$

где β_j — параметры регрессионной модели; ε_j — случайные ошибки наблюдения, не зависящие друг от друга, имеют нулевую среднюю и дисперсию σ_2 .

При составлении прогноза для сравнения использовались два статистических метода: метод рег-

рессионного анализа и метод главных компонент. Метод главных компонент пока мало применяется в России. Особенностью метода является способность уменьшить размерность данных, потеряв наименьшее количество информации. Используется в задачах для обработки многомерных наблюдений, когда исследователя интересуют лишь те признаки, которые обнаруживают наибольшую изменчивость при переходе от одного объекта к другому. Метод осуществляет переход к новой системе координат $U_1, \dots, U_p$ в исходном пространстве признаков $X_1, \dots, X_p$ которая является системой ортонормированных линейных комбинаций. Данный метод совмещает в себе достоинства многих других методов, в частности анализа Фурье и регрессионного анализа. Одновременно он отличается простотой и наглядностью в управлении. Базовый вариант метода состоит в преобразовании одномерного ряда в многомерный с помощью однопараметрической сдвиговой процедуры, в исследовании полученной многомерной траектории с помощью анализа главных компонент (сингулярного разложения) и восстановления (аппроксимации) ряда по выбранным главным компонентам. Таким образом, результатом применения метода является разложение временного ряда на простые компоненты: медленные тренды, сезонные и другие периодические или колебательные составляющие, а также шумовые компоненты. Полученное разложение может служить основой корректного прогнозирования как самого ряда, так и его отдельных составляющих.

Пусть экономический объект описывается набором признаков x_{ki}^0 , где i – номер признака ($i = 1, 2, 3, \dots, n$), k — обозначает момент времени ($k = 1, 2, 3, \dots, m$), n – количество признаков, m – количество моментов времени. Все значения каждого признака в различные моменты времени образуют временной ряд, который обозначается вектором $x_i = \{x_{1i}^0, x_{2i}^0, \dots, x_{ni}^0\}^T$. Таким образом, пространство признаков экономического объекта можно представить в виде матрицы временных рядов X^0 . Каждый столбец матрицы содержит все значения одного признака в различные моменты времени, а каждая строка включает значения всех признаков объекта в один момент времени. Таким образом, пространство признаков экономического объекта будет описываться матрицей: $X^0 = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n]$. Среднеарифметические значения признаков используются в качестве центра распределения пространства признаков. Отцентрированное пространство признаков будем описывать матрицей X . Дисперсии признаков экономического объекта представлены ковариационной матрицей, порядок которой равен размерности вектора исходных признаков. Ковариационная матрица определяется по формуле [10]

$$A = \frac{1}{n} X^T X. \quad (2)$$

Собственные векторы ковариационной матрицы A находятся из решения уравнения

$$(A - \lambda I)V_0 = 0, \quad (3)$$

где I – единичная матрица; V_0 – собственный вектор; λ – собственное значение.

В качестве исходных данных возьмем объемы электроэнергии, потребленные в 2013 году, а так же факторы, которые оказывали влияние на это: сезонность, температура и продолжительность дня. Прогнозирование выполнено с помощью нелинейной регрессионной модели и метода главных компонент. В качестве обучающей выборки были использованы данные за период с 01.01.2013 по 31.11.2013 со значениями за каждый день. Прогноз составлен на месяц вперед на каждый день. Расчет был выполнен с помощью программы МИДАС [11].

На рис. 2 показан составленный прогноз и фактические значения. Видно, что общие тенденции совпадают, но прогноз получился не точным. При использовании нелинейной регрессионной модели погрешность составляет 4,12% (рис. 2).

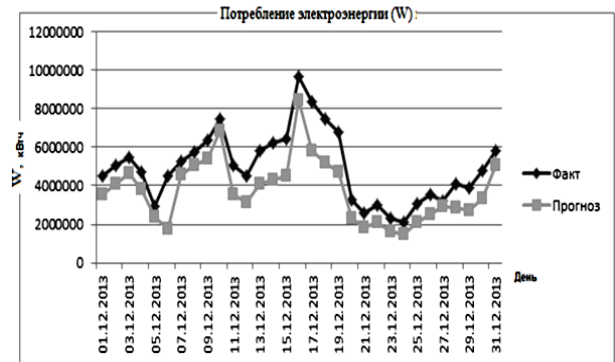


Рис. 2. Прогноз, полученный с помощью регрессионной модели

Рассмотрим обучающую выборку, фактические значения и рассчитанные программой (рис. 3). Выведем наложение значений за каждый день обучающей выборки в нормированных единицах, чтобы выявить, как точно системой удалось рассчитать фактические значения. Очевидно, что некоторые тенденции определены системой, но полного соответствия не достигнуто (см. рис. 3).

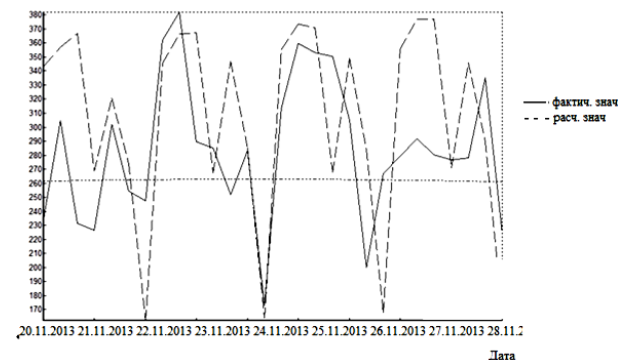


Рис. 3. Обучающая выборка

Результаты расчета методом главных компо-

нент показали, что погрешность составляет 2,94%. На рис. 4 показано сравнение фактических объемов с прогнозом, составленным методом главных компонент. На графике видны точки максимума, которые программа не смогла определить.

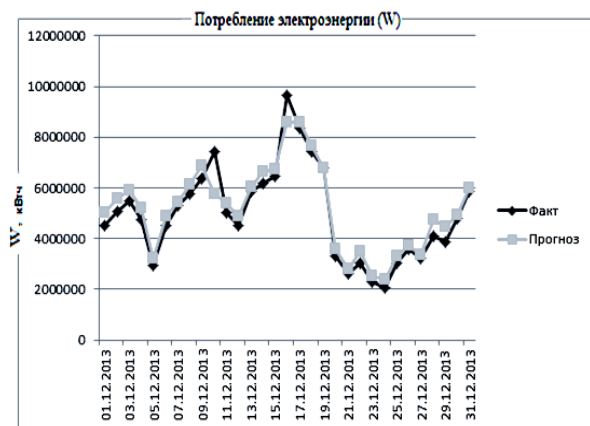


Рис. 4. Прогноз, полученный с помощью метода главных компонент

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На изменение объемов энергопотребления в данной задаче оказывают влияние сезонность, температура воздуха, продолжительность светового дня, и их необходимо учитывать при составлении прогноза.

2. Метод регрессионного анализа дает прогноз с большей погрешностью по сравнению с методом главных компонент, что связано с меньшим периодом обрабатываемой информации. Для составления точного прогноза методом регрессионного анализа рекомендуется брать большее количество данных для обучающей выборки.

3. Метод главных компонент удовлетворяет требованиям к прогнозированию объемов потребления электроэнергии и позволяет получить прогноз с погрешностью менее 3%, а именно 2,94. Неучтен-

ные максимумы могут быть связаны с ошибками в исходных данных и требуют дополнительного исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федеральный портал PORTOWN. RU. Энергоэффективность России. URL: <http://www.portown.ru/information/hide/7938.html>
2. Суднова В.В., Якимов А.Е. Повышение качества планирования электропотребления на основе статистического анализа // Электричество. 1992. № 5. С.12 – 16.
3. Пути и результаты совершенствования методов прогнозирования электропотребления / А.В. Белан, В.И. Гордеев, А.В. Демур, И.И. Надтока // Промышленная энергетика. 1993. № 9. 10. С. 23-26.
4. Айвазян С.А., Мхитарян В.С. Прикладная статистика и основы эконометрики. М.: Юнити, 1998. 1022 с.
5. Анализ и прогнозирование энергопотребления в Мурманской области / В. И. Щуцкий, Н.М. Кузнецов, Е.А. Токарева, С.А. Фищук // Промышленная энергетика. 1998. № 10. С. 5 – 9.
6. Использование современных подходов и методов для прогнозирования электропотребления / Ю.А. Борцов, Н.Д. Поляхов, И.А. Приходько, Е.С. Анушина // Электротехника. 2006. № 8. С. 30-35.
7. Кудрин Б.И., Мозгалин А.В. Методика обеспечения почасового прогнозирования электропотребления предприятий с учетом погодных факторов // Вестник МЭИ. 2007. №2. С. 45-47.
8. Никифоров, Г.В. Совершенствование нормирования и планирования электропотребления в промышленном производстве // Промышленная энергетика. 1999. №3. С. 27-29.
9. Никифоров, Г. В. Анализ устойчивости регрессионных моделей электропотребления // Промышленная энергетика. 1999. №12. С. 18-20.
10. Определение параметров, влияющих на электропотребление промышленного предприятия с помощью метода экспертных оценок / И. В. Воронов, Е. А. Политов, В. М. Ефременко // Вестник КузГТУ. 2009. №5. С. 61-64.
11. Грачева Е.И., Саитбаталова Р.С. Определение расхода электроэнергии на основе математической модели // Промышленная энергетика. 1999. №4. С. 24-25.

INFORMATION IN ENGLISH

RESEARCH OF FORECASTING METHODS OF ELECTRICITY CONSUMPTION IN POWER ENTERPRISES

Kirpichnikova I.M., Solomakho K.L.

The conditions of work in energy retail companies in the wholesale electricity market set rigid requirements for accuracy of forecasts on the basis of which certain amounts of electricity are purchased. Inaccurate forecasts lead to financial losses in the company and reduce economic indicators. The urgent task of energy retail companies is the development of a mathematical model for energy consumption volumes forecasting to get forecasts with a prescribed accuracy. To solve this task in the article the statistical methods used in industry companies are explored and the factors influencing energy consumption in the region are researched. To make a forecast electricity consumption volumes of one of the region's energy retail companies in 2013 are used as inputs. The forecast error should be less than 3% at the request of the company. The short-term forecasting performed by regression

analysis method and principal components method taking into account the selected factors is done in the research work. It is proved that the principal components method is more effective for predicting the electricity consumption volumes in the energy retail company. The results of forecast using the principal components method have an error of less than 3%.

Keywords: regression analysis, principal components method, forecasting of electricity consumption.

REFERENCES

1. Federal portal PORTOWN. RU. *Energoeffektivnost Rossii* [Energy efficiency of Russia]. URL: <http://www.portown.ru/information/hide/7938.html>
2. Sudnova V.V., Jakimov V.V. *Povyshenie kachestva planirovaniya elektropotrebleniya na osnove statisticheskogo*

analiza [Planning quality improvement of energy consumption on the basis of static analysis]. *Elektrichestvo* [Electricity]. 1992, no. 5, pp.12 – 16.

3. Belan A.V., Gordeev V.I., Demura A.V., Nadtocha I.I. *Puti i rezultaty sovershenstvovaniya metodov prognozirovaniya elektropotrebleniya* [Ways and results of improvement of energy consumption forecasting methods]. *Promishlennaya energetika* [Industrial power engineering]. 1993, no. 9–10, pp. 23-26.

4. Ajvazjan S.A., Mhitarjan V.S. *Prikladnaya statistika i osnovy ekonometriki* [Applied statistics and fundamentals of econometrics]. Moscow: Unity, 1998, 1022 p.

5. Shuckij V.I., Kuznetsov E.A., Tokareva N.M., Fishhuk S.A. *Analiz i prognozirovaniye energopotrebleniya v Murmanskoy oblasti* [Analysis and forecasting of energy consumption in Murmansk region]. *Promishlennaya energetika* [Industrial power engineering]. 1998, no.10, pp. 5-9.

6. Bortsov Ju.A., Poljahov N. D., Prihodko I.A., Anushina E.S. *Ispolzovanie sovremennykh podhodov i metodov dlja prognozirovaniya elektropotrebleniya* [Application of advanced approaches and methods of energy consumption forecasting]. *Elektrotehnika* [Electrical power engineering]. 2006, no.8, pp.30-35.

7. Kudrin B.I. *Metodika obespecheniya pochasovogo prognozirovaniya elektropotrebleniya predpriyatij s uchetom*

pogodnykh faktorov [Method of hourly forecast of enterprise power consumption taking into account weather conditions]. *Vestnik MEI* [Bulletin of MPEI]. 2007, no.2, pp.105-108.

8. Nikiforov G.V. *Sovershenstvovanie normirovaniya i planirovaniya elektropotrebleniya v promyshlennom proizvodstve* [Improvement of power consumption control and planning in industrial production]. *Industrial power engineering*, 1999, no 3, pp.27-29.

9. Nikiforov G. V. [Analiz ustojchivosti regressionnykh modelej elektropotrebleniya] *Analysis of stability for regression models of energy consumption. Promishlennaya energetika* [Industrial power engineering]. 1999, no.12, pp.18-20.

10. Voronov I.V., Poletov Ye.A., Yermenko V.M. *Opredelenie parametrov, vliyayushhih na elektropotreblenie promyshlennogo predpriyatija s pomoshchju metoda ekspertnykh otsenok* [Determination of parameters influencing power consumption of industrial enterprises using expert evaluation method]. *Vestnik KuzGTU* [Bulletin of KuzGTU]. 2009, no.5, pp. 61-64.

11. Gracheva E.I., Saitbatalova R.S. *Opredelenie rashoda elektrojenergii na osnove matematicheskoy modeli* [Calculation of electric power consumption on the basis of mathematical model]. *Promishlennaya energetika* [Industrial power engineering]. 1999, no.4, pp. 24-25.

УДК 621.316.11

Малафеев А.В., Крубцова А.А.

ПЛАНИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРЕДПРИЯТИЯ НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ НЕЧЕТКИХ МНОЖЕСТВ

Статья посвящена краткосрочному и среднесрочному планированию режима системы электроснабжения металлургического предприятия на примере ОАО «ММК». Прогнозирование электрических нагрузок производственных подразделений предлагается осуществлять на основе теории нечетких множеств. На основе прогнозных графиков нагрузки выполнены расчеты основных параметров режима для периодов планирования от суток до года с различными интервалами осреднения. По результатам сопоставления параметров режима, соответствующих зарегистрированным и расчетным графикам, оценена погрешность предлагаемого подхода и сделан вывод о его применимости.

Ключевые слова: система электроснабжения, планирование режима, период планирования, неопределенность информации, электрические нагрузки, нечеткие интервалы, функция принадлежности, интервал осреднения графика.

ВВЕДЕНИЕ

Характерной особенностью графиков нагрузки металлургических предприятий на уровне 6-10 кВ является неоднозначность вероятностных характеристик, что делает неприемлемым использование для анализа режимов величин, связанных с нормальным законом распределения.

Таким образом, актуальность статьи определяется необходимостью планирования краткосрочных режимов внутривоздушных сетей с целью снижения потерь электроэнергии, ограничения загрузки оборудования, поддержания напряжения в заданных пределах при отсутствии полной информации о прогнозируемых величинах электрических нагрузок в узлах сети 6-10 кВ. Для учета неопределенности электрических нагрузок в работе предлагается использовать аппарат теории нечетких множеств.

В качестве объекта исследования были выбраны системы электроснабжения подразделений ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» – районы доменного, сортового цехов, ЛПЦ-5, ЛПЦ-8, кислородной станции №5.

В настоящей работе для оценки возможности использования теории нечетких множеств для планирования режимов системы электроснабжения на различные периоды времени решены следующие задачи:

- проведено исследование упорядоченных графиков основных параметров режима как нечетких интервалов на характер функции принадлежности;
- осуществлены расчеты параметров режима системы электроснабжения на примере исследуемых объектов с интервалами осреднения 3 мин., полчаса, час
- при краткосрочном планировании и 1 сутки,

1 месяц – при среднесрочном планировании;
– определена погрешность расчета параметров режима при использовании выбранной функции принадлежности для оценки адекватности предлагаемого подхода.

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЧЕТКИХ ИНТЕРВАЛОВ ДЛЯ ПЛАНИРОВАНИЯ РЕЖИМОВ

Использование нечетких интервалов для определения графиков нагрузки допускает аналитическое представление в виде некоторого простого математического выражения. В теории нечетких множеств построение функции принадлежности по распределению результатов наблюдений аналогично функции распределения случайной величины и осуществляется по выборке экспериментальных данных. В качестве лингвистической переменной [1] можно принять активную нагрузку системы электроснабжения ОАО «ММК». Примем допущение, что $\text{tg}\phi$ всех фидеров подстанции равны.

При планировании эксплуатационных режимов систем электроснабжения металлургических предприятий весьма важным является учет планового объема заказов на готовую продукцию и связанный с этим объем производства по основным переделам. Объем продукции и характер технологического процесса являются решающими факторами при формировании прогнозных графиков нагрузки. Технологические процессы цехов ОАО «ММК» достаточно разнообразны, что обуславливает разные технологические процессы и разный характер электрических нагрузок, которые, в свою очередь, тесно связаны с объемом производства готовой продукции.

С целью планирования параметров режима графики нагрузки целесообразно разделить на пять характерных областей, соответствующих различной производительности цехов, а именно:

- 1) режим наименьших нагрузок для интервала $[P_{\min}, P_1]$;
- 2) режим малых нагрузок для интервала $[P_1, P_2]$;
- 3) режим средних нагрузок для интервала $[P_2, P_3]$;
- 4) режим больших нагрузок для интервала $[P_3, P_4]$;
- 5) режим наибольших нагрузок для интервала $[P_4, P_{\max}]$.

Упорядоченный график электрических нагрузок в виде нечеткого интервала с нанесенными термами, соответствующими пяти указанным режимам, показан на рис. 1.



Рис. 1. К определению лингвистической переменной «активная мощность»

Графики электрических нагрузок металлургического предприятия, упорядоченные по убыванию, практически во всех случаях схожи с Z-образной функцией принадлежности [2]. На рис. 2 в качестве примера приведены графики нагрузки доменного цеха.

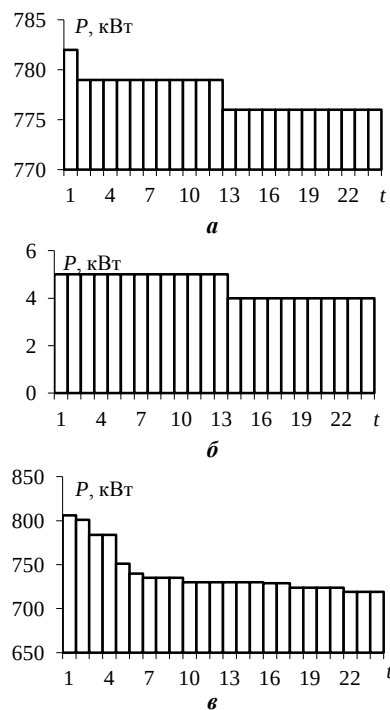


Рис. 2. Упорядоченные графики суточной нагрузки фидеров подстанции №2:
а - 2-31; б - 2-34; в - 2-48

Для оценки возможности применения Z-образной функции принадлежности для планирования краткосрочных и среднесрочных режимов в системе электроснабжения с целью снижения потерь электроэнергии, ограничения загрузки оборудования, поддержания напряжения в заданных пределах при отсутствии полной информации о прогнозируемых величинах сравним реальные графики нагрузок с графиками, рассчитанными с помощью Z-образной функции принадлежности.

Для наглядного представления схожести графиков электрических нагрузок с Z-образной функцией принадлежности на рис. 3 в одних осях показаны реальный и расчетный графики.

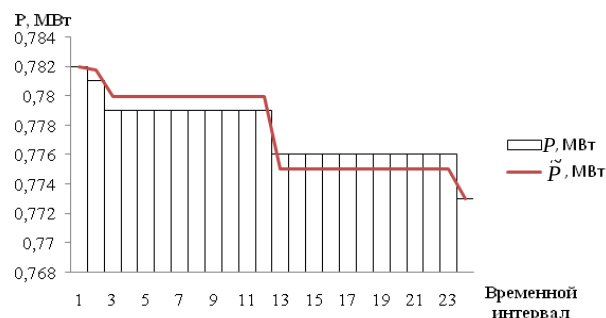


Рис. 3. Совмещенный график Z-образной функции принадлежности и нагрузки фидера 2-31 подстанции №2 в упорядоченной форме

Применительно к случайной величине электрической нагрузки функция принадлежности выглядит следующим образом [1]:

$$\mu_Z(P_i; P_{\min}, P_{\max}) = \begin{cases} 1, & P_i \leq P_{\min} \\ 1 - 2 \left(\frac{P_i - P_{\min}}{P_{\max} - P_{\min}} \right)^2, & P_{\min} < P_i \leq \frac{P_{\min} + P_{\max}}{2} \\ 2 \left(\frac{P_{\max} - P_i}{P_{\max} - P_{\min}} \right)^2, & \frac{P_{\min} + P_{\max}}{2} < P_i < P_{\max} \\ 0, & P_{\max} \leq P_i \end{cases} \quad (1)$$

где $P_{\max}$ – максимальная активная мощность; $P_{\min}$ – минимальная активная мощность; P_i – текущее значение активной мощности.

Для расчета графиков нагрузки как нечетких интервалов было принято выражение

$$\tilde{P} = P_{\min} + (P_{\max} - P_{\min}) \cdot r_P(P_i). \quad (2)$$

где $\tilde{P}$ – нечеткая величина электрической нагрузки; r_P – коэффициент соответствия между лингвистическим и числовым значениями нагрузки.

Замена реальных графиков нагрузки их нечеткими интервалами позволяет определить нечеткие интервалы для параметров режима системы электроснабжения.

Для выявления характера функции принадлежности без привязки к конкретному технологическому процессу предлагается использовать коэффициент характера функции принадлежности

$$k_{\text{хфп}} = k_{\text{зп}} \cdot k_{\text{фг}} = \frac{P_{\text{с.к}}}{P_{\max}}. \quad (3)$$

Как показывают расчеты, если коэффициент характера функции принадлежности больше 0,5, то для планирования электрических нагрузок в сетях металлургических предприятий целесообразно применять Z-образную функцию принадлежности в соответствии с выражением (2).

Если коэффициент характера функции принадлежности меньше 0,5, то для корректного использования Z-образной функции принадлежности при планировании графиков электрических нагрузок по активной мощности целесообразно скорректировать выражение для Z-образной функции принадлежности с учетом 10-процентной погрешности расчета графика электрической нагрузки следующим образом:

$$k_{\text{кр}} = \begin{cases} (P_{\max} - P_{\min}) / P_{\min}, & P_{\min} < P_i < P_{\max} \\ 0, & P_i = P_{\min} \\ 1, & P_i = P_{\max} \end{cases} \quad (4)$$

$$\tilde{P}_{\text{кр}} = \tilde{P} \cdot k_{\text{кр}}. \quad (5)$$

Расчетные значения ступеней графика нагрузки

с учетом рассмотренной корректировки на примере одного из присоединений ПС-31а приведены в табл. 1, графики показаны на рис. 4.

Таблица 1

Результаты расчета ординат скорректированного графика электрических нагрузок на примере фидера 31а-03 ПС № 31а ОАО «ММК»

Временные интервалы	P , кВт	μ	$\Delta \tilde{P}$, кВт	$k_{\text{кр}}$	$\Delta \tilde{P}_{\text{кр}}$, кВт	P , %
00:00	41	0,0000	45	1,0994	49	1,000
02:00	24	0,4132	26	1,0994	28	1,171
04:00	24	0,4132	26	1,0994	28	1,171
06:00	21	0,5868	23	1,0994	25	1,016
08:00	17	0,7356	19	1,0994	21	0,859
10:00	14	0,8514	15	1,0994	21	0,725
12:00	14	0,8514	15	1,0994	21	0,725
14:00	10	0,9338	11	1,0994	12	0,633
16:00	10	0,9338	11	1,0994	12	0,633
18:00	10	0,9338	11	1,0994	12	0,633
20:00	7	0,9835	8	1,0994	5	0,650
22:00	7	0,9835	8	1,0994	5	0,650
23:00	3	1	4	1,0994	4	1

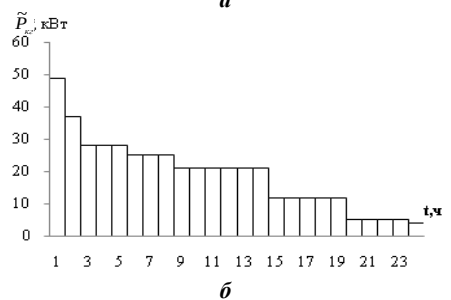
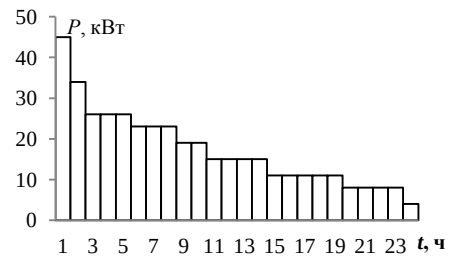


Рис. 4. Графики электрических нагрузок на примере фидера 31а-03 ПС 31а ОАО «ММК»: а - реальный; б - скорректированный расчетный

Как видно из табл. 2, для сортового цеха целесообразно корректировать расчетные графики на-

грузки, так как $k_{\text{хфп}}$ для него менее 0,5.

тервалом 1 мес.

Таблица 2

Результаты расчета коэффициента характера функции принадлежности	
Цех	$k_{\text{хфп}}$
Доменный цех	0,961
Сортовой цех	0,331
ЛПЦ-5	0,854
ЛПЦ-8	0,895
Кислородная станция №5	0,892

ОЦЕНКА ПРИМЕНИМОСТИ ПРЕДЛАГАЕМОГО ПОДХОДА

Для расчета параметров режима использован программный комплекс КАТРАН [3], разработанный на кафедре ЭПП МГТУ им. Г.И. Носова. Для оценки адекватности предлагаемого подхода целесообразно рассчитать погрешность расчета параметров режима с интервалами осреднения 3 мин, полчаса, час применительно к краткосрочному планированию, а также сутки и месяц – к среднесрочному планированию.

Погрешность расчета параметров режима находилась как разность расчетных параметров, определяемых по замеренным графикам нагрузки, и графикам нагрузки, заданных при помощи предложенного математического аппарата (табл. 3).

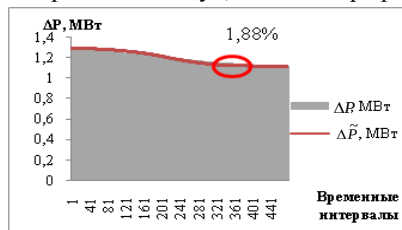
На рис. 5, 6 приведены графики потерь активной мощности при краткосрочном и среднесрочном планировании [4, 5] на сутки, месяц и год. Суточные графики построены для интервалов осреднения 3 мин, 30 мин и 1 ч, месячный график построен для интервала осреднения 1 сут, годового график – с ин-

Таблица 3

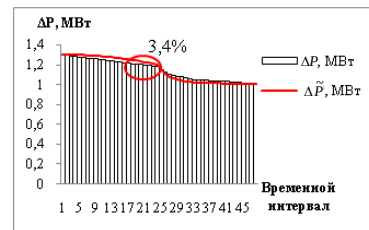
Расчетные потери активной мощности в системе электроснабжения доменного цеха с использованием Z-образной функции принадлежности для краткосрочного планирования с интервалом осреднения 1 ч

Временные интервалы	ΔP , МВт	$\mu(\Delta P)$	$\Delta \tilde{P}$, МВт	$\mu(\Delta \tilde{P})$	$\delta(\Delta P)$, МВт	$\delta(\Delta P)$, %
0	1,227	0	1,227	0	0	0
2	1,171	0,17	1,194	0,12	-0,00211	-0,72
4	1,159	0,24	1,180	0,19	-0,00192	-0,66
6	1,142	0,38	1,152	0,34	-0,00131	-0,46
8	1,122	0,57	1,115	0,57	0	0
10	1,112	0,66	1,098	0,67	0,00034	0,12
12	1,101	0,75	1,081	0,76	0,00062	0,23
14	1,093	0,80	1,071	0,82	0,00091	0,33
16	1,065	0,94	1,043	0,95	0,00095	0,36
18	1,054	0,97	1,037	0,98	0,001265	0,48
20	1,044	0,99	1,033	0,99	0,00392	1,50
22	1,036	1,00	1,032	1,00	0,01182	1,61
23	1,032	1	1,032	1	0	0

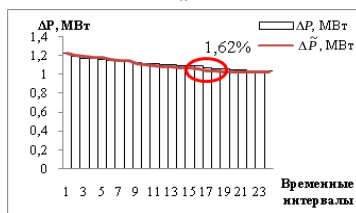
Графики потерь активной мощности с интервалом осреднения 3 мин визуально можно разделить на несколько линейных отрезков, соответственно при использовании Z-образной функции принадлежности, не являющейся линейной, имеет место погрешность. Для доменного цеха ОАО «ММК» погрешность расчета потерь активной мощности не превысила 4%: для суточных графиков с интервалом 3 мин – 1,88%, полчаса – 3,4%, час – 1,62%, для месячных графиков – 2,27%, для годовых графиков – 2,05%.



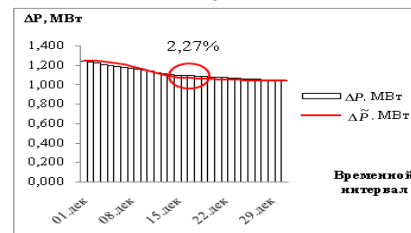
а



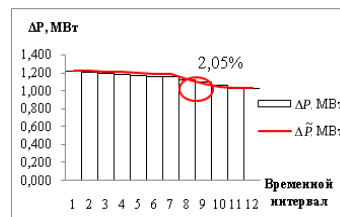
б



в



г



д

Рис. 5. Расчетные потери активной мощности в системе электроснабжения доменного цеха с интервалами осреднения: а - 3 минуты; б - полчаса; в - час; г - сутки; д - месяц

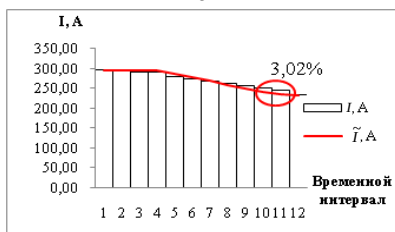
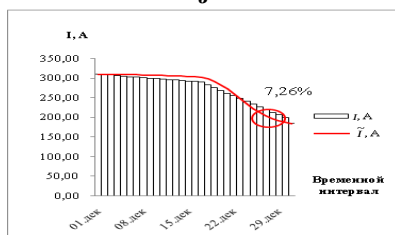
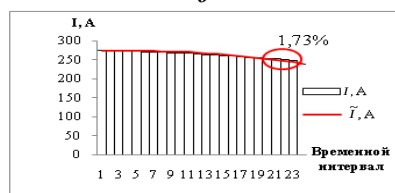
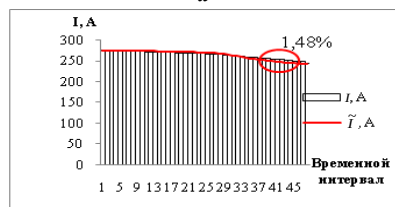
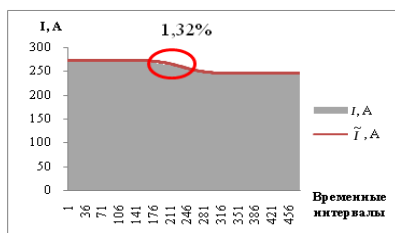


Рис. 6. Расчетный ток для ф.2-31 в системе электроснабжения доменного цеха с интервалами осреднения:

а - 3 минуты; б - пол часа; в - час; г - сутки; д - месяц

Для доменного цеха погрешность расчета токовой нагрузки не превысила 8%: для суточных графиков с интервалом осреднения 3 мин – 1,32%, пол часа – 1,48%, час – 1,73%, для месячных графиков – 7,26%, для годовых графиков – 3,02%.

Графики напряжений, полученные по расчетным графикам нагрузки, практически не отличаются от графиков, рассчитанных по замеренным нагрузкам. Так, для доменного цеха ОАО «ММК» погрешность расчета напряжения не превысила 1%: для суточных графиков с интервалом осреднения 3 мин – 0,09%, пол часа – 0,13%, час – 0,24%; для месячных графиков – 0,75%, для годовых графиков – 0,89%. Результаты расчета погрешности сведены в табл. 4–6.

Таблица 4
Систематическая погрешность расчета потерь активной мощности для цехов ОАО «ММК», %

Цех	Краткосрочное планирование режима на сутки			Среднесрочное планирование режима	
	3 мин	Пол-часа	Час	На месяц; интервал осреднения – сутки	На год; интервал осреднения – месяц
Доменный цех	1,88	3,4	1,62	2,27	2,05
Сортовой цех	0,7	7,15	1,44	4,77	1,46
Кислородная станция № 5	0,44	7,01	0,83	6,36	2,22
ЛПЦ-5	0,84	4,59	1,82	0,33	0,31
ЛПЦ-8	0,843	1,43	0,95	2,4	2,4

Таблица 5
Систематическая погрешность расчета токовой нагрузки для цеховых подстанций ОАО «ММК», %

Цех	Краткосрочное планирование режима на сутки			Среднесрочное планирование режима	
	3 мин	Пол-часа	Час	На месяц; интервал осреднения – сутки	На год; интервал осреднения – месяц
Доменный цех, ф.2-31	1,32	1,48	1,73	7,26	3,02
Сортовой цех, ф.64-24	6,67	9	8,7	3,15	0,94
Кислородная станция № 5, ф.86-01	0,33	0,54	0,38	4,7	4,1
ЛПЦ-5, ф.94-25	7,61	6,93	5,83	8,22	3,76
ЛПЦ-8, ф.88-13	8,8	2,63	4,9	9,52	4,78

Таблица 6
Систематическая погрешность расчета напряжения на шинах цеховых подстанций, %

Цех	Краткосрочное планирование режима на сутки			Среднесрочное планирование режима	
	3 мин	Пол-часа	Час	На месяц; интервал осреднения – сутки	На год; интервал осреднения – месяц
Доменный цех, ПС-2	0,09	0,13	0,24	0,89	0,75
Сортовой цех, ПС-64	0,41	0,11	0,11	0,28	0,26
Кислородная станция №5, ПС-86	0,02	0,65	0,62	0,94	0,52
ЛПЦ-5, ПС-94	0,086	0,21	0,37	0,14	0,11
ЛПЦ-8, ПС-88	0,05	0,59	0,92	0,2	0,2

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В работе предложен аппарат теории нечетких множеств для математического представления графиков электрических нагрузок металлургического предприятия на примере ОАО «ММК» при планировании режимов системы электроснабжения на

период от суток до года.

2. Выявлены обобщенные показатели графиков нагрузки, позволяющие определить характер функции принадлежности без привязки к конкретному производственному процессу. Результаты расчета показали, что целесообразно для цеха улавливания и переработки химических продуктов, сортового цеха, ЛПЦ-10, ККЦ осуществлять корректировку расчетных графиков электрических нагрузок, полученных при помощи Z-образной функции принадлежности, для других цехов этого делать не требуется.

3. Расчеты режимов системы электроснабжения ОАО «ММК» при использовании предлагаемого математического аппарата для различных интервалов планирования и различных интервалов осреднения прогнозных графиков нагрузки показали, что наименьшую погрешность расчета параметров режима для краткосрочного планирования дают графики с 3-минутным интервалом осреднения (для большинства цехов – не более 2%). Наибольшая погрешность при использовании графиков с различными интервалами осреднения не превысила 10%. Погрешность расчета параметров режима при среднесрочном планировании также не превысила 10%, что допустимо в рамках решаемой задачи.

4. На основании выполненных исследований можно сделать вывод, что представление графиков электрических нагрузок в виде нечетких интервалов

с Z-образной функцией принадлежности не вносит существенных погрешностей в расчеты установившихся режимов и применительно к металлургическим предприятиям может быть использовано как при краткосрочном, так и при среднесрочном планировании эксплуатационных режимов систем электроснабжения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Конышева Л.К., Назаров Д.М. Основы теории нечетких множеств: учеб. пособие. СПб.: Питер, 2011. 192 с.
2. Малафеев А.В., Антоненко А.А. Математическое представление электрических нагрузок промышленных предприятий в задаче определения потерь электроэнергии с использованием аппарата теории нечетких множеств // Промышленная энергетика. 2013. №1. С. 9-13.
3. А.с. 2012612069 РФ. Программа «Комплекс автоматизированного режимного анализа КАТРАН 6.0»/ В.А. Игуменцев, А.В. Малафеев, О.В. Буланова, Ю.Н. Ротанова, Е.А. Панова, А.В. Хламова, В.М. Тарасов, Е.Б. Ягольникова, Н.А. Николаев, В.В. Зиновьев. // Программы для ЭВМ, БД, ТИМС. 2012. №2. С. 500-501.
4. Parmar J. Total Losses in Power Distribution and Transmission Lines (Part 1). Gujarat, 2013. Mode of access: <http://electrical-engineering-portal.com/total-losses-in-power-distribution-and-transmission-lines-1>, free. Title from screen.
5. Parmar J. Total Losses in Power Distribution and Transmission Lines (Part 2). Gujarat, 2014. Mode of access: <http://electrical-engineering-portal.com/total-losses-in-power-distribution-and-transmission-lines-1>, free. Title from screen.

INFORMATION IN ENGLISH

POWER SUPPLY SYSTEM OPERATION PLANNING OF METALLURGICAL ENTERPRISE BASED ON FUZZY SETS THEORY

Malafeev A.V., Krubtsova A.A.

The paper is devoted to the short-term and medium-term planning mode of power supply system at a metallurgical plant and OJSC "MMK" is taken as an example. It is suggested to implement electric load forecasting for various production departments on the basis of the theory of fuzzy sets. On the basis of the forecast load graphics the authors calculated the basic mode parameters for planning periods from days to years at various intervals of averaging. By comparing the results of the mode parameters, corresponding to the registered and calculated graphics, they estimated the error of the proposed approach and came to the conclusion of its applicability.

Keywords: power supply system, mode planning, planning period, information uncertainty, electric loads, fuzzy intervals, membership function, graphic averaging interval.

REFERENCES

1. Konysheva L.K., Nazarov D.M. *Osnovy teorii nechetkikh mnozhestv* [Fundamentals of the fuzzy sets theory]: study guide. Saint-Petersburg: Peter, 2011. 192 p.
2. Malafeev A.V., Antonenko A.A. *Matematicheskoe predstavlenie elektricheskikh nagruzok promyshlennykh predpriyatii v zadache opredeleniya poter elektroenergii s*

ispolzovaniem apparata teorii nechetkikh mnozhestv [Mathematical representation of electrical loads of industrial enterprises in the problem of determining electric power losses using the apparatus of the fuzzy sets theory]. *Promishlennaya energetika* [Industrial power engineering], 2013, no.1, pp. 9-13.

3. Igumenshchev V.A., Malafeev A.V., Bulanov O.V., Rotanova Y.N., Panova E.A., Khlamova A.V., Tarasov V.M., Yagolnikova E.B., Nikolaev N.A., Zinovyev V.V. Author's certificate No. 2012612069 Russian Federation. The program "The Complex of Automated Mode Analysis KATRAN 6.0". – Published in bul. "Computer Programs. Databases. Topographies of integrated circuits", 2012, no.2, pp. 500-501.
4. Parmar J. Total Losses in Power Distribution and Transmission Lines (Part 1). Gujarat, 2013. Mode of access: <http://electrical-engineering-portal.com/total-losses-in-power-distribution-and-transmission-lines-1>, free. Title from screen.
5. Parmar J. Total Losses in Power Distribution and Transmission Lines (Part 2). Gujarat, 2014. Mode of access: <http://electrical-engineering-portal.com/total-losses-in-power-distribution-and-transmission-lines-1>, free. Title from screen.

Кочкина А.В., Малафеев А.В., Варганов Д.Е., Курилова Н.А., Дубина И.А.

МЕТОДИКА ОПТИМИЗАЦИИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ РЕЖИМОВ ПРОМЫШЛЕННЫХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

В данной статье рассматриваются вопросы оптимизации режимов промышленных систем электроснабжения с собственными источниками электрической энергии с использованием оригинального программного обеспечения «КАТРАН 7.0», позволяющего определять оптимальные загрузки турбогенераторов электростанций методом динамического программирования в сочетании с модифицированным методом последовательного эквивалентирования, учитывая при этом потери мощности в распределительных электрических сетях, разнородность используемого топлива, неблочность тепловых схем электростанций. Приведена методика оптимизации эксплуатационных режимов систем электроснабжения крупных промышленных предприятий. Расчет экономически целесообразных режимов осуществляется в условиях системы электроснабжения крупного предприятия черной металлургии. Результаты работы предназначены для использования в диспетчерских службах промышленных предприятий.

Ключевые слова: турбогенератор, котлоагрегат, оптимальный эксплуатационный режим, электростанция, промышленное предприятие, система электроснабжения, себестоимость пара, выработка электроэнергии.

Вопросами оптимизации электроэнергетических систем и систем электроснабжения промышленных предприятий российские ученые занимаются с начала двадцатого столетия. В.А. Веников в своих работах [1] рассматривает задачи оптимального распределения активной мощности между генераторами электростанций, электрической нагрузки в энергосистеме, реактивных нагрузок. В работах Д.А. Арзамасцева [2, 3] приведен алгоритм определения оптимального распределения реактивной мощности в условиях промышленных систем электроснабжения на основе метода последовательного эквивалентирования и метода неопределенных множителей Лагранжа при условии сохранения баланса мощностей в узле и допустимого уровня напряжения. В качестве целевой функции приняты суммарные затраты на производство и распределение реактивной мощности, приведенные к потерям активной мощности. Также с целью оптимизации режимов электроэнергетических систем используются методы сепарабельного и аппроксимирующего программирования, аппроксимирующие целевую функцию с помощью отрезков кривых и тем самым приводят решение оптимизационной задачи к методам линейного программирования [4]. В [5] А.С. Бердиным приводится методика, позволяющая анализировать и определять стратегию развития систем электроснабжения, основанная на подходе и теории нечетких множеств, учитывающая «... неопределенность части исходной информации». Б.И. Гольденблат в своей работе [6] ставит основные задачи оптимизации режимов систем электроснабжения и выбор соответствующих им методов. В [7] рассматриваются современные подходы оптимизации режимов электроэнергетических систем за счет комплексного регулирования их параметров. Анализ печатных работ показал, что существующие методы оптимизации ориентированы в основном на электроэнергетические системы и возникает необходимость разработки алгоритмов и методов оптимизации промышленных систем электроснабжения

с собственными источниками электрической энергии.

На кафедре электроснабжения промышленных предприятий ФГБОУ ВПО «МГТУ» разрабатывается и внедряется программно-вычислительный комплекс (ПВК) «КАТРАН 7.0», в состав которого входит модуль «Оптимизация» (главное окно модуля приведено на рис. 1), позволяющий определять оптимальные загрузки генераторов собственных электростанций (ЭС) промышленных энергоузлов с учетом потерь мощности в распределительных сетях, приема из энергосистемы, отличительных особенностей тепловых схем ЭС, разнородности используемых энергетических ресурсов.

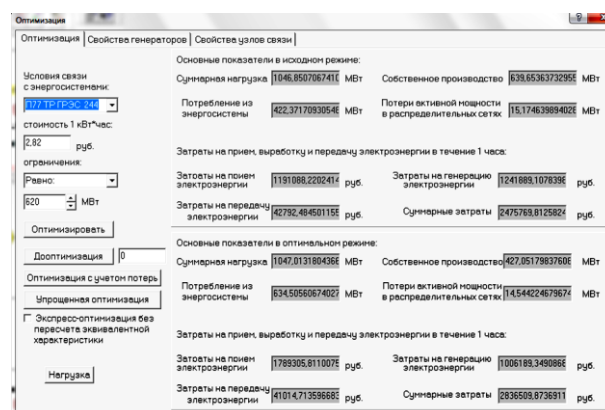


Рис. 1. Окно «Оптимизация» ПВК «КАТРАН 7.0»

Разработанный метод оптимизации основан на сочетании модифицированных методов динамического программирования и последовательного эквивалентирования, позволяющих задавать исходную информацию в табличной форме, целевую функцию, имеющую точки перегиба и разрывы, основные положения изложены в [8]. Критерием оптимальности является минимум затрат на мощность и тепло, вырабатываемое собственными источниками электроэнергии, и на потери мощности в распределительной сети промышленного энергоузла. Таким

образом, разработанный модуль позволяет осуществлять оптимизацию режимов систем электроснабжения:

- без учета потерь в сети;
- с учетом потерь в сети при условии декомпозиции общей задачи оптимизации с использованием метода покоординатного спуска – «Дооптимизация»;
- с учетом потерь в сети методом динамического программирования;
- с учетом потерь в сети и приема мощности из энергосистемы методом динамического программирования.

С целью оптимизации эксплуатационных режимов промышленных систем электроснабжения авторами была разработана методика оптимизации, представленная на **рис. 2**.

В качестве исходной информации необходимы: режимные карты котлов, диаграммы режимов турбогенераторов (ТГ), тепловые схемы собственных электростанций, электрические схемы рассматриваемой промышленной системы электроснабжения, величины электрических и тепловых нагрузок потребителей, величина мощности, потребляемой из энергосистемы, стоимостные показатели энергетических ресурсов – покупных (например, энергетиче-

ский уголь и природный газ) и вторичных (доменный, коксовый и конверторный газы).

На основании исходных данных рассчитывается себестоимость пара, вырабатываемого на собственных ЭС, методика определения изложена в [9]. Далее строятся технико-экономические (ТЭМ) модели ТГ, представляющие собой зависимость мощности на клеммах генераторов от себестоимости 1 т свежего пара.

Таким образом, в ПВК «КАТРАН 7.0» проектируется схема электроснабжения; задаются номинальные параметры элементов сети и нагрузки; вводятся ТЭМ (**рис. 3**) и мощность, принимаемая из энергосистемы, а также её стоимость.

Модуль «Оптимизация» позволяет определять рекомендуемую нагрузку генераторов, затраты на прием, передачу и выработку электроэнергии, а также суммарные затраты при различных условиях связи с энергосистемой. На основании полученных результатов строятся зависимости мощности, принимаемой из энергосистемы, от оптимальной мощности на клеммах генератора, с помощью которых можно планировать нагрузку источников электроэнергии при изменении условий приема мощности из системы.



Рис. 2. Блок-схема методики оптимизации режимов электроснабжения промышленных предприятий с собственными ЭС

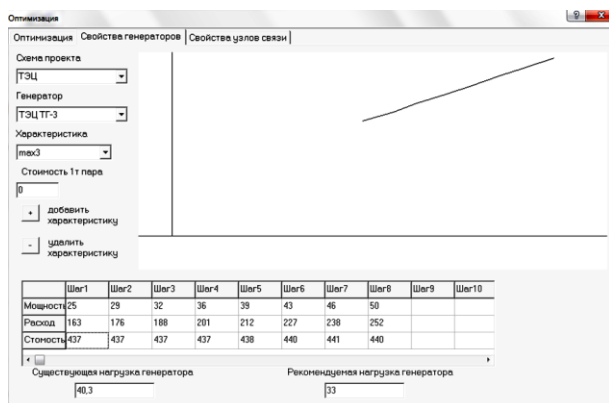


Рис. 3. Окно корректировки параметров генераторов

Определение экономически целесообразных режимов систем электроснабжения крупных промышленных предприятий осуществлялось в условиях действующего объекта ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат». Магнитогорский энергетический узел получает питание от трёх узлов связи с энергосистемой – подстанция Бекетово, Троицкая и Ириклинская ГРЭС через две системные подстанции – Магнитогорская и Смеловская и от трех крупных местных электростанций суммарной мощностью около 635 МВт. Котлы электростанций работают как на покупном топливе (кузнецкий уголь и природный газ), так и на вторичных энергетических ресурсах (доменный и коксовый газы). Отличительной особенностью является работа электростанций как по тепловому, так и по электрическому графику. Тепловые схемы электростанций выполнены по неблочным схемам. Мощность источников электрической энергии варьируется от единиц до десятков мегаватт. Уровень напряжения распределительных сетей изменятся от 0,4 до 110 и 220 кВ.

Перечисленные выше особенности энергетиче-

ского узла учтены в методике оптимизации эксплуатационных режимов промышленных систем электроснабжения с собственными источниками электроэнергии.

Результаты исследований приведены в [9, 10]. На основании полученных данных построены зависимости суммарных затрат от мощности, принимаемой из энергосистемы (рис. 4), с учетом и пренебрежением потерь мощности в энергоузле, позволяющие оценивать экономически целесообразную работу системы электроснабжения при различных условиях связи с внешним источником.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Полученные в ходе данной работы ТЭМ ТГ, отражающие зависимости себестоимости 1 т свежего пара от паропроизводительности котлов и мощности на клеммах генератора, позволяют в дальнейшем осуществлять разработку алгоритмов внутристанционной оптимизации тепловой и электрической энергии на неблочных заводских электростанциях;

2. Внедрение результатов работы позволит достичь снижение затрат на электроэнергию в условиях промышленных предприятий и в целом снизить долю энергозатрат в себестоимости готовой продукции;

3. Разработанная методика дает возможность определять оптимальные наборы управлений собственными источниками электрической энергии промышленного энергоузла в условиях ремонтных и послеаварийных режимов;

4. Результаты работы могут быть использованы в диспетчерских службах предприятий с собственными ЭС с разнородными первичными двигателями, работающими на разных видах топлива.

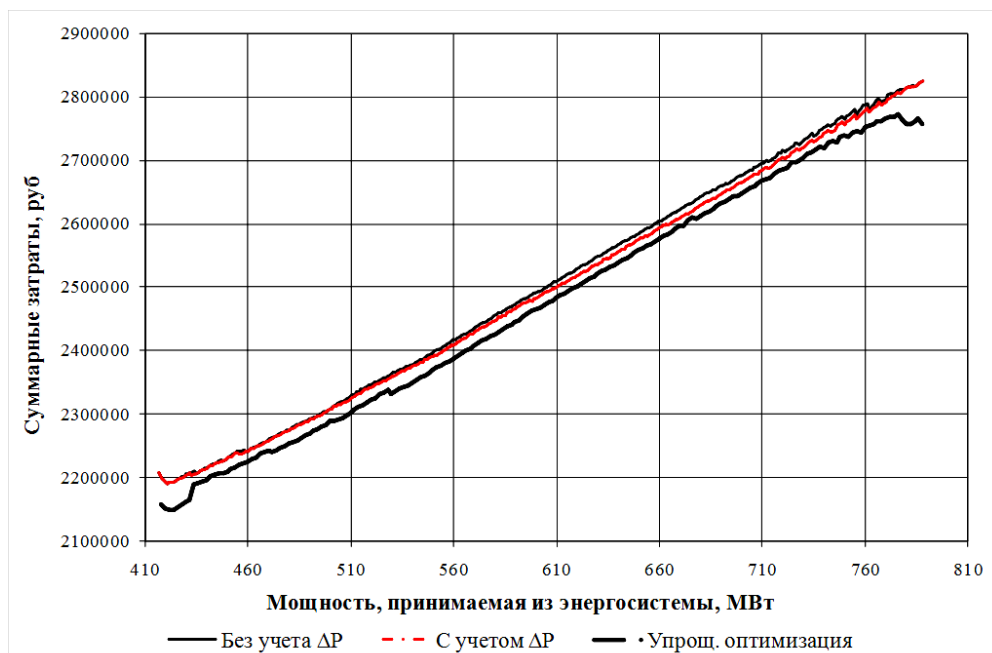


Рис. 4. Зависимость суммарных затрат от мощности, потребляемой из энергосистемы

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Веников В.А., Журавлев В.Г., Филиппова Т.А. Оптимизация режимов электростанций и энергосистем. М.: Энергоатомиздат, 1990. 352 с.
2. Арзамасцев Д.А., Липес А.В., Мызин А.Л. Модели оптимизации развития энергосистем. М.: Высш. шк., 1987. 272 с.
3. Арзамасцев Д.А., Игуменцев В.А. Расчет оптимального распределения реактивной мощности методом последовательного эквивалентирования // Электричество. 1976. №1. С. 70-72.
4. Бартоломей П.И., Грудинин Н.И. Оптимизация режимов энергосистем методами аппроксимирующего и сепарабельного программирования // Изв. Ак. наук. Энергетика. 1993. №1. С. 72-77.
5. Бердин А.С., Кокин С.Е., Семенова Л.А. Оптимизация системы электроснабжения в условиях неопределенности // Промышленная теплоэнергетика. 2010. №4. С. 29-35.
6. Гольденблат Б.И. Применение математического оптимального программирования для задач электроснабжения промышленных предприятий // Электричество. 1971. №2. С. 21-24.
7. Methods for Optimization of Power-System Operation Modes / N.A. Belyaev, N.V. Korovkin, O.V. Frolov, V.S. Chudnyi // Russian Electrical Engineering, 2013, no. 2, pp. 74-80.
8. Малафеев А.В., Хламова А.В., Игуменцев В.А. Алгоритм оптимизации распределения активной мощности между электростанциями промышленного предприятия и узлами связи с энергосистемой с учетом потерь в распределительной сети // Промышленная энергетика. 2011. №9. С. 16-21.
9. Оптимизация установившихся режимов промышленных систем электроснабжения с разнородными генерирующими источниками при решении задач среднесрочного планирования / А.В. Малафеев, А.В. Кочкина, В.А. Игуменцев, Д.Е. Варганов, А.Д. Ковалев Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова. 2013. 112 с.
10. Хламова А.В., Малафеев А.В., Копцев Л.А. Анализ оптимальных режимов работы турбогенераторов собственных электростанций ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» // Изв. вузов. Электромеханика. 2011. №4. С. 111-114.

INFORMATION IN ENGLISH

OPTIMIZATION METHODOLOGY OF INDUSTRIAL ELECTRICAL POWER SYSTEMS OPERATING CONDITION

Kochkina A.V., Malafeev A.V., Varganov D.E., Kurilova N.A., Dubina I.A.

The article considers questions of optimization of industrial power-supply systems conditions with the own sources of electrical power using original software "KATRAN 7.0", which makes it possible to receive optimal values of generators power. The algorithm is based on the method of dynamical programming and takes into account active power losses in distribution electrical network, heterogeneity of used fuel, non-modular structure of the thermal station. The technique of optimization the power-supply system conditions of large industrial plants was given. Calculation of cost-effective conditions was realized in the power-supply system of a large steel plant. The results of the research work are intended for the dispatcher services of industrial enterprises.

Keywords: turbogenerator, boiler, optimal power supply system condition, power station, industrial plant, power-supply system, steam cost, generation.

REFERENCES

1. Venikov V.A., Zhuravljov V.G., Filippova G.A. *Optimizatsiya rezhimov elektrostantsii i energosistem* [Optimization of Power Plant and Power System Conditions]. Moscow: Energoatomizdat, 1990. 352 p.
2. Arzamascev D.A., Lipes A.V., Myzin A.L. *Modeli optimizatsii razvitiya energosistem* [Optimal Models of Power Systems Evolution]. Moscow: Vysshaya shkola, 1987. 272 p.
3. Arzamastsev D.A., Igumenshev V.A. *Raschet optimalnogo raspredeleniya reaktivnoi moschnosti metodom posledovatel'nogo ekvivalentirovaniya* [Reactive Power Optimal Allocation Calculation Using Step by Step Method]. *Elektrichestvo* [Electric power engineering], 1976, no.1, pp. 70-72.
4. Bartolomej P.I., Grudin N.I. *Optimizatsiya rezhimov energosistem metodami approksimiruyushchego i separabel'nogo programmirovaniya* [Optimization of Power System Conditions Using Approximation and Separable Programming Methods]. *Izvestiya Akademii Nauk. Energetika* [Transactions of Science Academy. Power Engineering], 1993, no.1, pp. 72-77.
5. Berdin A.S., Kokin S.E., Semenova L.A. *Optimizatsiya sistemy elektrosnabzheniya v usloviyakh neopredelennosti* [Power System Optimization under Uncertainty]. *Promyshlennaya teploenergetika* [Industrial heat power engineering], 2010, no.4, pp. 29-35.
6. Goldenblat B.I. *Primeneniye matematicheskogo optimal'nogo programmirovaniya dlya zadach elektrosnabzheniya promyshlennykh predpriyatij* [Using mathematical Optimal Programming in a Case of Industrial Power Supply]. *Elektrichestvo* [Electric power engineering], 1971, no.2, pp. 21-24.
7. Belyaev N.A., Korovkin N.V., Frolov O.V., Chudnyi V.S. Methods for Optimization of Power-System Operation Modes. *Russian Electrical Engineering*, 2013, no.2, pp. 74-80.
8. Malafeev A.V., Khlamova A.V., Igumenshev V.A. *Algoritmi optimizatsii raspredeleniya aktivnoj moschnosti mezhdu elektrostantsiyami promyshlennogo predpriyatiya i uzlami svyazi s energosistemoi s uchetom poter v raspredelitel'noi seti* [Optimal Algorithm of Power Distribution between Power Station of Industrial Plant and Power Systems Centers Taking into Account Power Losses]. *Promyshlennaya energetika* [Industrial Power Engineering], 2011, no.9, pp. 16-21.
9. Malafeev A.V., Kochkina A.V., Igumenshev V.A., Varganov D.E., Kovalev A.D. *Optimizatsiya ustanovivshisya rezhimov promyshlennykh sistem elektrosnabzheniya s raznorodnymi generiruyushchimi istochnikami pri reshenii zadach srednesrochno planirovaniya* [Optimization of Steady-State of Power System With Diverse Generating Sources for Task Intermediate-Term Planning]. *Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University*, 2013. 112 p.

10. Malafeev A.V., Khlamova A.V., Koptsev L.A. *Analiz optimalnyh rezhimov raboty turbogeneratorov sobstvennyh elektrostantsij OAO "Magnitogorskij metallurgicheskij kombinat"* [Optimal Conditions Analysis of

Own Power Station Turbo - generators of JSC "MMK"]. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Elektromekhanika* [Transactions of Higher Professional Education Institutions. Electromechanics], 2011. no.4, pp. 111-114.

УДК 611.311.154

Газизова О.В., Мусин Д.А., Малафеев А.В., Жданов А.И.

СОЗДАНИЕ АЛГОРИТМА ПОИСКА ПРЕДЕЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ВЫХОДА ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ НА РАЗДЕЛЬНУЮ С ЭНЕРГОСИСТЕМОЙ РАБОТУ

Увеличение крупными предприятиями собственных генерирующих мощностей и внедрение энергоемких электроприемников с резкопеременной нагрузкой приводит к усложнению возможных эксплуатационных режимов системы электроснабжения. Создан алгоритм поиска предельных режимов выхода электростанции на раздельную с энергосистемой работу по критериям соответствия параметров режима допустимым значениям. Алгоритм учитывает техническое состояние автоматических регуляторов возбуждения и скорости, а также точку подключения нагрузки в выделенной сети.

Ключевые слова: резкопеременная нагрузка, промышленное предприятие, собственная электростанция, система электроснабжения, раздельная работа, предельный небаланс мощности.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие энергоемкой металлургической отрасли является одним из приоритетных направлений отечественной промышленности. Оно связано с совершенствованием и усложнением технологических процессов крупных промышленных предприятий и сопровождается вводом в эксплуатацию энергоемких потребителей с резкопеременным характером электропотребления, использованием на прокатных станах энергоемких выпрямительных агрегатов, расширением собственных электростанций предприятия с различными видами первичных двигателей, а также усложнением конфигурации электрической сети. В таких условиях неизбежно влияние узлов резкопеременной нагрузки на работу электрически близко расположенных синхронных генераторов местных электростанций.

В связи с этим появляется необходимость планирования эксплуатационных переходных режимов промышленных систем электроснабжения, сопровождающихся работой электрических нагрузок резкопеременного характера. Это невозможно без специализированного программного обеспечения, ориентированного на систему электроснабжения крупного промышленного предприятия, имеющего собственные электростанции и резкопеременную нагрузку. Как показал анализ существующего программного обеспечения, программные комплексы расчета режимов электроэнергетических систем ориентированы на крупные энергосистемы и не учитывают особенностей работы промышленных систем электроснабжения [5].

Особенно утяжеляет такие переходные процессы выход электростанции с нагрузкой на раздельную работу с энергосистемой в результате срабатывания релейной защиты или противоаварийной автоматики. Управление подобными режимами явля-

ется задачей диспетчерского персонала электростанций и электрических сетей крупного промышленного предприятия.

МЕТОДИКИ

С целью создания алгоритма поиска предельных режимов выхода электростанции на раздельную с энергосистемой работу с резкопеременной нагрузкой предварительно были разработаны математические модели собственных источников электроэнергии промышленных предприятий, а также характерных электроприемников, в том числе и с резкопеременным характером потребления электрической энергии.

Разработанный алгоритм основан на сочетании метода последовательных интервалов и метода последовательного эквивалентирования [6] и требует задания генераторов в схему замещения переходными ЭДС E' за фазовыми углами δ' , определяемыми в ходе численного решения дифференциального уравнения движения ротора. Угол представляет собой фазовый сдвиг между векторами переходной ЭДС E' и напряжением $\dot{U}$ и определяется на каждом шаге интегрирования.

В данном алгоритме (рис. 1), после моделирования узла и выбора точки присоединения дополнительной мощности, прежде всего, выполняется расчет установившегося доаварийного режима и определяются нормальные и переходные ЭДС синхронных машин. Вынужденная ЭДС определяется действием системы возбуждения и в первый момент времени равна ЭДС машины E_q по поперечной оси. При расчете режима действие АРВ и форсировки моделируется изменением вынужденной ЭДС E_{qe} на каждом шаге расчета. На каждом интервале рассчитывается сверхпереходный режим, определяются приращения углов роторов и приращения переходных

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант №НК 14-07-00200/14.

ЭДС. Использование в подобных расчетах переходных ЭДС связано с тем, что изменения напряжения в узлах, как правило, невелики и не превышают 10 % от номинального значения.

После расчета установившегося режима производится расчет переходного режима при выходе узла на раздельную работу методом последовательных интервалов с учетом резкопеременной нагрузки и действия автоматических регуляторов возбуждения и скорости. По результатам расчета последовательно проверяется сохранение динамической устойчивости каждого генератора относительно других генераторов. Признаком нарушения динамической устойчивости является монотонное расхождение взаимных углов генераторов. Если динамическая устойчивость сохранилась, то с использованием метода последовательного утяжеления происходит увеличение дополнительной присоединенной нагрузки с определенным шагом.

Метод последовательного утяжеления включает этапы: расчет заведомо устойчивого режима выхода на раздельную работу; вычисление для данного режима значения критерия устойчивости; изменение параметров в соответствии с выбранным законом утяжеления и расчет нового переходного режима. Утяжеление продолжается до тех пор, пока на определенном шаге не произойдет изменение знака критерия устойчивости. Расчет последовательно утяжеляемых режимов требует больших затрат времени ЭВМ. Преимущества методов дискретного утяжеления состоит в простоте реализации и возможности изменения параметров утяжеления на любом шаге процесса. Это позволяет учитывать действия противоаварийной автоматики, технические и эксплуатационные ограничения. К недостаткам данных методов относится значительная трудоемкость.

Следующим шагом является изменение точки присоединения дополнительной нагрузки и повторение расчета до нахождения критического небаланса. Результатом расчета является значение критического небаланса мощности на всех рассматриваемых уровнях напряжения. Методы, заложенные в основу программного комплекса «КАТРАН», позволили разработать вышеуказанный алгоритм определения критического небаланса мощности при выходе на раздельную работу, который может быть использован для анализа режимов в службах диспетчерского управления крупных промышленных предприятий, имеющих собственные электростанции.

Исследования проводились на примере самой крупной электростанции Магнитогорского энергетического узла – ТЭЦ, главная электрическая схема которой является комбинированной и содержит неблочную (ТГ-2,3) и блочную части (ТГ-1,4,5,6). Ее особенностью является выдача электроэнергии на различных уровнях напряжения от 3 до 110 кВ.

От ТЭЦ с шин 110, 35, 10 кВ получают питание ряд крупных потребителей, в том числе с резкопеременной нагрузкой (ЛПЦ-9, АПК-1,2 ЭСПЦ). На

ЛПЦ-9 нагрузка на валу двигателя, приводящего вал прокатного стана, имеет резкопеременный ударный характер, что приводит к возникновению переходных электрохимических процессов. Данные переходные процессы негативно сказываются на качестве электроэнергии и прокатываемого металла. При выходе узла на раздельную работу с энергосистемой данные потребители оказывают существенной влияние на устойчивость узла.

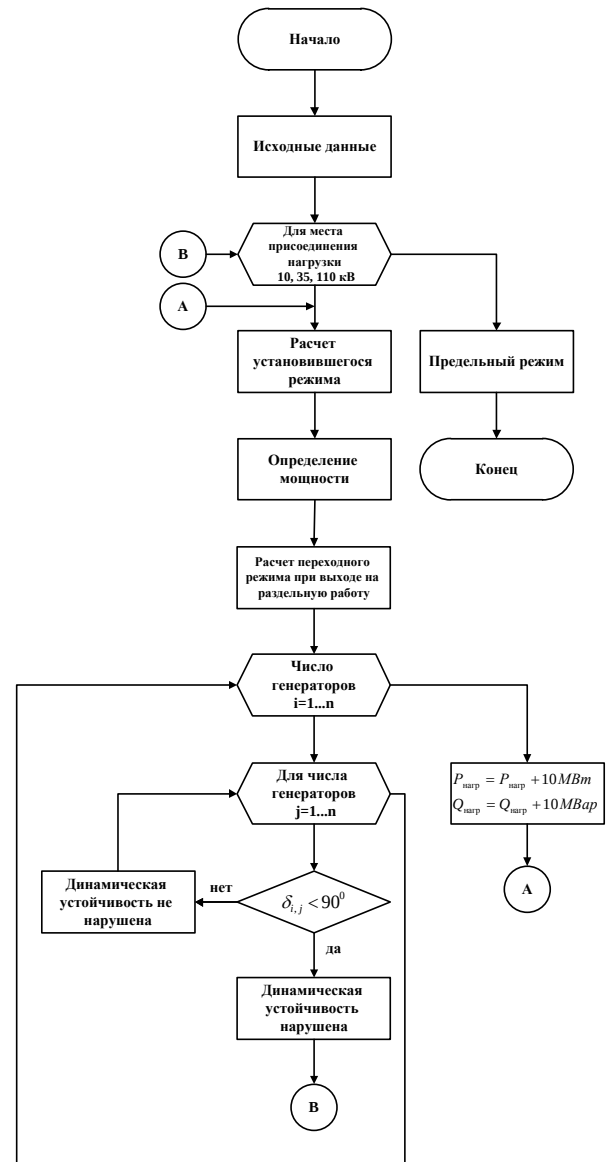


Рис. 1. Алгоритм определения предельных небалансов мощностей при выходе на раздельную работу промышленных электростанций с резкопеременной нагрузкой

На рис. 2 показана однолинейная схема ТЭЦ ОАО «ММК» в программном комплексе «КАТРАН». В исследуемой модели крупные потребители, такие как АПК 1,2 ЭСПЦ и ЛПЦ-9, были заданы обобщенными резкопеременными нагрузками. Графики изменения мощности со временем усреднения равным одной секунде, были сняты экспериментально.

На рис. 3 в качестве примера приведен график изменения реактивной мощности отходящей линии ТЭЦ на ЛПЦ-9. Электроприемники со спокойной нагрузкой были заданы в модели обобщенными нагрузками. Величины потребляемой мощности электроприемников со спокойной нагрузкой и вырабатываемой мощности генераторов ТЭЦ были приняты из эксплуатационных данных.

Характер изменения потребляемой нагрузки резкопеременный и имеют место как резкие набросы, так и резкие снижения потребляемой активной и реактивной мощности. Величина наброса мощности достигает:

- ЭСПЦ – 45 МВт и 3 Мвар;
- ЛПЦ-9 – 25 МВт и 20 Мвар.

В работе была исследована эта схема при различных условиях с применением алгоритма определения критического небаланса мощности $P_{неб}$, $Q_{неб}$ при выходе узла на раздельную работу. В ходе исследования к шинам ТЭЦ подключалась дополнительная обобщенная нагрузка $P_{доп}$, $Q_{доп}$ с последовательным утяжелением 10 МВт активной и 10 Мвар реактивной мощности до определения критических значений, при подключении которых происходило нарушение динамической устойчивости.

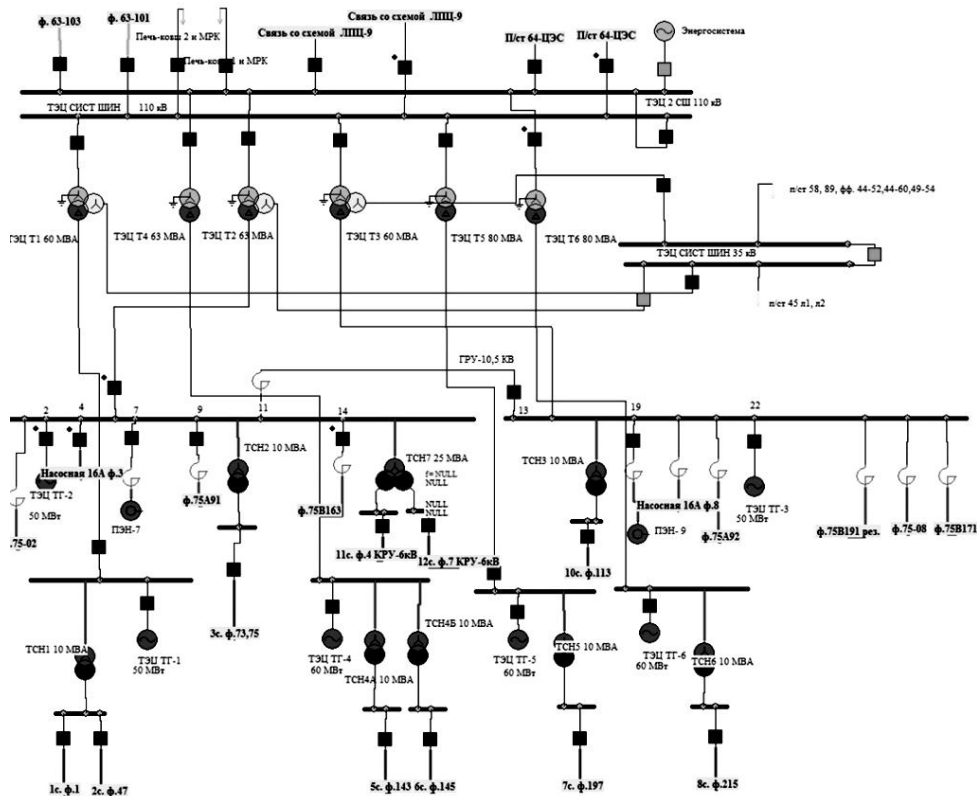


Рис. 2. Однолинейная схема ТЭЦ ОАО «ММК»

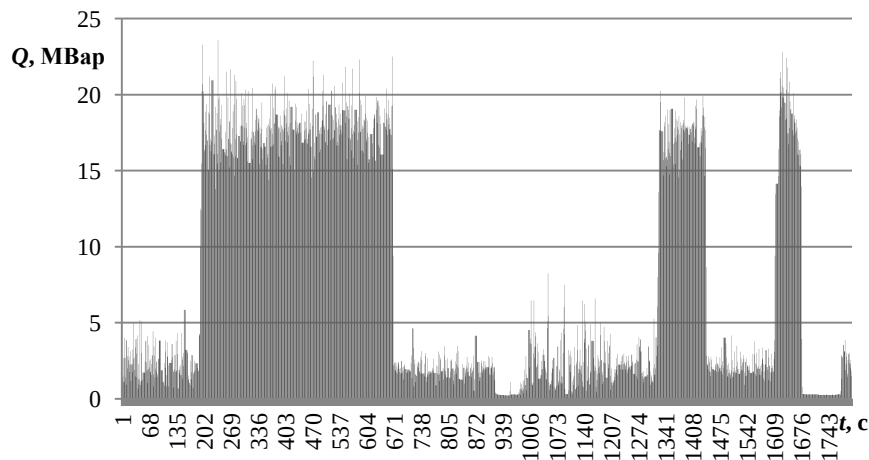


Рис. 3. График изменения реактивной мощности ЛЭП-2 ПС16, ЛПЦ-9

Далее расчет повторялся при подключении дополнительной нагрузки к шинам 35, 110 кВ. На каждом этапе утяжеления получены графические зависимости изменения параметров узла. Так, на **рис. 4** приведены взаимные углы генераторов ТЭЦ при выходе на раздельную работу без учета резкопеременной нагрузки, на **рис. 5** – взаимные углы генераторов при нарушении устойчивости в случае присоединения дополнительной нагрузки $P_{доб}=70$ МВт на шины электростанции $U=110$ кВ. При исследовании были получены следующие значения дополнительной присоединяемой мощности, при которой сохраняется динамическая устойчивость при выходе на раздельную работу: 10 кВ – 60 МВт; 35 кВ – 80 МВт; 110 кВ – 60 МВт. Дополнительная присоединяемая к ЗРУ 35 кВ нагрузка имеет большее по сравнению с остальными уровнями напряжения значение. Это связано с тем, что секции шин 10 и 110 кВ в большей степени электрически удалены от генераторов.

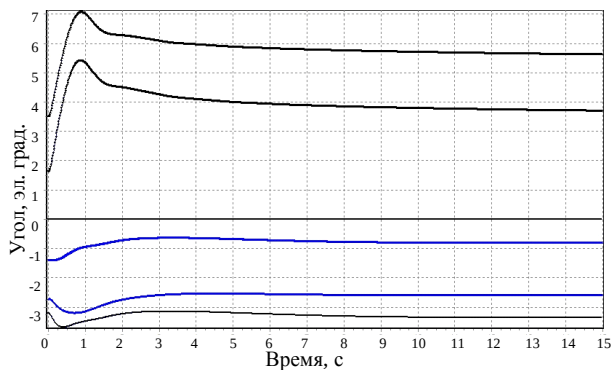


Рис. 4. Взаимные углы генераторов ТЭЦ при выходе на раздельную работу без учета резкопеременной нагрузки

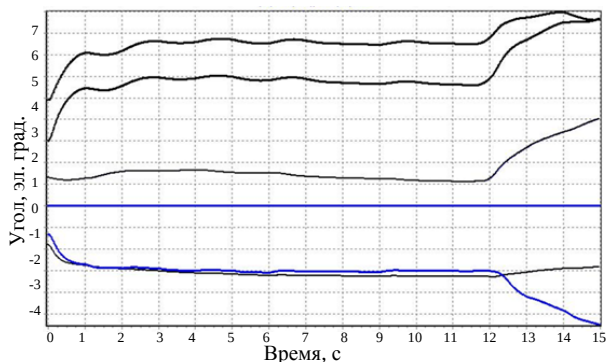


Рис. 5. Взаимные углы генераторов (нарушение устойчивости $U=110$ кВ, $P_{доб}=70$ МВт)

Таким образом, с использованием метода последовательного утяжеления были определены предельные небалансы мощностей при выходе узла на раздельную работу. Величина дополнительной присоединенной нагрузки к шинам ЗРУ 35 кВ при выходе узла на раздельную работу имеет максимальное значение. Повышение дополнительной активной нагрузки оказывает влияние на изменение углов роторов, а повышение реактивной влияет в основ-

ном на уровень напряжения. Узел ТЭЦ может быть загружен дополнительно до 60 МВт по активной и до 70 Мвар по реактивной мощности с сохранением динамической устойчивости при выходе на раздельную работу с энергосистемой при изменении частоты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данном исследовании был проведен расчет с использованием алгоритма определения предельных небалансов мощностей при выходе на раздельную работу промышленных электростанций с резкопеременной нагрузкой (см. **табл. 1**). При исследовании получили следующие значения дополнительной присоединяемой мощности, при которой сохраняется динамическая устойчивость при выходе на раздельную работу: на шинах 10 кВ – 60 МВт; на шинах 35 кВ – 80 МВт; на шинах 110 кВ – 60 МВт. Дополнительная присоединяемая к ЗРУ 35 кВ нагрузка имеет большее по сравнению с остальными уровнями напряжения значение, так как секции шин 10 кВ и 110 кВ наиболее электрически удалены от генераторов. Повышение дополнительной активной нагрузки оказывает существенное влияние на изменение углов роторов, а повышение реактивной влияет преимущественно на уровень напряжения. Узел ТЭЦ может быть загружен дополнительно до 60 МВт по активной и до 70 Мвар по реактивной мощности с сохранением динамической устойчивости при выходе на раздельную работу с энергосистемой. Разработанный алгоритм может быть применен в условиях промышленной системы электроснабжения с собственными электростанциями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Веников В.А. Переходные электрохимические процессы в электрических системах: учебник для электротехн. специальностей вузов. М.: Выс. шк., 1985. 536 с.
2. Гуревич Ю.Е., Либова Л.Е., Хачатрян Э.А. Устойчивость нагрузки электрических систем. М.: Энергоиздат, 1981. 208 с.
3. Жданов П.С. Вопросы устойчивости электрических систем. М.: Энергия, 1979. 456 с.
4. Мамиконянц Л.Г., Горбунова Л.М., Гуревич Ю.Е. Методические указания по определению устойчивости энергосистем. М.: Гл. тех. упр-е по эксплуатации энергосистем, 1977. 127 с.
5. Мусин Д.А., Газизова О.В., Малафеев А.В., Мисунин Д.А. Разработка алгоритма определения предельных небалансов мощностей при выходе на раздельную работу промышленной электростанции с резкопеременной нагрузкой // Электротехнические системы и комплексы: междунар. сб. науч. тр. / под ред. Г.П. Корнилова, Е.А. Пановой. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им Г.И. Носова, 2013. Вып. 21. С. 204-210.
6. Газизова О.В., Малафеев А.В., Тарасов В.М., Извольский М.А. Исследование эффективности работы делительной автоматики в системе электроснабжения промышленного предприятия черной металлургии, // Промышленная энергетика. 2012. №10. С. 12-17.

Сводная таблица предельных небалансов мощностей узла ТЭЦ ОАО «ММК» при выходе на раздельную работу

Присоединение дополнительной нагрузки на шинах 10 кВ											
активной				активной и реактивной				реактивной			
$P_{\text{доп}}$, МВт	$P_{\text{неб}}$, МВт	$Q_{\text{неб}}$, Мвар	Сохранение устойчивости	$P_{\text{доп}}$, МВт $Q_{\text{доп}}$, Мвар	$P_{\text{неб}}$, МВт	$Q_{\text{неб}}$, Мвар	Сохранение устойчивости	$Q_{\text{доп}}$, Мвар	$P_{\text{неб}}$, МВт	$Q_{\text{неб}}$, Мвар	Сохранение устойчивости
10	-29,01	-18,23	+	10	-30,30	-9,11	+	10	-40,99	-8,97	+
20	-17,95	-18,01	+	20	-21,27	-0,36	+	20	-41,77	-0,28	+
30	-6,97	-17,47	+	30	-12,93	8,14	+	30	-42,50	7,98	+
40	3,09	-16,61	+	40	-5,22	16,39	+	40	-43,17	15,85	+
50	14,66	-15,45	+	50	1,91	24,40	+	50	-43,79	23,37	+
60	25,29	-14,0	+	60	8,53	32,17	+	60	-44,37	30,56	+
70	35,76	-12,27	-	70	14,69	39,73	-	70	-44,91	37,46	+
80	46,07	-10,26	-	80	20,42	47,07	-	80	-45,41	44,09	+
90	56,2	-8,0	-	90	25,76	54,21	-	90	-45,88	50,47	-
35 кВ											
10	-30,51	-17,83	+	10	-32,38	-10,19	+	10	-41,32	-10,32	+
20	-21,06	-17,06	+	20	-25,76	-2,72	+	20	-42,34	-3,35	+
30	-11,82	-15,85	+	30	-20,08	4,31	+	30	-43,24	3,11	+
40	-2,85	-14,22	+	40	-15,17	10,93	+	40	-44,03	9,07	+
50	5,81	-12,21	+	50	-10,90	17,19	+	50	-44,73	14,61	+
60	14,14	-9,86	+	60	-7,17	23,12	+	60	-45,37	19,78	+
70	22,12	-7,2	+	70	-3,89	28,75	+	70	-45,94	24,64	+
80	29,72	-4,27	+	80	-0,99	34,12	-	80	-46,46	29,21	+
90	36,94	-1,1	-	90	1,57	39,23	-	90	-46,93	33,64	+
100	43,77	2,27	-	100	3,85	44,12	-	100	-47,36	37,64	-
110 кВ											
10	-28,73	-18,11	+	10	-28,73	-6,69	+	10	-40,16	-6,69	+
20	-17,30	-18,11	+	20	-17,30	4,74	+	20	-40,16	4,74	+
30	-5,88	-18,11	+	30	-5,88	16,17	+	30	-40,16	16,17	+
40	5,55	-18,11	+	40	5,55	27,59	+	40	-40,16	27,59	+
50	16,98	-18,11	+	50	16,98	39,02	+	50	-40,16	39,02	+
60	28,40	-18,11	+	60	28,40	50,45	+	60	-40,16	50,45	+
70	39,83	-18,11	-	70	39,83	61,87	+	70	-40,16	61,87	+
80	51,26	-18,11	-	80	51,26	73,30	-	80	-40,16	73,30	-
90	62,68	-18,11	-	90	62,68	84,73	-	90	-40,16	84,73	-

INFORMATION IN ENGLISH

DEVELOPMENT OF SEARCH ALGORITHM FOR LIMIT LOAD SEPARATE OPERATION OF POWER STATION AND POWER SUPPLY SYSTEM

Gazizova O.V., Musin D.A., Malafeev A.V., Zhdanov A.I.

The increase of internal generating capacities at large enterprises and introduction of power-intensive electric receivers with variable loading leads to complication of possible operating modes of the power supply system. The search algorithm for limit load separate operation of a power plant and a power supply system by compliance of operating parameters with admissible values was developed. The algorithm takes into account technical condition of automatic field and speed controllers and the point of load connection to the allocated network.

Keywords: variable loading, industrial enterprise, internal power plant, power supply system, separate work, limiting power disbalance.

REFERENCES

1. Venikov V.A. *Perehodnye elektromekhanicheskie protsessy v elektricheskikh sistemah* [Transitional electromechanical processes in electric systems]: textbook for electric power faculties of universities. Moscow: Higher school, 1985. 536 p.
2. Gurevich Yu.E., Libova L.E., Hachatrian E.A. *Ustoychivost nagruzki elektricheskikh sistem* [Load stability of electric systems]. Moscow: Energoizdat, 1981. 208 p.
3. Zhdanov P.S. *Voprosy ustoychivosti elektricheskikh sistem* [Problems of stability in electric systems]. Moscow: Energy, 1979. 456 p.
4. Mamikonyants L.G., Gorbunova L.M., Gurevich Yu.E. *Metodicheskie ukazaniya po opredeleniyu ustoychivosti*

energосистем [Guidelines for determination of stability in power supply systems]. Moscow: Main technical division on operation of power supply systems, 1977. 127 p.

5. Musin D.A., Gazizova O.V., Malafeev A.V., Misulin D.A. *Razrabotka algoritma opredeleniya predelnyh nebalansov moschnostei pri vyhode na razdelnuyu rabotu promyshlennoi elektrostantsii s rezkoperemennoi nagruzkoi* [Development of limit determination algorithm for disbalances of capacities for separate work of electric power plant and variable load]. / *Elektrotekhnicheskie komplekxy I sistemy* [Electro technical complexes and systems]. Magnitogorsk:

Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2013, vol. 21, pp. 204-210.

6. Gazizova O.V., Malafeev A.V., Tarasov V.M., Izvolsky M.A. *Issledovanie effektivnosti raboty delitelnoi avtomatiki v sisteme elektrosnabzheniya promyshlennogo predpriyatiya chernoi metallurgii* [Study of overall performance of separating automatic equipment in power supply system of industrial enterprise in the field of ferrous metallurgy]. *Promishlennaya energetika* [Industrial power engineering]. 2012, no.10, pp. 12-17.

УДК 621.311.22

Малафеев А.В., Трemasов М.А.

РАЗРАБОТКА УТОЧНЕННОЙ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА МОМЕНТНО-СКОРОСТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПИТАТЕЛЬНОГО НАСОСА ТЕПЛОВОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ В ЗАДАЧЕ АНАЛИЗА УСТОЙЧИВОСТИ СОБСТВЕННЫХ НУЖД

В работе предлагается уточненная методика расчета моментно-скоростной характеристики питательного насоса, основанная на положениях теории гидравлических машин и исследованиях в области обратимых гидромашин. Получены аналитические выражения для рабочих характеристик питательных насосов котельных установок и характеристик трубопроводной сети, учитывающие основные составляющие потерь напора, такие как потери на удар, вихреобразование и гидравлические потери. Построение моментно-скоростной характеристики осуществляется с учетом момента на гидравлические потери и потери на сухое трение. В режиме противотока применяются универсальные моментно-скоростные характеристики обратимых гидромашин. Анализ выбега асинхронного двигателя производится на основе полученной уточненной методики построения моментно-скоростной характеристики рабочего механизма методом последовательных интервалов. Разработанная методика может быть использована для выбора параметров срабатывания релейной защиты в системах собственных нужд тепловых электростанций.

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

ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение стабильной работы системы электроснабжения собственных нужд (СН) электростанции является приоритетной задачей поддержания электроснабжения основных приемников электрической энергии как самой электростанции (котлы, турбины, генераторы), так и цехового оборудования промышленного предприятия. Так как механизмы СН тепловых электростанций относятся к приемникам I категории по надежности электроснабжения, то быстрое восстановление их работы в послеаварийном режиме является крайне важным. Причинами аварий могут служить исчезновение напряжения на шинах СН электростанции, выход из строя обратных клапанов насосов и др. Результатом таких аварий является остановка не только одного технологического агрегата, но и всей электростанции в целом. Для обеспечения итоговой успешности самозапуска необходим правильный выбор уставок электрических защит и согласование с уставками технологических защит.

Объектом исследования является центральная электростанция (ЦЭС) ОАО «ММК», на которой установлено 8 энергетических и 2 водогрейных котла. В турбинном участке расположено 9 турбогенераторов общей мощностью 196 МВт.

Наиболее ответственными механизмами собст-

венных нужд являются питательные насосы. Их устойчивости необходимо уделять особое внимание, так как при их отказе произойдет останов большого количества технологического оборудования, установленного на станции. В качестве питательных насосов, предназначенных для подачи питательной воды в котел, используются главным образом центробежные горизонтальные насосы секционного типа с односторонним расположением рабочих колес.

Для корректного анализа переходных электро-механических процессов и динамической устойчивости двигателей СН необходимо наиболее полно учитывать свойства приводного механизма, определяющие противодействующий момент на валу двигателя. Как правило, при оценке устойчивости моментно-скоростная характеристика механизма представляется упрощенной степенной зависимостью с постоянным членом, соответствующим моменту трогания механизма. В частности, для насосов, работающих на сеть с противодавлением, часто используется кубическая зависимость. Это приводит к погрешности расчета и неприемлемо, в первую очередь, при рассмотрении работы насоса на открытый обратный клапан. Таким образом, необходимо разработать методику получения уточненной характеристики аналитическим путем на основе конст-рук-

тивных данных реального механизма и трубопроводной сети и параметров потока жидкости.

В настоящей работе рассматривается питательный насос ПЭН-1 типа ПЭ 65-40 первого котлоагрегата. Мощность насоса составляет 106 кВт.

АЛГОРИТМ ПОСТРОЕНИЯ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ НАПОРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Расчет начинается с построения семейства рабочих характеристик [1]. Характеристику при любой частоте вращения n_i можно получить путем пересчета $H-Q$ характеристики, снятой при номинальной частоте вращения n_1 , на частоту вращения n_i с помощью так называемых формул пропорциональности:

$$\frac{Q_i}{Q_1} = \frac{n_i}{n_1} \text{ и } \frac{H_i}{H_1} = \left(\frac{n_i}{n_1} \right)^2. \quad (1)$$

Производительность насоса при заданной частоте вращения его рабочего колеса определяется не только его главной $H-Q$ характеристикой, но и свойствами трубопроводной сети, на которую он работает.

Характеристика сети (трубопровода) состоит из двух слагаемых – статического и динамического напоров. В общем виде она имеет вид

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

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

Скорости движения жидкости на сторонах всасывания и нагнетания примерно равны, поэтому их разностью можно пренебречь. Тогда динамическая составляющая характеристики трубопровода будет зависеть только от величины потерь напора ΔH , равной

$$\Delta H = KQ^2, \quad (3)$$

где K – коэффициент пропорциональности или характеристический коэффициент трубопровода,

$$K = \frac{H_{\text{опт}} - H_{\text{ст}}}{Q_{\text{опт}}^2}, \quad (4)$$

где $H_{\text{опт}}$ – оптимальный напор, м; $Q_{\text{опт}}$ – оптимальная подача, м³/ч.

Конечный вид формулы характеристики сети:

$$H_c = H_{\text{ст}} + KQ^2. \quad (5)$$

Характеристика трубопроводной сети представлена на **рис. 1**.

Рабочая точка должна находиться на ниспадающей ветви характеристики, так как в этой области работа насоса наиболее устойчива, не наблюдается срыва подачи.

Чтобы исследовать аварийный и послеаварийный режимы, необходимо знать основные характеристики рабочего механизма в переходном процессе. Для этого нужно построить теоретическую $H-Q$ характеристику, соответствующую рабочей характеристике, указанной в паспорте насоса, при той же скорости вращения рабочего колеса.

Построение начинается с получения теоретической характеристики напора, представленной в [2]. Теоретический напор без учета потерь имеет вид

$$H_{\tau} = \frac{(\pi D_2 n)^2}{3600g} - \frac{n c \operatorname{tg} \beta_2}{60b_2 g} Q, \quad (6)$$

где D_2 – внешний диаметр рабочего колеса, м; n – скорость вращения рабочего колеса, об/мин; g – ускорение свободного падения, м/с²; b_2 – толщина лопатки, расположенной на рабочем колесе, м; β_2 – выходной угол лопатки.

В [3] получена формула для расчета потерь на удар и вихреобразование, необходимых для построения напорной характеристики:

$$H_{\text{уд}} + H_{\text{вихр}} = \frac{\varphi}{2g} \left[u_1^2 + \left(\frac{u_2}{1+p} \frac{D_2}{D_4} \right)^2 \right] \left(1 - \frac{Q}{Q_{\text{без}}} \right)^2, \quad (7)$$

где $\varphi=0,5-0,6$ – коэффициент удара; u_1, u_2 – окружные скорости, м/с; $Q_{\text{без}}=\pi D_2 b_2 v_{2m}$ – подача, соответствующая безударному входу в направляющий аппарат и в рабочее колесо.

Далее следует рассчитать потери на трение по формуле, полученной в [4]:

$$H_{\text{тр}} = \frac{1 - \eta_h}{g} \times \frac{[(1-p) \operatorname{ctg} \alpha_3 + \operatorname{ctg} \beta_2] \operatorname{ctg} \alpha_3}{\pi^2 D_2^2 b_2^2} Q^2, \quad (8)$$

где η_h – гидравлический КПД; p – коэффициент уменьшения напора.

В [5] описывается расчет потерь на удар и вихреобразование насосов.

Зная величину потерь, можно построить $H-Q$ характеристику, вычитая из линейной характеристики теоретического напора найденные значения потерь на удар и трение. В результате получим кривую при номинальной скорости вращения рабочего колеса (на **рис. 1** кривая показана штрихпунктиром), примерно совпадающую с номинальной характеристикой.

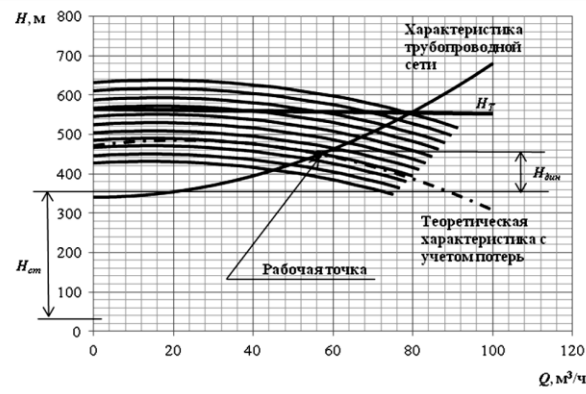


Рис. 1. Теоретическая характеристика напора насоса с учетом потерь

АЛГОРИТМ ПОСТРОЕНИЯ МОМЕНТНО-СКОРОСТНОЙ (МЕХАНИЧЕСКОЙ) ХАРАКТЕРИСТИКИ

Находятся точки пересечения (значения подачи и напора машины) характеристики трубопроводной сети с характеристиками питательного насоса при разных скоростях вращения. Для этого необходимо приравнять уравнения теоретической напорной характеристики с уравнением характеристики трубопроводной сети. В результате получается квадратное уравнение следующего вида:

$$\left(\frac{(1-\eta_h) [(1-p) \operatorname{ctg} \alpha_3 + \operatorname{ctg} \beta_2] \operatorname{ctg} \alpha_3}{g} + \frac{u_1^2 \varphi}{2gQ_{\text{вез}}^2} + \frac{0,416u_2^2 \varphi}{2g(1+p)^2 Q_{\text{вез}}^2} + 0,034 \right) Q^2 - \left(\frac{u_1^2 \varphi}{gQ_{\text{вез}}} + \frac{0,416u_2^2 \varphi}{g(1+p)^2 Q_{\text{вез}}} - \frac{n \operatorname{ctg} \beta_2}{60b_2g} \right) Q + \left(340 - \frac{(\pi D_2 n)^2}{3600g} + \frac{u_1^2 \varphi}{2g} + \frac{0,416u_2^2 \varphi}{2g(1+p)^2} \right) = 0. \quad (9)$$

Решая уравнение как квадратное, можно получить значения подачи при определенных скоростях вращения.

Затем по найденным значениям подачи и напора, а также по известным скоростям вращения определяется мощность:

$$P_i = P_{\text{ном}} \left(\frac{n_i}{n_1} \right)^3. \quad (10)$$

Определяется КПД в зависимости от мощности, напора и подачи:

$$\eta = \frac{\rho g H_{\text{ст}} Q_i}{P_i}. \quad (11)$$

По полученным значениям напора, подачи и КПД машины определяется полезный момент на валу, соответствующий разным частотам вращения:

$$\frac{M_i}{M_1} = \frac{Q_i (H_{\text{ст}} + KQ_i^2) \eta_i n_i}{Q_1 (H_{\text{ст}} + KQ_1^2) \eta_1 n_1}. \quad (12)$$

Поскольку механические потери в насосе состоят из потерь на трение в концевых уплотнениях различного типа, в подшипниках и из так называемых дисковых потерь, рассмотрим эти составляющие по отдельности.

В центробежных насосах средней и большой мощности дисковые потери являются основным видом механических потерь. Мощность (кВт) дискового трения рабочего колеса определяется следующим образом [3]:

$$N_{\text{д.т}} = 0,735 C_f \gamma D_2^2 \left(\frac{u_2}{1000} \right)^3 \left(1 + \frac{5l}{D_2} \right), \quad (13)$$

где C_f – коэффициент, учитывающий трение на двух сторонах диска; γ – удельный вес жидкости, Н/м³; l – толщина стенки колеса на выходе.

Гидравлические потери имеют место, главным образом, в колесе и направляющем аппарате, так как скорости в кожухе насоса сравнительно невелики. В [4] представлена формула гидравлического КПД:

$$\eta_h = 1 / \left(1 + \frac{1}{2gH} (\zeta_1 \omega_0^2 + \zeta_2 c_0^2) \right). \quad (14)$$

Относительный момент на гидравлические потери определяется по формуле (12).

В [6] рассматривается режим обратимой гидромашины, когда она работает в режиме противотока (лопасти вращаются, но не создают поток). У питательных насосов такой режим возникает, когда давление в барабане котла больше, чем давление, создаваемое насосом, и вода, выталкиваясь из барабана, стремится раскрутить рабочее колесо насоса в обратную сторону, создавая противодействующий момент. Поэтому для данного случая применим полученные в [6] универсальные относительные характеристики.

В результате аппроксимации кривой универсальной моментно-скоростной характеристики обратимой гидромашины получается следующее уравнение:

$$m = 0,9824\beta^3 - 2,1588\beta^2 + 0,2492\beta + 1,2958, \quad (15)$$

где $m = M_i/M_{\text{ном}}$ – относительный момент; $\beta = n_i/n_{\text{ном}}$ – относительная скорость вращения рабочего колеса насоса.

Задаваясь определенными относительными значениями частоты вращения, можно определить момент на валу механизма в режиме противотока.

В приближенных расчетах часто пользуются кубической зависимостью момента от скорости [7]. Такой показатель степени позволяет учесть противодействие, возникающее на лопастях рабочего ко-

леса питательного насоса.

Значения суммарного момента и момента в режиме противотока будут незначительно отличаться вследствие малого значения момента на потери сухого трения.

Кривые на **рис. 2** показывают, что с увеличением статического напора существенно возрастает крутизна механической характеристики и уменьшается длина участка, отвечающего производительной работе машины (обрыв кривых означает прекращение подачи жидкости или газа), поэтому значительно уменьшается допустимое снижение частоты вращения.

АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Для анализа динамической устойчивости асинхронного двигателя воспользуемся методом последовательных интервалов [8].

Расчет начинается с нахождения для первого интервала величины $\Delta s_{(1)}$ по формуле

$$\Delta s_{(1)} = \frac{\Delta t}{T_j} \Delta M_{(0)}. \quad (16)$$

где Δt – интервал времени, с; $T_j = (GD^2 n_0) / (375 M_{ном})$ – механическая постоянная времени механизма, с.

Далее рассчитывается скольжение

$$s_{(1)} = s_0 + \Delta s_{(1)}. \quad (17)$$

Зная значения скольжения, можно найти частоту вращения вала двигателя.

Для следующих интервалов расчет аналогичен. На основании полученного значения скорости вращения по разработанной методике рассчитывается полезный момент, определяются моменты на гидравлические потери и потери на дисковое трение.

Суммарный момент будет складываться из трех составляющих: полезного момента, момента на гидравлические потери и момента на потери на дисковое трение.

$$M_{\Sigma} = M_{\text{полезн}} + M_h + M_{\text{д.т.}}. \quad (18)$$

Для полученного значения момента определяется скольжение, и расчет методом последовательных интервалов повторяется до тех пор, пока скольжение двигателя не достигнет 1,0.

Данные расчеты проводятся для случая, когда обратный клапан насоса вышел из строя, и при срыве подачи насос будет работать в режиме противотока – рабочее колесо продолжит вращаться в том же направлении, но насос создавать напора не будет.

Таким образом, можно предсказать поведение двигателя в переходном процессе и сделать вывод об успешности самозапуска.

Для сравнения результатов расчетов следует рассмотреть и другие способы анализа самозапуска механизма СН.

Самый распространенный способ – построение моментно-скоростной характеристики с помощью зависимости $M_i/M_{ном} = f(n_i/n_{ном})^3$ [7]. Такой показатель степени позволяет учесть противодействие, возникающее в насосе. Данная функция нелинейная, поэтому следует воспользоваться методом последовательных интервалов, рассмотренным выше, чтобы определить значение скольжения в определенный момент времени.

При расчете динамической устойчивости двигателя при закрытом обратном клапане методом последовательных интервалов для насосного режима момент определяется так же, как и в случае открытого обратного клапана по полученной в данной работе уточненной методике построения моментно-скоростной характеристики. При достижении скорости, при которой произойдет срыв подачи, момент рассчитывается как квадрат относительной скорости: $M_i/M_{ном} = f(n_i/n_{ном})^3$.

Данная зависимость представлена на **рис. 2**.

Более наглядное представление этого процесса можно получить, построив зависимость скольжения от времени (**рис. 3**).

Из **рис. 3** видно, что время выбега составляет около половины секунды. При закрытом обратном клапане выбег двигателя произойдет гораздо позже, так как противодействие со стороны трубопроводной сети отсутствует.

Для заключения о корректности полученной методики построения моментно-скоростной характеристики сравним значения скольжений, рассчитанных по полученной методике и по упрощенной методике (кубическая зависимость момента от скорости), до момента открытия обратного клапана, то есть в момент времени $t=0,05$ с. Следовательно, в первом случае скольжение будет $s=0,111$, а во втором $s=0,111$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана уточненная методика расчета моментно-скоростной характеристики питательного насоса, позволяющая достичь получения более точных данных о электромеханическом процессе выбега приводного асинхронного двигателя. Отличие от существующих методик заключается в учете противодействующего момента на гидравлические потери и потерь на сухое трение. Время выбега асинхронного двигателя при открытом обратном клапане насоса по результатам расчетов составило 0,52 с. В случае, когда обратный клапан закрыт, за это время скольжение достигнет значения $s=0,524$. При расчете по упрощенной методике (кубическая зависимость момента от скорости) скольжение за 0,52 с достигнет $s=0,443$, т.е. в данном случае отличие составляет 15,5%. Методика позволяет более точно отстроить уставки релейной и технологической защиты, установленных на станции, для более надежной работы основного и вспомогательного технологического оборудования.

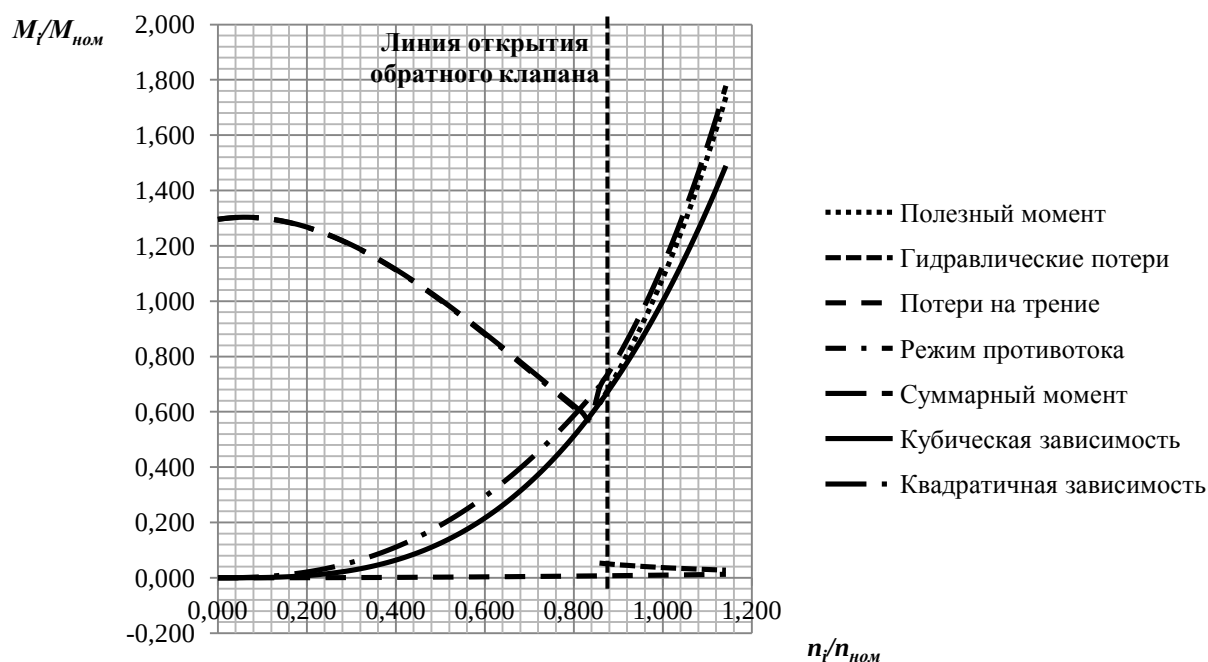


Рис. 2. Моментно-скоростная (механическая) характеристика питательного насоса

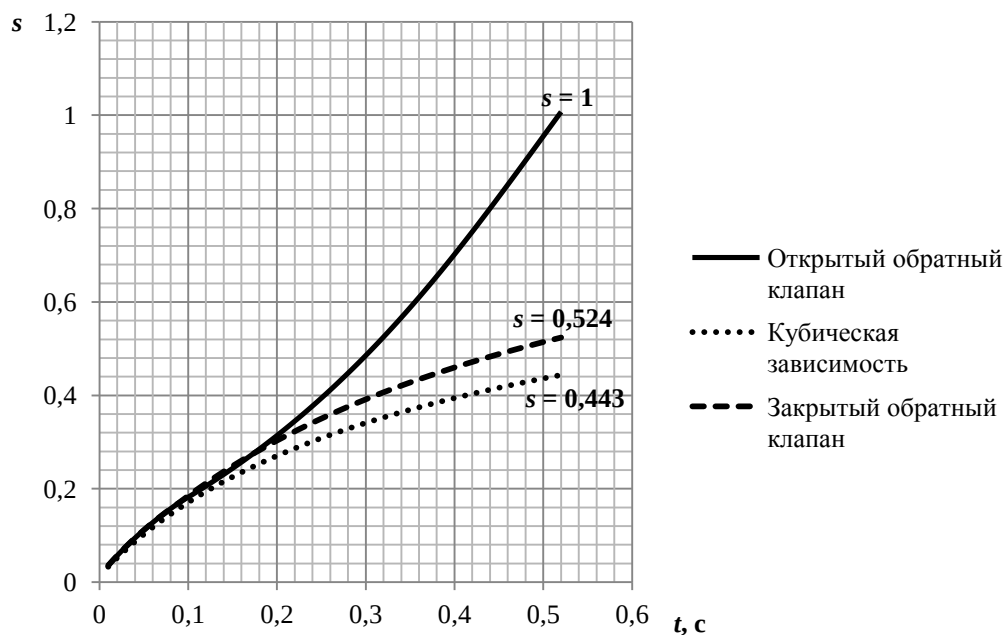


Рис. 3. Изменение скольжения во времени

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васильев А.А., Крючков И.П., Наяшкова Е.Ф. Электрическая часть станций и подстанций: учебник для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1990. 576 с.
2. Черкасский, В.М. Насосы, вентиляторы, компрессоры: учебник для теплоэнергетических специальностей вузов. М.: Энергия, 1977. 424 с.
3. Михайлов А.Н., Малюшенко В.В. Лопастные насосы. Теория, расчет и конструирование. М.: Машиностроение, 1977. 288 с.
4. Пфлейдерер, К. Центробежные и пропеллерные насосы. М.: Энергоиздат, 1937. 495 с.
5. Pflaiderer C. Strömungsmaschinen. Springer 1952, S. 249.
6. Аршеневский Н.Н. Обратимые гидромашины гидроаккумулирующих электростанций. М.: Энергия, 1977. 240 с.
7. Сыромятников, И.А. Режимы работы синхронных и асинхронных двигателей. М.: Энергоатомиздат, 1984. 240 с.
8. Куликов Ю.А. Переходные процессы в электрических системах: Учеб. пособие. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. 283 с.

DEVELOPMENT OF UPDATED METHODOLOGY FOR CALCULATING TORQUE-SPEED CHARACTERISTICS OF THERMAL POWER PLANT FEED PUMP IN THE PROBLEM OF AUXILIARY POWER STABILITY ANALYSIS

Malafeev A.V., Tremasov M.A.

The paper proposes an improved technique for calculating the torque-speed characteristic of the feed pump based on the provisions of the theory of hydraulic machines and research in the area of reversible hydraulic. Analytical expressions for the operating characteristics of feed pumps boiler installations and pipeline network characteristics taking into account the main components of head loss, such as loss of water hammer, the churning losses and hydraulic losses. The torque-speed characteristic is generated taking into account hydraulic losses and rubbing friction losses. Universal torque-speed characteristics of reversible hydraulic machines are used in counter-flow mode. The analysis of induction motor rundown is carried out on the basis of the updated methodology of calculating torque-speed characteristics of the working mechanism using the method of successive intervals. The developed method can be used to select pickup values of relay protection in the systems of in-plant thermal electric power stations.

Keywords: auxiliary power, feed pump, operating characteristics, pipeline network characteristics, torque-speed characteristic, transient stability.

REFERENCES

1. Vasiliev A.A., Kryuchkov I.P., Nayashkova E.F. *Elektricheskaya chast stantsij i podstantsij* [Electrical part of stations and substations]: college textbook. Moscow: Energoatomizdat, 1990. 576 p.
2. Cherkasskiy V.M. *Nasosy, ventilyatory, kompressory* [Pumps, fans, compressors]: College textbook for heat-engineering specialties. Moscow: Energiya, 1977. 424 p.
3. Mikhailov A.N., Malyushenko V.V. *Lopastnye nasosy. Teoriya, raschet i konstruirovaniye* [Vane pumps. Theory, calculation and design]. Moscow: Mashinostroenie, 1977. 288 p.
4. Pfleiderer C. *Tsentrobezhnye i propellernye nasosy* [Centrifugal and propeller pumps]. Moscow: Energoizdat, 1937. 495 p.
5. Pfleiderer C. *Strömungsmaschinen*. Springer 1952, S. 249.
6. Arshenevskiy N.N. *Obratimye gidromashiny gidroakkumuliruyuschiy elektrostantsij* [Reversible hydraulic pumped of storage power plants]. Moscow: Energiya, 1977. 240 p.
7. Syromyatnikov I.A. *Rezhimy raboty sinhronnykh i asinhronnykh dvigatelej* [Synchronous and asynchronous motors operation modes]. Moscow: Energoatomizdat, 1984. 240 p.
8. Kulikov Yu.A. *Perehodnye protsessy v elektricheskikh sistemah* [Transient processes in electric power systems]: study guide. Novosibirsk: Publishing center of NSTU, 2002. 283 p.

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ 3-D СКАНИРОВАНИЯ ДЛЯ РАСШИРЕНИЯ ГРАНИЦ КОНТРОЛЯ СИСТЕМЫ СЛЕЖЕНИЯ ЗА МАТЕРИАЛОМ НА ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СКЛАДАХ

В условиях современного производства складская логистика играет роль ключевого звена в управлении материалами. В связи с этим вопрос о выборе автоматизированной системы управления стал актуальным для широкого круга организаций. Компания ЗАО «КонсОМ СКС» разработала и внедрила систему 3-D сканирования производственного склада готовой продукции ЛПЦ №11 ОАО «ММК». Использование предложенной модели позволило получить трехмерное представление о заполняемости склада для корректировки его карты.

Ключевые слова: производственный склад, управление складом, 3-D сканирование, система слежения, визуализация, автоматизация.

Большое значение в выполнении заказов на металлургических предприятиях имеет четкая координация работы складов. Даже при условии, что в процессе планирования деятельность была скоординирована, возникают отклонения фактического хода производства от заданного. Эти отклонения приводят к существенным потерям и дополнительным затратам на производство продукции. Эти обстоятельства требуют постоянной координации производства в реальном времени. Для этого необходимо разработать востребованный на рынке автоматизированный системный продукт, обеспечивающий потребности заказчика в области отслеживания потоков материала, приходящего на производственный склад заготовок или готовой продукции.

Для расширения границ контроля системы слежения за материалом на складах было реализовано решение для склада готовой продукции листопрокатного цеха № 11 ОАО «ММК» [1].

В процессе эксплуатации системы автоматизированного управления складами появилась необходимость в регулярном уточнении карты складов. С этой целью был реализован проект 3-D сканирования. Для его осуществления был смонтирован датчик SICK LMS511-11100 на кране, подключенный в информационную сеть цеха. Разработана программная реализация функционала считывания данных с датчика и распознавание образов. Графическое обоснование количества сканеров и оптимальных мест установки изображено на рис. 1 и 2.

Результаты сканирования представляют собой 3-D визуализацию карты склада с размещенной металлопродукцией, благодаря которой корректируется карта склада, полученная при помощи системы автоматизированного управления складами [1]. Таким образом, у персонала склада ЛПЦ-11 ОАО «ММК» появляется возможность получать объемное представление о заполняемости склада (рис. 3, 4).

В рамках проекта разработаны тестовые программные модули, реализующие следующие функции:

– преобразование массива данных сканируемой об-

ласти в пространственную модель (математическую и графическую);

– определение базовых точек и размеров сканируемых объектов группы: границы, оси, пропорции;

– сопоставление сканируемой группы объектов с шаблоном (с предыдущим образом, с пространственной моделью транспортных механизмов);

– дифференцированный сравнительный анализ объектов группы с шаблоном (поиск отличий по количеству, по смещению базовых точек, по внутренним размерам);

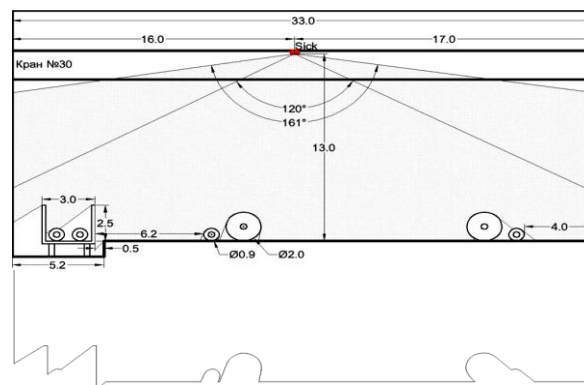


Рис. 1. Установка одно сканера на кран и графическое представление объема данных со сканера за одно измерение

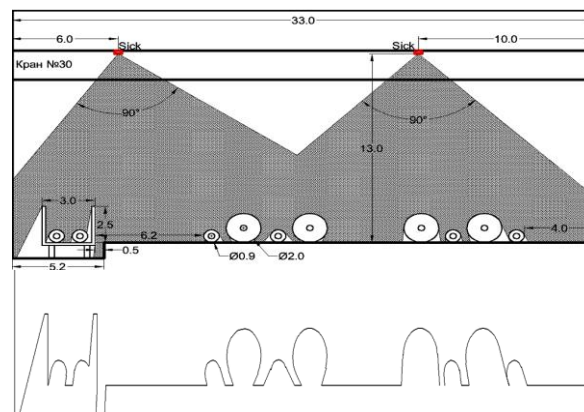


Рис. 2. Установка двух сканеров на кран и графическое представление объема данных со сканера за одно измерение

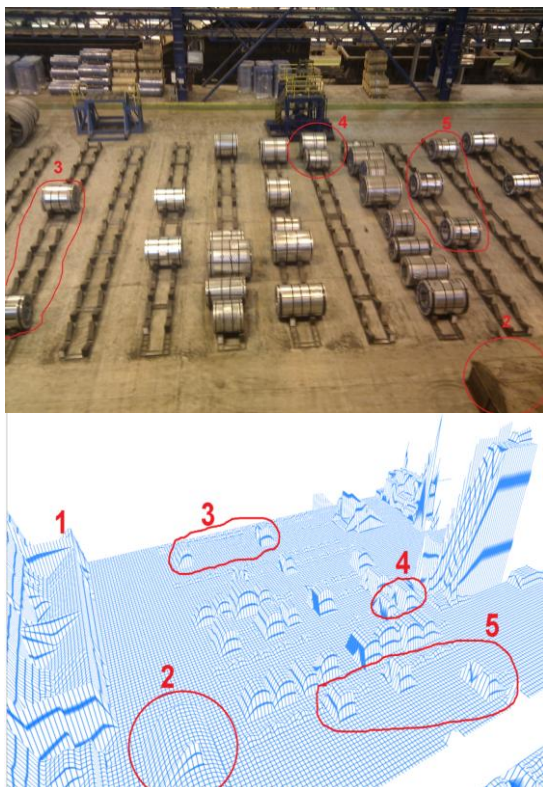


Рис. 3. Визуализация схемы размещения рулонов на складе ЛПЦ-11 ОАО «ММК»

Данная система автоматизированного управления позволяет формировать актуальную схему размещения материала на складе за счет получения оперативной информации on-line.

На практике внедрение предложенной модели предполагает:

- повышение оперативности получения необходимой информации в несколько раз;
- минимизацию человеческого фактора: больше не требуется ручной ввод (не требуется подтверждение операции перемещения);
- автоматическую синхронизацию физического ме-

стоположения продукции с учетными информационными системами в режиме on-line.



Рис. 4. Визуализация общей линии для загрузки и выгрузки материала со склада на грузовой транспорт на складе ЛПЦ-11 ОАО «ММК»

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Системы автоматизированного управления складами для металлургической промышленности / Е.Н. Ишметьев, А.В. Романенко, Е.Ю. Васильев, М.В. Борисова, Ю.Н. Волщук, А.Н. Панов, К.А. Подпратов // Автоматизация в промышленности. 2013. № 2. с.27-30.

INFORMATION IN ENGLISH

3D SCANNING APPLICATION FOR EXTENDING CONTROL LIMITS OF MATERIAL TRACKING SYSTEM FOR INDUSTRIAL WAREHOUSES

Ishmetyev E.N., Panov A.N., Vasilyev E.Yu., Araslanov M.S.

Warehouse logistics plays a key role in material management in current manufacturing environment. So the choice of the automatic control system is now of primary importance for a great number of companies. KonsOM SKS has developed and implemented a 3D scanning system for the finished product warehouse of the sheet rolling mill 11 of the OJSC "MMK". Practical application of the developed model makes it possible to get the 3D representation of warehouse fillability/availability in order to correct its map.

Keywords: manufacturing warehouse, warehouse management, 3D scanning, tracking system, visualization,

automation.

REFERENCES

1. Ishmetyev E.N., Roamnenko A.V., Vasilyev E.Yu., Borisova M.V., Volschukov Yu.N., Panov A.N., Podpryatov K.A. *Sistemy avtomatizirovannogo upravleniya skladami dlya metallurgicheskoi promyshlennosti* [Systems of automatic warehouse management in metallurgy]. *Avtomatizatsiya v promyshlennosti* [Automation in industry]. 2013, no.2, pp.27-30.

УДК 621.365.5

Ячиков И.М.

ПОЛОЖЕНИЕ РАВНОВЕСИЯ ТЕЛА ВО ВЗВЕШЕННОМ СОСТОЯНИИ В ВЫСОКОЧАСТОТНОМ ИНДУКТОРЕ С ОБРАТНЫМ ВИТКОМ

Предложены математические модели для определения амплитуды напряженности магнитного поля и положения металлического тела при его удержании во взвешенном состоянии в индукторе с обратным витком. Проведено компьютерное моделирование возможных точек равновесия цилиндрического и шарообразного тел в магнитном поле индуктора. Установлено, что существует критическая плотность материала и некое минимальное значение тока через индуктор, которые характеризуют предельные теоретические возможности удержания тела данных размеров.

Ключевые слова: левитационная плавка, высокочастотный индуктор, напряженность магнитного поля, взвешенное состояние металла, электромагнитная сила, устойчивое равновесие.

ВВЕДЕНИЕ

Высокочастотное электромагнитное поле не только греет и плавит металл, но и позволяет удерживать его в пространстве без каких-нибудь тиглей или ограничивающих стенок. Плавку металла во взвешенном состоянии называют плавкой в электромагнитном тигле или просто левитационной плавкой (с англоязычного термина «*levitation melting*»). Удержание металла во взвешенном состоянии возможно только в неоднородном магнитном поле. При взаимодействии индуктированного тока с вызывающим его полем в поверхностном слое металла возникают механические силы давления. При определенных условиях результирующая электромагнитных сил может быть направлена противоположно силе гравитации и при достаточно большой мощности, подводимой к металлу, может обеспечивать удержание металла во взвешенном состоянии [1, 2].

Одним из простейших вариантов устойчивой левитационной плавки является использование конструкции индуктора, выполненного из медной трубки, содержащего несколько витков в прямом направлении и один – в обратном (противовиток). Такая конструкция нужна для того, чтобы внутри индуктора была область, в которой магнитное поле меньше, чем вокруг нее. Проводник, помещенный в переменное электромагнитное поле, выталкивается в область меньших полей и положение образца внутри индуктора будет более устойчивым. В настоящее время при большом интересе к левитационной плавке простые методы расчета поведения металла в индукторе с обратным витком практически отсутствуют.

Целью работы является разработка упрощенной методики расчета поведения магнитного поля в высокочастотном цилиндрическом индукторе с обратным витком и нахождение положения проводящего тела во взвешенном состоянии.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ НАПРЯЖЕННОСТИ
 МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ ИНДУКТОРЕ
 С ОБРАТНЫМ ВИТКОМ

Рассмотрим индуктор, содержащий в общем случае n витков диаметра $D=2R_d$ и $n_{обр}$ верхних витков, намотанных в обратном направлении, того же диаметра. Основная и обратная катушки соединены последовательно, и по ним протекает одинаковый ток (рис. 1, а). Считаем, что магнитное поле внутри индуктора с обратным витком будет определяться суперпозицией магнитных полей от двух винтовых проводников, через которые идут токи в разных направлениях [4, 5]. Расстояние между основной катушкой L и обратными витками L_0 составляет a_1 .

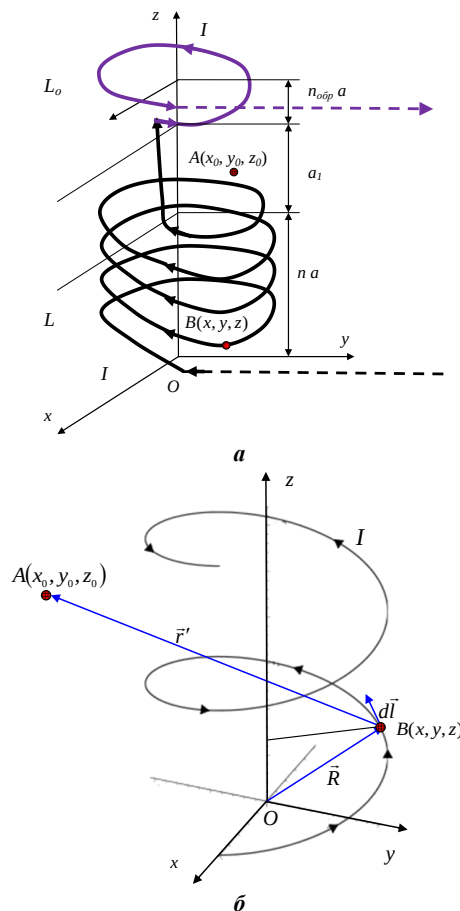


Рис. 1. К расчету магнитного поля в индукторе с обратным витком

Найдем напряженность магнитного поля вблизи проводника с током I в виде винтовой линии в произвольной точке не совпадающей с самой линией. Введем декартову (x, y, z) и цилиндрическую (r, φ, z) системы координат, причем они связаны между собой соотношениями: $r = \sqrt{x^2 + y^2}$, $\varphi = \arctg(y/x)$.

Зададим функцию винтовой линии проводника с током в параметрической форме

$$\begin{cases} x(\varphi) = R_{\text{ц}} \cdot \cos(\varphi), \\ y(\varphi) = R_{\text{ц}} \cdot \sin(\varphi), \\ z(\varphi) = \frac{a}{2 \cdot \pi} \cdot \varphi, \end{cases} \quad (1)$$

где $R_{\text{ц}}$ – радиус винтовой линии; a – шаг винтовой линии (расстояние, на котором находятся витки друг от друга), причем если $a > 0$, то винтовая линия находится в области $z > 0$ и, наоборот, если $a < 0$, то винтовая линия находится в области $z < 0$.

Рассмотрим произвольную точку A , не принадлежащую винтовой линии и имеющую в декартовой системе координаты $A(x_0, y_0, z_0)$, а в цилиндрической $A(r_0, \varphi_0, z_0)$ (рис. 1, б).

Величина и направление напряженности магнитного поля в точке A от тока, протекающего через элемент $d\vec{l}$ длины провода (точка B) определяется по закону Био-Савара-Лапласа в дифференциальной форме $d\vec{H} = \frac{I}{4\pi r^3} [d\vec{l} \times \vec{r}']$, где $\vec{r}'$ – радиус-вектор, проведенный от элемента тока $d\vec{l}$ (направление $d\vec{l}$ совпадает с током) к точке A .

Распишем координаты векторов (см. рис. 1, б):

$$\begin{aligned} O\vec{B} = \vec{R} &= \left(R_{\text{ц}} \cdot \cos \varphi, R_{\text{ц}} \cdot \sin \varphi, \frac{a}{2 \cdot \pi} \cdot \varphi \right), \\ B\vec{A} = \vec{r}' &= \\ (x_0 - R_{\text{ц}} \cdot \cos \varphi, y_0 - R_{\text{ц}} \cdot \sin \varphi, z_0 - z). \end{aligned}$$

Расстояние от точки A до точки B определяется модулем последнего вектора

$$\begin{aligned} r &= |\vec{r}'| = \\ &= \left((x_0 - R_{\text{ц}} \cdot \cos \varphi)^2 + (y_0 - R_{\text{ц}} \cdot \sin \varphi)^2 + \right. \\ &\quad \left. + (z_0 - z)^2 \right)^{1/2}. \end{aligned}$$

Вектор $\vec{R}$ является вектором-функцией со скалярным аргументом, описывающей винтовую линию, поэтому направляющий вектор касательной к годографу

$$d\vec{l} = \frac{d\vec{R}}{d\varphi} = d\varphi \cdot \left(-R_{\text{ц}} \cdot \sin \varphi, R_{\text{ц}} \cdot \cos \varphi, \frac{a}{2 \cdot \pi} \right).$$

Расписав векторное произведение $[d\vec{l} \times \vec{r}']$,

найдем напряженность магнитного поля в точке, заданной цилиндрическими координатами $A(r_0, \varphi_0, z_0)$ вблизи проводника в виде винтовой линии, содержащей n витков [3-5]:

$$\begin{aligned} H_x(r_0, \varphi_0, z_0) &= \frac{I}{4 \cdot \pi} \times \\ &\times \int_0^{2 \cdot \pi \cdot n} \left(\frac{R_{\text{ц}} \cdot \cos \varphi \cdot (z_0 - z)}{\eta(\varphi)} - \right. \\ &\quad \left. - \frac{(r_0 \cdot \sin \varphi_0 - R_{\text{ц}} \cdot \sin \varphi) \cdot a / (2 \cdot \pi)}{\eta(\varphi)} \right) \cdot d\varphi; \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} H_y(r_0, \varphi_0, z_0) &= \frac{I}{4 \cdot \pi} \times \\ &\times \int_0^{2 \cdot \pi \cdot n} \left(\frac{R_{\text{ц}} \cdot \sin \varphi \cdot (z_0 - z)}{\eta(\varphi)} + \right. \\ &\quad \left. + \frac{(r_0 \cdot \cos \varphi_0 - R_{\text{ц}} \cdot \cos \varphi) \cdot a / (2 \cdot \pi)}{\eta(\varphi)} \right) \cdot d\varphi; \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} H_z(r_0, \varphi_0, z_0) &= \frac{I}{4 \cdot \pi} \times \\ &\times \int_0^{2 \cdot \pi \cdot n} \frac{R_{\text{ц}}^2 - r_0 \cdot R_{\text{ц}} \cdot \cos(\varphi - \varphi_0)}{\eta(\varphi)} \cdot d\varphi, \end{aligned} \quad (4)$$

где $\eta(\varphi) = (R_{\text{ц}}^2 + r_0^2 - 2R_{\text{ц}}r_0 \cdot \cos(\varphi - \varphi_0) + (z_0 - z)^2)^{3/2}$; $x(\varphi), y(\varphi), z(\varphi)$ определяются по выражению (1).

Для нахождения магнитного поля внутри индуктора с обратным витком проекции напряженности магнитного поля в точке A определяем как алгебраическую сумму магнитных полей, создаваемых обеими катушками, используя принцип суперпозиции:

$$\begin{aligned} Hi_x(r_0, \varphi_0, z_0) &= H^L_x(r_0, \varphi_0, z_0) - \\ &- H^{L_0}_x(r_0, \varphi_0, z_0 - na - a_1); \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} Hi_y(r_0, \varphi_0, z_0) &= H^L_y(r_0, \varphi_0, z_0) - \\ &- H^{L_0}_y(r_0, \varphi_0, z_0 - na - a_1); \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} Hi_z(r_0, \varphi_0, z_0) &= H^L_z(r_0, \varphi_0, z_0) - \\ &- H^{L_0}_z(r_0, \varphi_0, z_0 - na - a_1), \end{aligned} \quad (7)$$

где H^L, H^{L_0} – проекции напряженности магнитного поля от основной катушки и обратной катушки соответственно, определяемые по формулам (2)-(4).

Радиальная Hi_r и азимутальная Hi_φ проекции и модуль вектора напряженности магнитного поля Hi в точке A :

$$\begin{aligned} Hi_r(r_0, \varphi_0, z_0) &= Hi_y(r_0, \varphi_0, z_0) \sin \varphi_0 - \\ &- Hi_x(r_0, \varphi_0, z_0) \cos \varphi_0; \end{aligned} \quad (8)$$

$$H_{i\varphi}(r_0, \varphi_0, z_0) = H_{iy}(r_0, \varphi_0, z_0) \cos \varphi_0 - H_{ix}(r_0, \varphi_0, z_0) \sin \varphi_0; \quad (9)$$

$$H_i(r_0, \varphi_0, z_0) = \sqrt{H_{ix}^2(r_0, \varphi_0, z_0) + H_{iy}^2(r_0, \varphi_0, z_0) + H_{iz}^2(r_0, \varphi_0, z_0)}, \quad (10)$$

Полученные уравнения (5)-(10) дают математическую модель для определения магнитного поля вблизи индуктора с обратным витком.

С помощью созданной компьютерной программы [6] проведено моделирование поведения амплитуды магнитного поля в индукторе, имеющем следующие параметры: $R_{\text{ц}}=20$ мм; $a=a_1=10$ мм; $n=4$; $I=1$ кА - амплитуда тока. На рис. 2, 3 приведены результаты исследования поведения вертикальной составляющей и модуля вектора напряженности магнитного поля по высоте и радиусу индуктора с обратным витком. Видно, что вертикальная составляющая магнитного поля вносит решающий вклад в модуль вектора магнитного поля, кроме этого, по радиусу индуктора от его оси до $0,5R_{\text{ц}}$ модуль вектора напряженности магнитного поля меняется не более чем на 40%, поэтому можно в горизонтальной плоскости при $r < 0,5R_{\text{ц}}$ считать его примерно однородным.

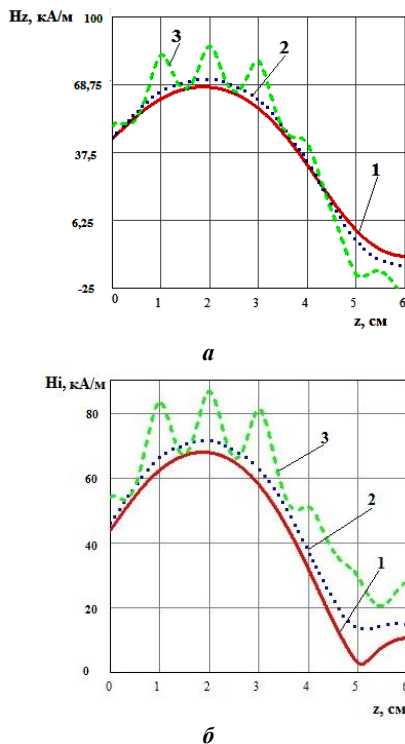


Рис. 2. Вертикальная составляющая (а) и модуль вектора напряженности магнитного поля (б) по высоте индуктора на разных расстояниях от его оси ($\varphi=0$): 1 - $r=0$; 2 - $r=R_{\text{ц}}/2$; 3 - $r=4R_{\text{ц}}/5$

Для амплитуды вертикальной проекции напряженности магнитного поля на оси индуктора получено уравнение регрессии в виде полинома четвертой степени при амплитуде тока через индуктор $I_0=1$ кА (z - задается в метрах)

$$H_0(z) = 38613078016z^4 - 3461824256z^3 + 24046264z^2 + 1775109z + 44681,285, \text{ А/м.}$$

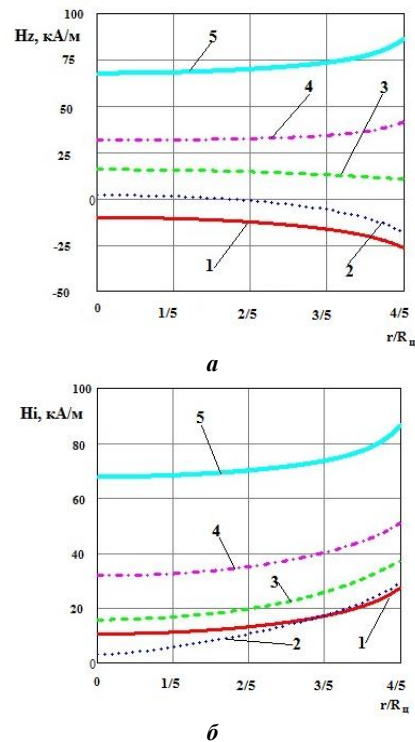


Рис. 3. Вертикальная составляющая (а) и модуль вектора напряженности магнитного поля (б) по относительному радиусу индуктора на разной его высоте ($\varphi=0$): 1 - $z=a(n+1)+a_1$; 2 - $z=an+a_1$; 3 - $z=an+a_1/2$; 4 - $z=an$; 5 - $z=an/2$

При этом средняя относительная ошибка аппроксимации составила около 3%. Так как напряженность магнитного поля линейно зависит от тока через индуктор, поэтому распределение напряженности магнитного поля на оси данного индуктора для других токов можно записать как $H(z)=H_0(z) \cdot I/I_0$.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ РАВНОВЕСИЯ ВО ВЗВЕШЕННОМ СОСТОЯНИИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ТЕЛА В ИНДУКТОРЕ С ОБРАТНЫМ ВИТКОМ

Нагреваемый металл или капля расплава в индукторе будет удерживаться во взвешенном состоянии при условии, что напряженность поля под телом будет больше напряженности поля над ним. Электромагнитное давление на металл при ярко выраженном поверхностном эффекте проникновения поля в проводник выражается формулой [1, 2] $P_{\text{эм}}=\mu_0 H^2/4$, Па, где H - амплитуда напряженности магнитной составляющей поля на поверхности металла, А/м; $\mu_0=4\pi 10^{-7}$ В·с/(А·м) - магнитная постоянная. Из формулы видно, что электромагнитное давление на металл полностью определяется напряженностью магнитного поля. Кроме этого, так как напряженность магнитного поля в индукторе пропорциональна току, то электромагнитное давление на металл пропорционально квадрату силы тока.

Зная магнитное поле, можно проанализировать характер движения и положение металла при его удержании во взвешенном состоянии в индукторе. Рассмотрим поведение в индукторе немагнитного цилиндрического тела диаметром d и высотой h_0 . Считаем, что положительное направление силы направлено вертикально вверх. Начало координат находится на оси основания нижнего торца цилиндрической катушки индуктора (рис. 4, а). Пусть положение тела определяется координатой z . На цилиндрическое тело действует электромагнитная сила

$$\vec{F}_{эм} = \vec{P}_{эм} S = \frac{\mu_0 S}{4} [H^2(z) - H^2(z + h_0)] \quad (11)$$

сила тяжести $m_0 \vec{g}$, сила Архимеда $\vec{F}_a = m_0 \vec{g} (\rho_{ж} / \rho_0)$ и сила сопротивления среды направленная в противоположную сторону движения тела

$$F_{тр} = \frac{c_x \rho_{ж} S_0}{2} \left(\frac{dz}{dt} \right)^2 \quad \text{Уравнение одномерного движения}$$

тела с учетом воздействия данных сил можно записать как

$$\frac{d^2 z}{dt^2} m_0 = F_{эм} - g m_0 \left(1 - \frac{\rho_{ж}}{\rho_0} \right) - \text{sign} \left(\frac{dz}{dt} \right) \frac{c_x \rho_{ж} S_0}{2} \left(\frac{dz}{dt} \right)^2, \quad (12)$$

где C_x - коэффициент сопротивления движению тела; $m_0 = \rho_0 h_0 S = \rho_0 h_0 \pi d^2 / 4$ - масса тела; $\rho_0, \rho_{ж}$ - плотность металла и окружающей среды соответственно; $S = \pi d^2 / 4$ - площадь воздействия электромагнитного давления; S_0 - площадь контакта поверхности гидравлического трения («миделево сечение»).

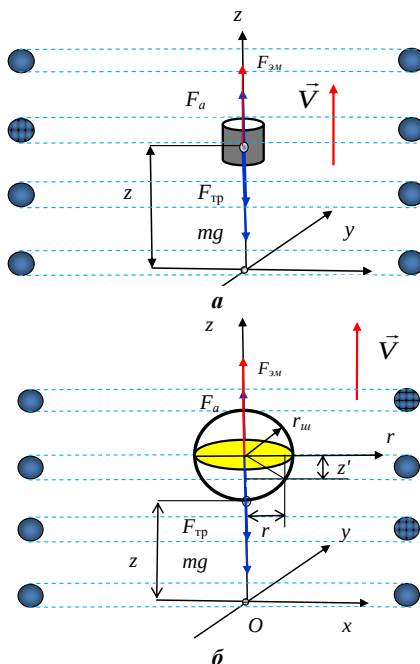


Рис. 4. Основные силы, действующие в индукторе: а – на цилиндрическое тело; б – на шарообразное тело

Найдем положение тела, при котором наступит его равновесие в вертикальном неоднородном электромагнитном поле. Учитывая, что динамические составляющие равны нулю ($z''=0, z'(t)=0$), получим выражение для равнодействующей силы на цилиндрическое тело, находящееся в индукторе, в зависимости от его положения

$$F(z) = \frac{\mu_0 m_0}{4 \rho_0 h_0} (H(z)^2 - H(z + h_0)^2) - m_0 g \left(1 - \frac{\rho_{ж}}{\rho_0} \right).$$

При неоднородном поле $H(z)$ положения равновесия тела определяются корнями уравнения

$$\frac{\mu_0}{4 \rho_0 h_0} (H(z)^2 - H(z + h_0)^2) - g \left(1 - \frac{\rho_{ж}}{\rho_0} \right) = 0. \quad (13)$$

Напряженность магнитного поля на оси индуктора задавалась в виде полинома заданной степени. Нелинейное уравнение (13) решалось итерационным методом, находились действительные корни большие или равные нулю, которые и определяют положения равновесия тела находящегося во взвешенном состоянии в индукторе.

Проведено моделирование поведения амплитуды напряженности магнитного поля и положения равновесия тела в индукторе, имеющем следующие параметры: $R_{ц}=20$ мм - радиус цилиндрического индуктора; $a=a_1=10$ мм; $n=4$; $n_{обр}=1$. Общая высота индуктора $L=n \cdot a + a_1 + n_{обр} a = 60$ мм.

Для цилиндрических алюминиевых тел диаметром $d=5$ мм ($\rho_0=2,7$ г/см³) получена зависимость равнодействующей силы по высоте индуктора (рис. 5).

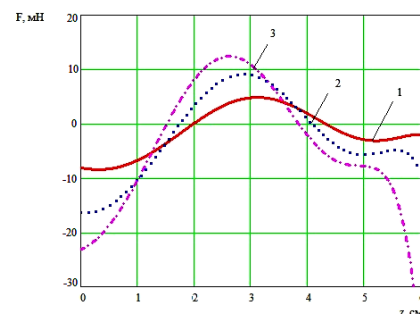


Рис. 5. Равнодействующая сила, воспринимаемая алюминиевым цилиндром диаметром $d=5$ мм в зависимости от его положения в индукторе при высоте цилиндра: 1 – $h_0=5$ мм; 2 – $h_0=10$ мм; 3 – $h_0=15$ мм

Имеются два положения равновесия для алюминиевых тел высотой: для $h_0=5$ мм ($m_0=0,265$ г) - $z_0=43$ мм и $z_1=20$ мм; для $h_0=10$ мм ($m_0=0,53$ г) - $z_0=40,8$ мм и $z_1=17,5$ мм; для $h_0=15$ мм ($m_0=0,795$ г) -

$z_0=38,5$ мм и $z_1=15,2$ мм. При заданных условиях расчета положение равновесия тела возможно вблизи второго и четвертого витка индуктора. Рассмотрим более подробно характер равнодействующей силы вблизи точек положения равновесия (см. рис. 5). Видно, что при отклонении тела из первой точки равновесия вниз ($z < z_1$) или вверх ($z > z_1$) равнодействующая сила $F(z)$ не возвращает цилиндр в положение равновесия, то есть оно является неустойчивым. Устойчивым является положение равновесия, находящееся вблизи минимума магнитного поля, расположенного около четвертого витка индуктора (точка z_0).

На рис. 6 показаны результаты компьютерного моделирования положения точек равновесия тела от тока индуктора для двух алюминиевых цилиндрических тел, имеющих разную высоту h_0 , находящихся в воздухе и воде. Видно, что есть некое значение тока $I_{\min}$, ниже которого поле не удерживает цилиндрическое тело данных размеров. Значение $I_{\min}$ снижается с увеличением плотности окружающей среды и уменьшением h_0 . Видно также, что, начиная с некоторого значения тока $I_{\max}$, при его увеличении положение тела меняется незначительно.

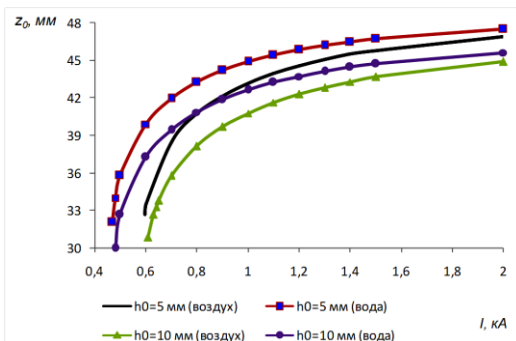


Рис. 6. Положение точек равновесия тела от тока индуктора для двух алюминиевых цилиндрических тел, имеющих разную высоту, находящихся в воздухе и воде

Необходимо отметить, что положение точек равновесия тела не зависит от диаметра цилиндра, кроме этого, с увеличением плотности удерживаемого в индукторе металла кривая равнодействующей силы (см. рис. 5) опускается в сторону отрицательных значений. При некоторой критической плотности $\rho_{кр}$ в решении уравнения (13) пропадают действительные положительные корни, что говорит о невозможности удержания тела электромагнитными силами. На рис. 7 показана расчетная зависимость положения точек равновесия для цилиндрического тела ($h_0=5$ мм, $d=5$ мм) от разности плотностей материала, из которого оно изготовлено, и окружающей среды при разных токах индуктора. Видно, что для каждого тока существует своя критическая плотность, например, при $I=1$ кА можно удерживать только тела плотностью меньшей $7,7$ г/см³, то есть теоретически невозможно удержать медный цилиндр данных размеров ($\rho_0=8$ г/см³). Установлено, что рассматриваемая критическая плотность пропорциональна квадрату силы тока $\rho_{кр} \sim I^2$.

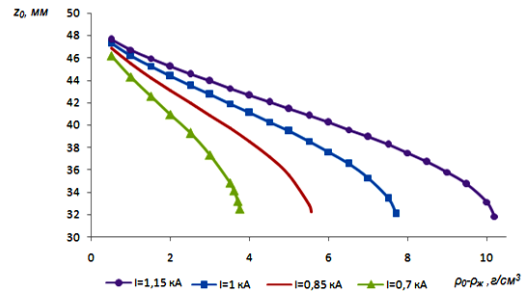


Рис. 7. Положение точек равновесия цилиндрического тела от плотности, материала из которого оно изготовлено, при разных токах индуктора

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ РАВНОВЕСИЯ ВО ВЗВЕШЕННОМ СОСТОЯНИИ ШАРООБРАЗНОГО ТЕЛА В ИНДУКТОРЕ С ОБРАТНЫМ ВИТКОМ

Найдем положение шарообразного тела радиусом $r_{ш}=d_{ш}/2$, при котором наступит его равновесие в электромагнитном поле. Как и в случае цилиндрического тела, на шарообразное тело действуют электромагнитная сила, сила тяжести, сила Архимеда и сила сопротивления среды направленная в противоположную сторону движения тела (см. рис. 4, б).

Пусть динамические составляющие сил равны нулю, тогда выражение для равнодействующей силы на тело, находящееся в индукторе, в зависимости от его положения можно записать как $F(z)=F_{эм}(z)-m_0g(1-\rho_{ж}/\rho_0)$, где $m_0=(4/3)\pi \cdot r_{ш}^3 \rho_0$ - масса шарообразного тела.

При известном локальном электромагнитном давлении на металл полную электромагнитную силу в зависимости от положения шарообразного тела

можно найти как $F_{эм}(z) = 2\pi \int_0^{r_{ш}} P(z, r) r \cdot dr$, где $P(z,$

$r)=(\mu_0/4)(H^2(z+r_{ш}-z')-H^2(z+r_{ш}-z'+2z'))$ - локальное электромагнитное давление. С учетом того, что $z'=\sqrt{r_{ш}^2-r^2}$, получим

$$F(z) = \frac{\pi \mu_0}{2} \int_0^{r_{ш}} \left(H^2 \left(z + r_{ш} - \sqrt{r_{ш}^2 - r^2} \right) - H^2 \left(z + r_{ш} + \sqrt{r_{ш}^2 - r^2} \right) \right) \cdot r \cdot dr - m_0 g \left(1 - \frac{\rho_{ж}}{\rho_0} \right).$$

Равновесие шарообразного тела определяются корнями уравнения

$$\frac{\mu_0}{2} \int_0^{r_{ш}} \left(H^2 \left(z + r_{ш} - \sqrt{r_{ш}^2 - r^2} \right) - H^2 \left(z + r_{ш} + \sqrt{r_{ш}^2 - r^2} \right) \right) \cdot r \cdot dr - \frac{4}{3} r_{ш}^3 \rho_0 g \left(1 - \frac{\rho_{ж}}{\rho_0} \right) = 0. \quad (14)$$

Получена зависимость равнодействующей силы по высоте индуктора для шарообразных алюминиевых тел с диаметром $d_{ш}=5$ мм ($m_0=0,177$ г), $d_{ш}=10$ мм ($m_0=1,41$ г) и $d_{ш}=12,5$ мм ($m_0=2,76$ г) (рис. 8). Положения равновесия для шарообразных тел очень близки с положениями равновесия для цилиндрических тел при $d_{ш}=h_0$. Была проанализирована производная равнодействующей силы в точке равновесия z_1 при изменении амплитуды тока через индуктор. Производная должна быть отрицательной и чем выше по модулю, тем равновесие будет более устойчивым.

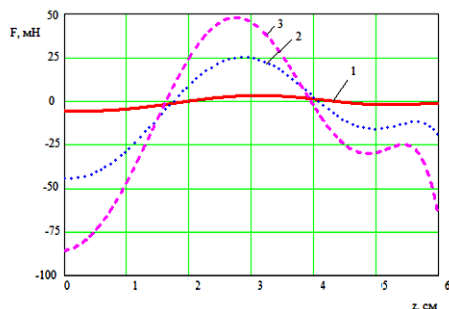


Рис. 8. Равнодействующая сила, воспринимаемая алюминиевым шаром, находящимся в воздухе, в зависимости от его положения по высоте индуктора при: 1 – $d_{ш}=5$ мм; 2 – $d_{ш}=10$ мм; 3 – $d_{ш}=12,5$ мм

Из рис. 9 видно, что производная равнодействующей силы в точке равновесия z_1 при уменьшении тока падает практически линейно и при $I=I_{мин}$ $dF(z_1)/dz=0$. Видно также, что для цилиндрического тела $|dF(z_1)/dz|$ примерно в 1,4 раза больше, чем для шарообразных. Поэтому при одинаковом токе индуктора положение равновесия для цилиндрических тел более устойчивое, чем для шарообразных.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Создана математическая модель поведения амплитуды напряженности магнитного поля в высокочастотном цилиндрическом индукторе с обратным витком. Предложен алгоритм расчета положения равновесия во взвешенном состоянии цилиндрического и сферического тела.

2. Установлено, что положение равновесия металлического тела во взвешенном состоянии в индукторе зависит от его конструкции (от количества витков, от расстояния между витками, от положения обратного витка и др.), от протекающего через индуктор тока, от формы и размеров тела.

3. Существует критическая плотность материала, выше которой индуктор, имеющий включенный последовательно с основной катушкой противовиток с заданным током, не может удерживать металлическое тело данной формы. Критическая плотность материала пропорциональна квадрату амплитуды силы тока, протекающего через индуктор. Есть некое минимальное значение тока через индуктор, ниже которого поле не удерживает тело заданной плотности и данных размеров.

4. Установлено, что при одномерном движении тел и заданном токе индуктора положение равновесия для цилиндрического тела более устойчивое, чем для шарообразного, при одинаковых диаметре и высоте цилиндра и диаметре шара.

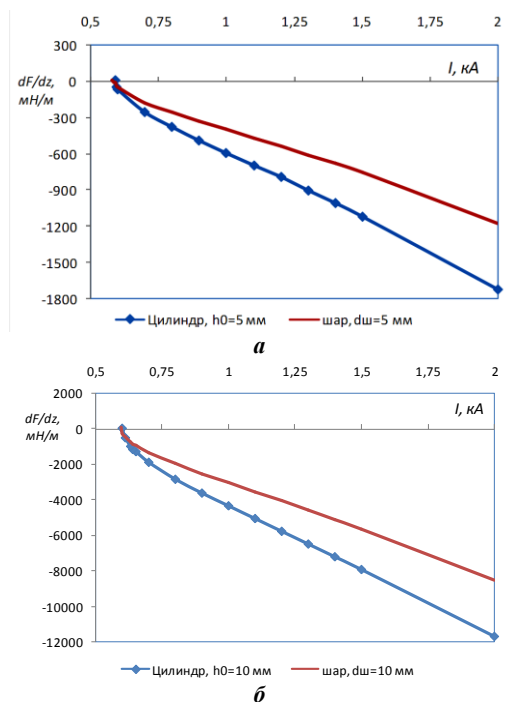


Рис. 9. Производная в точке равновесия для цилиндрического и шарообразного тела от тока через индуктор при: а – $h_0=d_{ш}=5$ мм; б – $h_0=d_{ш}=10$ мм

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фогель А.А. Индукционный метод удержания жидких металлов во взвешенном состоянии. Л.: Машиностроение, 1979. 104 с.
2. Глебовский В.Г., Бурцев В.Т. Плавка металлов и сплавов во взвешенном состоянии. М.: Металлургия, 1974. 176 с.
3. Моделирование поведения магнитного поля в ванне ДППТ при разных конструкциях токоподвода к подовому электроду/ И.М. Ячиков, И.В. Портнова, Р.Ю. Заляутдинов // Математическое и программное обеспечение в промышленной и социальной сферах: междунар. сб. науч. тр. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2012. С. 183-190.
4. Ячиков И.М., Заляутдинов Р.Ю. Исследование магнитного поля в ванне дуговой печи постоянного тока при разной форме токоподводящей шины к подовому электроду // Изв. вузов. Черная металлургия. 2014. №3. С.58-63.
5. Моделирование поведения магнитного поля и положения тела во взвешенном состоянии в высокочастотном индукторе с обратным витком/ И.М. Ячиков, К.Н. Вдовин, М.О. Шмелев // Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах. 2013. №1. С. 47-53.
6. Ячиков И.М., Шмелев М.О. Моделирование напряженности магнитного поля в индукторе с противовитком: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014614306. 2014.

POSITION BALANS OF BODY SUSPENDED IN HIGH-FREQUENCY INDUCTOR WITH REVERSE COIL

Yachikov I.M.

The mathematical model to determine the amplitude of magnetic field and the position of a metal body held in suspension in the inductor coil with reverse coil. Computer simulation of the possible equilibrium points of the cylindrical and spherical bodies in the magnetic field of the inductor was made. It is established that there is a critical density of the material and the minimum value of current through the inductor, which characterizes the maximum theoretical capacity of retaining the body of given sizes.

Keywords: levitation melting, high-frequency inductor, magnetic field strength, suspension of metal, electromagnetic force, stable equilibrium.

REFERENCES

1. Fogel A.A. *Induktsionnyy metod uderzhaniya zhidkikh metallov vo vzveshennom sostoyanii* [Induction method of liquid metals retention in suspended state]. Leningrad: Mechanical Engineering, 1974. 104 p.
2. Glebovsky V.G., Bourtsev V.T. *Plavka metallov i splavov vo vzveshennom sostoyanii* [Melting of metals and alloys in suspended state]. Moscow: Metallurgy, 1974. 176 p.
3. Yachikov I.M., Portnova I.V., Zalyautdinov R.Yu. *Modelirovaniye povedeniya magnitnogo polya v vanne dugovoy pechi postoyannogo toka pri raznykh konstruktivnykh tokopodvoda k podovomu elektrodu* [Modeling of magnetic field behavior in the bath of a DC arc furnace at different structures of current supply to the bottom electrode]. Mathematical and software in the industrial and social spheres: Magnitogorsk: Publishing house of Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2012, pp. 183 190.
4. Yachikov I.M., Zalyautdinov R.Yu. *Issledovaniye magnitnogo polya v vanne dugovoy pechi postoyannogo toka pri raznoy forme tokopodvodyashchey shiny k podovomu elektrodu* [Investigation of magnetic field in the bath of a DC arc furnace at different forms of the busbar connected to the bottom electrode]. Proceedings of universities. Iron and steel. 2014, № 3, pp. 58 63.
5. Yachikov I.M., Vdovin K.N., Shmelev M.O. *Modelirovaniye povedeniya magnitnogo polya i polozeniya tela vo vzveshennom sostoyanii v vysokochastotnom induktore s obratnym vitkom* [Modeling of magnetic field behavior and position of a body suspended in the high-frequency inductor with reverse coil]. Mathematical and software systems in industrial and social spheres. 2013, №1, pp. 47 53.
6. Yachikov I.M., Shmeliov M.O. *Modelirovaniye napryazhennosti magnitnogo polya v induktore s protivovitkom* [Modeling of magnetic field in the inductor with reverse coil]. Certificate of state registration of software № 2014614306. 2014.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Андрюшин Игорь Юрьевич – канд. техн. наук, главный инженер управления главного энергетика, ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат», г. Магнитогорск, Россия.

Арасланов Максим Ссерегеевич – инженер, ЗАО «КонсОМ СКС», г. Магнитогорск, Россия.

Басков Сергей Николаевич – канд. техн. наук, доцент, кафедра прикладной информатики и управляющих систем автоматики, Новотроицкий филиал «Национального исследовательского технологического университета «МИСиС», г. Новотроицк, Россия. E-mail: sbaskov@mail.ru.

Бодров Евгений Эдуардович – канд. техн. наук, доцент, каф. электроники и микроэлектроники, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия.

Браславский Исаак Яковлевич – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой электропривода и автоматизации, ФГАОУ ВПО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н.Ельцина», г. Екатеринбург, Россия. E-mail: i.ya.braslavskiy@urfu.ru.

Варганов Дмитрий Евгеньевич – магистрант кафедры электроснабжения промышленных предприятий ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия.

Васильев Евгений Юрьевич – начальник отдела АСУТП ЗАО «КонсОМ СКС», г. Магнитогорск, Россия.

Газизова Ольга Викторовна – канд. техн. наук, доцент, каф. электроснабжения промышленных предприятий, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: logan_b_7@mail.ru.

Гостев Анатолий Николаевич – электрик цеха, ЛПЦ-10, ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат», г. Магнитогорск, Россия.

Дубина Ира Алексеевна – старший преподаватель кафедры электроснабжения промышленных предприятий ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия.

Есаулкова Дина Владимировна – старший преподаватель, кафедра электропривода и автоматизации, ФГАОУ ВПО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н.Ельцина», г. Екатеринбург, Россия. E-mail: d.v.esaulkova@urfu.ru.

Жданов Александр Иванович – канд. техн. наук, доцент, каф. электроснабжения промышленных предприятий, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия.

Ишметьев Евгений Николаевич – д-р техн. наук, директор по стратегическому развитию ЗАО «КонсОМ СКС», г. Магнитогорск, Россия.

Каримсаков Талапбек Каирбекович – зам. директора по учебно-производственной работе, Актюбинский колледж связи и электротехники, г. Актюбе, Казахстан. E-mail: talapbek.karimsakov@mail.ru.

Кирпичникова Ирина Михайловна – д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия. E-mail: ionkim@mail.ru.

Костылев Алексей Васильевич – канд. техн. наук, доцент, кафедра электропривода и автоматизации, ФГАОУ ВПО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н.Ельцина», г. Екатеринбург, Россия. E-mail: a.v.kostylev@urfu.ru.

Кочкина Александра Владимировна – старший преподаватель

кафедры электроснабжения промышленных предприятий ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия.

E-mail: aleksandra-khlamova@yandex.ru.

Крубцова Анастасия Андреевна – аспирант института энергетики и автоматизированных систем, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: anastasiya_289@mail.ru.

Курилова Наталья Александровна – магистрант кафедры электроснабжения промышленных предприятий ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия.

Лицин Константин Владимирович – аспирант, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: k.litsin@rambler.ru.

Лукьянов Сергей Иванович – д-р техн. наук, профессор, директор института энергетики и автоматизированных систем, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия.

Лымарь Алексей Борисович – студент, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия.

Малафеев Алексей Вячеславович – канд. техн. наук, доцент, каф. электроснабжения промышленных предприятий, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: malapheev_av@mail.ru.

Медведев Алексей Владимирович – аспирант кафедры Электрооборудование и автоматизация промышленных предприятий, Российский государственный профессионально-педагогический университет, г. Екатеринбург, Россия. E-mail: meda1ex@mail.ru.

Мусин Дамир Аскатович – магистрант кафедры электроснабжения промышленных предприятий ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия.

Омельченко Евгений Яковлевич – д-р техн. наук, доц. кафедры автоматизированного электропривода и мехатроники, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: momentum2@yandex.ru.

Панов Александр Николаевич – канд. техн. наук, доц., начальник отдела АСУП ЗАО «КонсОМ СКС», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: panov.a@konsom.ru.

Поляков Владимир Николаевич – д-р техн. наук, ст. науч. сотр., профессор кафедры Электропривод и автоматизация промышленных предприятий, ФГАОУ ВПО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н.Ельцина», г. Екатеринбург, Россия. E-mail: v.n.polyakov@urfu.ru.

Сафин Ильдар Рафкатович – аспирант каф. электроники и микроэлектроники, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: ildar.crz@yandex.ru.

Соломахо Ксения Львовна – ведущий инженер-технолог Центрального филиала ОАО «Челябэнергосбыт», Челябинск, Россия. E-mail: solomahok@mail.ru.

Танич Василий Олегович – магистрант, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия.

Тележкин Олег Анатольевич – аспирант, ФГБОУ ВПО

«Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия.

Тремасов Максим Александрович – магистрант кафедры электроснабжения промышленных предприятий ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия.

Фомин Николай Владимирович – ст. преподаватель кафедры автоматизированного электропривода и механики, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия.

Шрейнер Рудольф Теодорович – д-р техн. наук, профес-

сор, профессор кафедры Электрооборудование и автоматизация промышленных предприятий, Российский государственный профессионально-педагогический университет, г. Екатеринбург, Россия. E-mail: r_shreiner@mail.ru.

Шубин Андрей Григорьевич – начальник центральной электротехнической лаборатории, ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат», г. Магнитогорск, Россия.

Ячиков Игорь Михайлович – д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры вычислительной техники и программирования, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: jachikov@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Andryushin Igor Yurievich – Ph.D. (Eng.), chief engineer of chief power engineer administration, OJSC «Magnitogorsk Iron and Steel Works», Magnitogorsk, Russia.

Araslanov Maksim Sergeevich – engineer, CJSC «KonsOM SKS», Magnitogorsk, Russia.

Baskov Sergey Nikolaevich – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Applied Computer Science and Control Systems Automation Department, «National Research Technological University «MISIS», Novotroitsk branch, Novotroitsk, Russia. E-mail: sbaskov@mail.ru.

Bodrov Eugenii Eduardovich – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Electronics and Microelectronics Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Braslavsky Isaak Yakovlevich – D.Sc. (Eng.), Professor, Head of Electric Drive and Automation Department, FSAEI HPE «Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin», Yekaterinburg, Russia. E-mail: i.ya.braslavskiy@urfu.ru.

Dubina Ira Alekseevna – Assistant Professor of Industrial Power Supply Systems Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Esaulkova Dina Vladimirovna – Assistant Professor, Electric Drive and Automation Department, FSAEI HPE «Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin», Yekaterinburg, Russia. E-mail: d.v.esaulkova@urfu.ru.

Fomin Nikolaj Vladimirovich – Assistant Professor of Automated Electrical Drive and Mechatronics Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Gazizova Olga Viktorovna – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, department of industrial electric power supply, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: logan_b_7@mail.ru.

Gostev Anatoly Nikolaevich – 10th rolling shop electrician, OJSC «Magnitogorsk Iron and Steel Works», Magnitogorsk, Russia.

Ishmetyev Evgeny Nikolaevich – D.Sc. (Eng.), Strategic Development director, CJSC «KonsOM SKS», Magnitogorsk, Russia.

Karimsakov Talapbek Kairbekovich – Deputy Director for training and production work, Aktobe College of Communication and Electrical Engineering, Aktobe, Kazakhstan. E-mail: talapbek.karimsakov@mail.ru.

Kirpichnikova Mikhailovna – D.Sc. (Eng.), Professor, Head of Department, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia. E-mail: ionkim@mail.ru.

Kochkina Aleksandra Vladimirovna – Assistant Professor of Industrial Power Supply Systems Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: aleksandra-khlamova@yandex.ru.

Kostylev Aleksey Vasilievich – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Electric Drive and Automation Department, FSAEI HPE «Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin», Yekaterinburg, Russia. E-mail: a.v.kostylev@urfu.ru.

Krubtsova Anastasiya Andreevna – a post-graduate student of power engineering and automated systems institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: anastasiya_289@mail.ru.

Kurilova Natalja Aleksandrovna – master's degree student of Industrial Power Supply Systems Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Limar Aleksey Borisovich – student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Litsin Konstantin Vladimirovich – post-graduate student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: k.litsin@rambler.ru.

Lukyanov Sergej Ivanovich – D.Sc. (Eng.), Professor, Director of the Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Malafeev Aleksey Vyacheslavovich – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, department of industrial electric power supply, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: malapheev_av@mail.ru.

Medvedev Alexey Vladimirovich – post-graduate student of the Chair of Electrical Equipment and Automation of Industrial Enterprises, Russian State Vocational Pedagogical University, Yekaterinburg, Russia. E-mail: meda1ex@mail.ru.

Musin Damir Ascatovich – master's degree student of Industrial Power Supply Systems Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Omelchenko Evgeniy Yakovlevich – D.Sc. (Eng.), Associate Professor of Automated Electrical Drive and Mechatronics Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: momentum2@yandex.ru.

Panov Alexander Nikolaevich – PhD (Eng), Head of process automation department, CJSC «KonsOM SKS», Magnitogorsk, Russia. E-mail: panov.a@konsom.ru.

Polyakov Vladimir Nikolaevich – D.Sc. (Eng.), Senior Scientific Research Associate, Professor of the Chair of Electric Drive and Automation of Industrial Enterprises, FSAEI HPE «Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin», Yekaterinburg, Russia. E-mail: v.n.polyakov@urfu.ru.

Safin Ildar Rafkatovich – a post-graduate student of Electronics and Microelectronics Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: ildar.crz@yandex.ru.

Shreiner Rudolf Teodorovich – D.Sc. (Eng.), Professor, Professor of the Chair of Electrical Equipment and Automation of Industrial Enterprises, Russian State Vocational Pedagogical University, Yekaterinburg, Russia. E-mail: r_shreiner@mail.ru.

Shubin Andrey Grigorievich – head of central electric laboratory, OJSC «Magnitogorsk Iron and Steel Works», Magnitogorsk, Russia.

Solomakhov Kseniya L'vovna – manufacturing engineer, Chelyabenergosbit, Chelyabinsk, Russia. E-mail: solomakhov@mail.ru.

Tanich Vasily Olegovich – master's degree student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Telezhiin Oleg Anatolievich – postgraduate student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Tremasov Maksim Aleksandrovich – master's degree student, Industrial Power Supply Systems Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Varganov Dmitriy Evgenyevich – master's degree student of Industrial Power Supply Systems Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Vasilyev Evgeny Yurievich – Head of process automation department, CJSC «KonsOM SKS», Magnitogorsk, Russia.

Yachikov Igor Mikhailovich – D.Sc. (Eng.), Professor, the Department of Computer Engineering and Software Engineering, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: yachikov@mail.ru.

Zhdanov Aleksandr Ivanovich – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, department of industrial electric power supply, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Уважаемые коллеги!

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

Требования к оформлению работы. Рекомендуемый объем статьи – 6-10 стр. Страницы не нумеруются. Статьи предоставляются в электронном виде в формате редактора *Microsoft Word 2003* или *2007* на одном из рабочих языков журнала. Текст статьи, сведения об авторах, аннотация, ключевые слова и список литературы представляются на электронном носителе в виде файла и распечаткой на стандартных листах бумаги формата A4. Число авторов одной статьи не должно превышать *пяти* человек.

При наборе статьи рекомендуются **следующие установки:**

- шрифт – *Times New Roman*, размер – 12 пт., междустрочный интервал – 1,5 строки, перенос слов – автоматический;

- при вставке формул использовать встроенный редактор формул *Microsoft Equation 3.0* со стандартными установками, применяется только сквозная нумерация формул. Буквы греческого и русского алфавитов выполняются прямым шрифтом, буквы латинского алфавита – курсивом;

- рисунки и фотографии, вставленные в документ, должны быть четко выполнены, допускать перемещение в тексте и возможность изменения размеров, в форматах **.TIF*, **.JPG*, с разрешением не менее 300 dpi, B&W – для черно-белых иллюстраций, *Grayscale* – для полутонов. Все надписи на рисунках должны быть выполнены шрифтом *Times New Roman*, размер 10 пт. Максимальный размер рисунка с подписью – 150×235 мм. В тексте статьи должны быть подрисовочные подписи в местах размещения рисунков. Таблицы нумеруются, если их число более одной. Заголовок необходим, когда таблица имеет самостоятельное значение, без заголовка дают таблицы вспомогательного характера. При подготовке рукописи необходимо руководствоваться Международной системой единиц СИ.

Статья должна содержать следующие элементы:

1.1. **УДК** (выравнивание – по левому краю). **Наименование статьи** (на русском и английском языках; не более 15 слов) должно кратко отражать содержание статьи. Не рекомендуется использовать сокращения и аббревиатуры.

1.2. **Аффилиция.** Указывается фамилия, имя, отчество авторов (на русском языке и транслитерация), ученая степень, звание, должность, полное название организации (ее официально принятый английский вариант), адрес электронной почты хотя бы одного из авторов. Число авторов одной работы не должно превышать *пяти* человек.

1.3. **Аннотация** (100-250 слов). Включает гипотезу, цель, эксперименты и методы, основные результаты, применение результатов исследования в промышленности (излагается в прошедшем времени). Представляется на русском и английском языках.

1.4. **Ключевые слова:** от 5 до 15 основных терминов. Представляются на русском и английском языках.

1.5. **Основная часть статьи.** По тексту статьи необходимо выделить разделы согласно модели IMRAD.

Введение (Introduction), в котором отражается характеристика объекта, описание и степень разработки проблемы на основе критического анализа литературы (рекомендуется использовать от 10 до 30 источников), формулируется цель исследования. **Теоретические, экспериментальные, технические и технологические методики (Methods)**, в которых приводится описание теоретических подходов, математических моделей, алгоритмов, применяемых методов, экспериментальных исследований и материалов, технических и технологических разработок, оборудования. В статье, основанной на теоретических исследованиях, приводятся математические выкладки, доказательство воспроизводимости результатов и проверка их адекватности. В статье, основанной на экспериментальных исследованиях, описываются материалы и методы, использованные для получения результатов. Приводится общая схема и описание экспериментов. В аналитических статьях должны быть выявлены, сопоставлены и проанализированы наиболее важные и перспективные направления развития отрасли науки, событий и явлений по рассматриваемой тематике. Результаты исследования и их обсуждение, которые должны содержать результаты в виде таблиц, диаграмм и схем с короткими резюмирующими комментариями, их сопоставление с данными, полученными другими авторами. **Заключение и обсуждение (Result and Discussion)** (не более 1/3 страницы) должно содержать оценку степени достижения цели исследования, вклад полученных результатов в область исследования, в том числе практическое применение результатов и рекомендации, перспективы развития рассматриваемой проблемы. **Список литературы (References)** (на русском и английском языках) должен содержать перечень источников, на которые указаны ссылки по тексту статьи. Список литературы оформляется в соответствии с ГОСТ 7.1-2003. В списке литературы не допускается использование более 30% работ авторов статьи и рекомендуется использование не менее 30% работ, опубликованных в зарубежных изданиях. Образец оформления списка литературы на русском и английском языках можно запросить по электронной почте.

Представление материалов. Для опубликования статьи в журнале необходимо представить в электронном виде по e-mail: ecis.red@gmail.com основной текст статьи, рецензию или представление ведущего специалиста в предметной области (сканированный документ) и экспертное заключение о возможности опубликования работы. Публикация в журнале бесплатная. Для получения печатного экземпляра журнала в электронном письме требуется указать необходимое количество экземпляров. Реквизиты и порядок оплаты будут высланы Вам по электронной почте. Контактный тел.: 8(3519)298581, +7 919 406 69 97 (Панова Евгения Александровна).