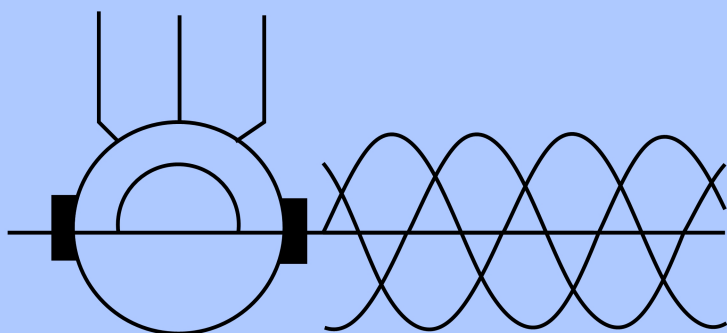
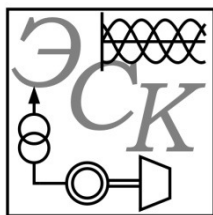


Электротехнические Системы и Комплексы





ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

Издаётся с января 1996 г.

№2(35), июнь 2017

Журнал входит в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, а также в базу данных Российского индекса научного цитирования (РИНЦ).

Редакционная коллегия

Председатель редакционной коллегии:

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

Главный редактор:

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

Ответственный редактор:

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

Секция теории и практики автоматизированного электропривода:

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

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

О.А. Кравченко – доц., д-р техн. наук, ЮРГПУ (НПИ) им. М.И. Платова, г. Новочеркасск, Россия.

Секция электро- и теплоэнергетики:

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

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

Н.Ф. Джагаров – проф., д-р техн. наук, Высшее военно-морское училище им. Николы Вапцарова, г. Варны, Болгария.

Секция энерго- и ресурсосбережения:

Р.Г. Мугалимов – доц., д-р техн. наук, МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия;

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

В.Н. Мещеряков – проф., д-р техн. наук, ЛГТУ, г. Липецк, Россия.

Секция электроснабжения:

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

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

Секция промышленной электроники, автоматики и систем управления:

О.С. Логанова – 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.Н. Ишиметьев – д-р техн. наук, директор по стратегическому развитию ЗАО «КонсОМ СКС», г. Магнитогорск, Россия.

Секция электротехнологий в промышленности:

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

А.Л. Карякин – с.н.с., д-р техн. наук, УГТУ, г. Екатеринбург, Россия;

И.В. Бочкарев – проф., д-р техн. наук, Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова, г. Бишкек, Кыргызстан.

Секция мониторинга, контроля и диагностики электрооборудования:

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

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

Технические редакторы:

Н.В. Кутекина – МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия;

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

© ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2017

Подписной индекс издания 45083 в объединенном каталоге «Пресса России», том 1.

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

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

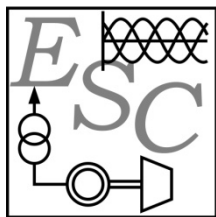
Адрес редакции:

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

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

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

Выход в свет 26.06.2017. Заказ 267. Тираж 500 экз. Цена свободная.



ELECTROTECHNICAL SYSTEMS AND COMPLEXES

PUBLISHED SINCE JAN., 1996

NO. 2(35) JUNE, 2017

The journal is included in the List of peer-reviewed scientific issues publishing main results of Ph.D. thesis in Engineering Science, doctoral thesis, and in the database of Russian Scientific Citation Index (RSCI).

Editorial Board

Head of the Editorial Board:

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

Editor in Chief:

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

Executive Editor:

E.A. Panova – Ph.D. (Engineering), NMSTU,
Magnitogorsk, Russia.

Secton of Theory and Practice of Automated Electric Drive:

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

A.E. Kozyaruk – Professor, D.Sc. (Engineering),
St. Petersburg Mining University, St. Petersburg,
Russia;

O.A. Kravchenko – Associate Professor, D.Sc.
(Engineering), SRSPU (NPI), Novocherkassk,
Russia.

Secton of Power Engineerign:

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

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

N.F. Dzhagarov – Professor, D.Sc. (Engineering),
NVNA, Varna, Bulgaria.

Secton of Energy- and Resources-Economy:

R.G. Mugalimov – Associate Professor, D.Sc.
(Engineering), NMSTU, Magnitogorsk, Russia;

O.I. Osipov – Professor, D.Sc. (Engineering),
MPEI, Moscow, Russia;

V.N. Meshcheryakov – Professor, D.Sc.
(Engineering), LSTU, Lipetsk, Russia.

Secton of Electric Power Supply:

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

Yu.P. Zhuravlev – Ph.D. (Engineering), chief
power engineer, MMK OJSC, Magnitogorsk, Russia.

Secton of Power Electronics, Automation and Control Systems:

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

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

E.N. Ishmet'ev – D.Sc. (Engineering), director
on strategic development, KonsOM SKS CJSC,
Magnitogorsk, Russia.

Secton of Industrial Electro Technology:

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

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

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

Secton of Monitoring, Diagnostics and Control of Electric Equipment:

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

I.M. Yachikov – Professor, D.Sc. (Engineering),
NMSTU, Magnitogorsk, Russia.

Technical Editors:

N.V. Kutekina – NMSTU, Magnitogorsk, Russia;

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

© FSBEI HE NMSTU, 2017

The subscription index of the journal is 45083 in the «Pressa Rossii» union catalog, vol. 1.

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

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

The publisher:

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

The Publishing House of Nosov Magnitogorsk State Technical
University

e-mail: ecis.red@gmail.com

Printed by the NMSTU printing section,

38, pr. Lenina, city of Magnitogorsk, 455000, Russia.

Publication date: 26.06.2017. Order 267. Circulation: 500.

Open price.

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА	4
<i>Лукьянов С.И., Лукьянов Д.С., Логунова О.С., Никифоров Г.В., Красильников С.С.</i> Методика распределения электроприводов тянущих роликов на машине непрерывного литья заготовок	4
<i>Шохин В.В., Андреев А.И., Морковина П.С.</i> Моделирование прокатного стана с использованием физических и математических моделей	13
<i>Крубцов Д.С.</i> Повышение устойчивости активных выпрямителей электроприводов прокатных станов к несимметрии питающего напряжения	19
<i>Греков Э.Л., Филимонов С.И.</i> Сравнение алгоритмов управления экскаваторным фильтрокомпенсирующим устройством в системе электропривода «тиристорный преобразователь-двигатель»	25
ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ	35
<i>Хакимьянов М.И., Хусаинов Ф.Ф., Шафиков И.Н.</i> Проблемы повышения энергетических характеристик электроприводов скважинных штанговых насосов	35
<i>Якимов И.А.</i> Обоснование тиристорного регулирования напряжения трансформатора дуговой сталеплавильной печи	41
ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА, АВТОМАТИКА И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ.....	49
<i>Брякин И.В., Боцкарев И.В.</i> Измерительный датчик для систем неразрушающего контроля стальных канатов	49
<i>Парсункин Б.Н., Самарина И.Г.</i> Система автоматического энергосберегающего управления на основе математической модели газодинамического режима нагревательной методической печи	55
<i>Ишметьев Е.Н., Чистяков Д.В., Панов А.Н., Бодров Е.Э.</i> Автоматизированная система измерения зазоров в подшипниках качения	61
ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ.....	67
<i>Мещеряков В.Н., Титов С.С., Безденежных Д.В.</i> Анализ влияния электромагнитных сил на кинематику движения шара в процессе осесимметричного индукционного нагрева	67
СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ.....	74

CONTENT

THEORY AND PRACTICE OF AUTOMATED ELECTRIC DRIVE.....	4
<i>Luk'yanov S.I., Luk'yanov D.S., Logunova O.S., Nikiforov G.V., Krasil'nikov S.S.</i> Distribution Method of Withdrawal Roll Electric Drives at Continuous Casting Machine	4
<i>Shokhin V.V., Andreev A.I., Morkovina P.S.</i> Simulation of a Rolling Mill Using Physical and Mathematical Models	13
<i>Krubcov D.S.</i> Improving Stability of Active Rectifiers of Electric Rolling Mills to Unbalanced Voltage	19
<i>Grekov E.L., Filimonov S.I.</i> Comparison of Shovel Filter-Compensating Device Control Algorithms in the "Thyris-tor Converter-motor" Electric Drive System.....	25
ENERGY- AND RESOURCES-ECONOMY	35
<i>Khakimyanov M.I., Khusainov F.F., Shafikov I.N.</i> Problems of Improving the Energy Characteristics of Down-hole Sucker Rod Pump Electric Drives	35
<i>Yakimov I.A.</i> Substantiation of Thyristor Regulation of Voltage of Arc Furnace Transformer	41
POWER ELECTRONICS, AUTOMATION AND CONTROL SYSTEMS	49
<i>Bryakin I.V., Bochkarev I.V.</i> Measuring Sensor for Sys-tems of Non-destructive Testing of Steel Ropes.....	49
<i>Parsunkin B.N., Samarina I.G.</i> Automatic Energy-saving Control System based on a Mathematical Model of the Gas-dynamic Mode of a Continuous Furnace.....	55
<i>Ishmetyev E.N., Chistyakov D.V., Panov A.N., Bodrov E.E.</i> Automated System for Rolling Contact Bearings Clearance Measurement	61
INDUSTRIAL ELECTRO TECHNOLOGY	67
<i>Meshcheryakov V.N., Titov S.S., Bezdenzhnykh D.V.</i> Analysis of the Effect of Electromagnetic Forces on Kin-ematics of a Spherical Metal Product in Axisymmetric Induction Heating	67
INFORMATION ABOUT THE AUTHORS	74

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

УДК 621.74.047:62-83

[https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-2\(35\)-4-12](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-2(35)-4-12)Лукьянов С.И.¹, Лукьянов Д.С.², Логунова О.С.¹, Никифоров Г.В.³, Красильников С.С.¹¹ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»²ООО «Компас Плюс»³ООО «Магнитогорскгазстрой»**МЕТОДИКА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ТЯНУЩИХ РОЛИКОВ
НА МАШИНЕ НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ ЗАГОТОВОК**

В работе представлены результаты исследования, направленные на решение проблемы рационального распределения электроприводов тянущих роликов вдоль технологической линии машины непрерывного литья заготовок и выбора минимального количества тянущих роликов на различных участках зоны вторичного охлаждения. Исследования включают: построение и ранжирование критериев для распределения приводных роликов вдоль технологической линии машины непрерывного литья заготовок; разработку методик и алгоритмов расчета требуемого распределения моментов нагрузки по тянущим роликам и распределения электроприводов тянущих роликов вдоль зоны вторичного охлаждения в трех режимах работы электропривода тянуще-правильного устройства; удержание затравки в подготовительном к разливке режиме работы машины непрерывного литья заготовок; вытягивание затравки с головной частью слитка на начальной стадии разливки металла; вытягивание слитка в рабочем режиме разливки. Теоретические исследования проводились с использованием аналитических и численных методов решения алгебраических уравнений, методов структурного моделирования. Доказано, что за счет значительного сокращения количества тянущих роликов срок окупаемости замены на новых машинах непрерывного литья заготовок групповой схемы силового питания электродвигателей на индивидуальную уменьшается с 5,8–7,8 лет при традиционном распределении тянущих роликов вдоль зоны вторичного охлаждения до 2,8–3 лет при их рациональном распределении, рассчитанном по разработанной методике. Результаты работы использованы при проектировании слывовой машины непрерывного литья заготовок криволинейного типа, предназначенной для отливки широких заготовок до 2,5 м. По предложенной методике число электроприводов тянущих роликов сокращено до 56.

Ключевые слова: машина непрерывного литья заготовок, электропривод, тянущий ролик, рациональное распределение, критерии распределения.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из основных тенденций в последние десятилетия развития черной металлургии в мире является производство слывовых заготовок на машинах непрерывной разливки стали. Конструкция машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) постоянно совершенствуется в направлении повышения качества макроструктуры отливаемых заготовок и производительности агрегатов [1–5] и, в частности, электропривода тянуще-правильного устройства (ТПУ) зоны вторичного охлаждения (ЗВО) МНЛЗ, реализующего собственно вытягивание слитка из кристаллизатора и роликовой проводки ЗВО за счет приложения к слитку тянущих усилий, в значительной мере определяющей качество литых заготовок [6–9].

При проектировании новых МНЛЗ сложилась концепция, основанная на мировом опыте непрерывной разливки стали, рассредоточения вдоль ЗВО большого числа (до 70) электроприводов тянущих роликов, что из-за высокой стоимости одного тиристорного преобразователя (ТП) является основной причиной применения на большинстве действующих МНЛЗ групповой схемы силового питания электродвигателей тянущих роликов от одного либо двух ТП [7, 10]. Однако экспериментальные исследования показали, что групповая схема силового питания электродвигателей тянущих роликов не позволяет ограничить растягивающие напряжения в затвердевающем слитке. Идеальным вариантом исполнения электропривода, обеспечивающим отливку заготовок высокого каче-

ства, является индивидуальная схема силового питания электродвигателей [10, 11].

Создание методики расчета числа приводных роликов и их рационального распределения вдоль технологического канала ЗВО позволит повысить качество заготовок за счет ограничения растягивающих продольных усилий в затвердевающем слитке средствами индивидуального электропривода тянущих роликов при одновременном сокращении их числа.

Целью исследования является повышение качества литых заготовок за счет рационального распределения электроприводов тянущих роликов вдоль технологического канала ЗВО МНЛЗ и выбора минимального числа тянущих роликов на различных участках ЗВО и режимах работы МНЛЗ.

**АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ МНЛЗ
КРИВОЛИНЕЙНОГО ТИПА И ИХ РОЛИКОВЫХ ПРОВОДОВ**

Типовая технологическая схема МНЛЗ криволинейного типа приведена на **рис. 1**. Согласно принятой технологии жидкую сталь от конвертера в ковшах 1 подают на сталеразливочный стенд 2 и далее через промежуточный ковш 3 в кристаллизатор 4, в котором выполняется первичное охлаждение жидкой стали и формирование по периметру корочки затвердевшего металла. Заготовка проходит зону вторичного охлаждения в составе форсунок 5 распыления охладителя, осуществляющих полную по сечению кристаллизацию слитка, не приводных 6 и приводных 7 удерживающих роликов до приемного рольганга 8, на котором происходит отделение затравки от слитка, и далее поступает на устройство разделения слитка на мерные длины (9).

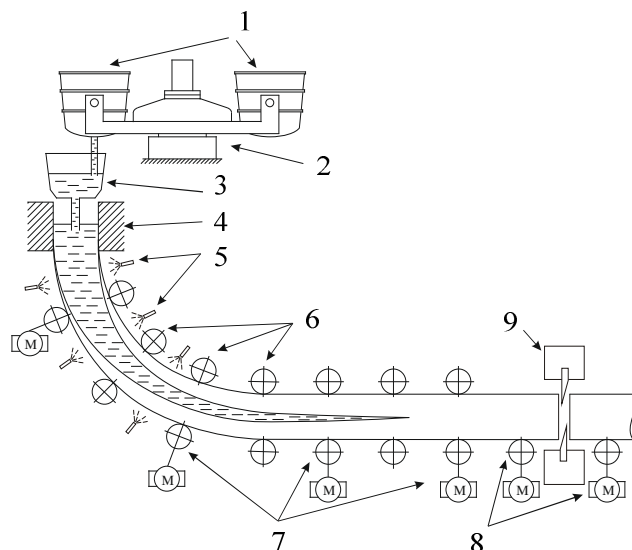


Рис. 1. Типовая технологическая схема МНЛЗ криволинейного типа

Технологический канал ЗВО МНЛЗ криволинейного типа разделен на три участка: радиальный; криволинейный, в котором осуществляется разгиб заготовки; горизонтальный [1, 12]. Роликовая проводка ЗВО состоит из 98 пар роликов в верхнем и нижнем рядах. Все ролики в верхнем ряду выполнены неприводными, а в нижнем ряду установлены как приводные (тянущие) ролики, так и неприводные. Вытягивание слитка шириной 1150–2350 мм выполняется 70 приводными роликами.

Основными технологическими требованиями к электроприводу ТПУ с позиций распределения электроприводов тянущих роликов вдоль ЗВО являются: надежное удержание затравки в подготовительном режиме работы машины; гарантированное вытягивание затравки и головной части слитка из кристаллизатора и роликовой проводки ЗВО на заданной скорости до отводящего рольганга в начальной стадии разливки металла; надежное (без буксовок) вытягивание заготовки из кристаллизатора и роликовой проводки ЗВО в рабочем режиме разливки стали; минимизация растягивающих продольных усилий в слитке средствами электропривода ТПУ за счет целесообразного распределения моментов вытягивания слитка между электроприводами тянущих роликов [13–15].

В известных публикациях по электроприводу ТПУ приведены общие методики расчета моментов нагрузки и мощности электропривода ТПУ с учетом особенностей вытягивания слитка на радиальном, криволинейном и горизонтальном участках ЗВО [1, 7, 10, 13]. При этом распределение тянущих роликов вдоль технологической линии ЗВО выполняется «на основе мирового опыта непрерывной разливки стали и опыта создания и совершенствования машин криволинейного типа» [1]. Единая научно обоснованная методика расчета числа тянущих роликов и их рационального, обеспечивающего выполнение технологических требований к электроприводу ТПУ, распределения вдоль ЗВО отсутствует [10].

КРИТЕРИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ТЯНУЩИХ РОЛИКОВ

Согласно основным технологическим требованиям, предъявляемым к электроприводу тянущих роликов, предложен следующий перечень критериев, которым должно удовлетворять распределение тянущих роликов вдоль ЗВО:

1. В подготовительном режиме работы МНЛЗ электропривод тянущих роликов должен приложить к ней требуемое по технологии общее усилие стопорения. Данное условие будет выполнено, если на контакте каждого тянущего ролика с затравкой будет выполняться условие

$$F_{stj} \leq F_{frj}, j = 1 \dots m_{dr}, \quad (1)$$

где F_{stj} – усилие стопорения, прикладываемое к затравке j -м приводным роликом, Н; F_{frj} – усилие сцепления между j -м тянущим роликом и затравкой, Н; m_{dr} – количество приводных роликов, имеющих контакт с затравкой.

2. В начальной стадии разливки стали электропривод тянущих роликов должен приложить к затравке и заготовке общее усилие вытягивания, достаточное для надежного (без буксовок) их перемещения на заданной скорости [14, 17]. Для выполнения этого на контактах всех тянущих роликов с затравкой и головной частью слитка должно выполняться условие

$$\begin{cases} F_{pj} < F_{frj}; \\ F_{pfrj} < F_{frfrj}, \end{cases} \quad (2)$$

где F_{pj} – усилие вытягивания, прикладываемое j -м тянущим роликом, Н; F_{frj} – усилие сцепления между j -м тянущим роликом и слитком, Н; j – номер тянущего ролика, при $j=1 \dots n_{dr}$, имеющего контакт со слитком, и при $j=(n_{dr}+1) \dots m_{dr}$, имеющего контакт с затравкой; F_{pfrj} – усилие вытягивания, прикладываемое j -м тянущим роликом к затравке, Н; F_{frfrj} – усилие сцепления между j -м тянущим роликом и затравкой, Н; $m_{dr}-n_{dr}$ – количество тянущих роликов в данном положении затравки, имеющих с ней контакт.

3. В рабочем режиме электропривод тянущих роликов должен обеспечить вытягивание слитка с требуемым по технологии усилием с учетом увеличения момента сопротивления вытягиванию слитка на низкой скорости в k_c раз в случае вытягивания слитка на низкой скорости при замене промежуточного ковша и погружного стакана. При этом на контакте каждого тянущего ролика должно выполняться условие

$$F_{pj} \leq F_{frj}. \quad (3)$$

4. На рабочей скорости разливки стали в каждом межроликовом пространстве ЗВО величина растягивающих продольных усилий должна быть ограничена на минимально возможном уровне (в идеальном случае на уровне нуля):

$$F_{strj} \leq \sup\{F_{str}\} \text{ при } F_{str} \rightarrow 0, \quad (4)$$

где F_{str} – величина растягивающих продольных усилий,

создаваемых в слитке электроприводом тянущих роликов, Н; F_{srj} – величина растягивающих продольных усилий в каждом межроликовом пространстве ЗВО, Н.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ
ТЯНУЩИХ РОЛИКОВ ВДОЛЬ ЗВО
ПО КРИТЕРИЮ УДЕРЖАНИЯ ЗАТРАВКИ
В ПОДГОТОВИТЕЛЬНОМ К РАЗЛИВКЕ РЕЖИМЕ

Предложена следующая методика расчета распределения тянущих роликов вдоль ЗВО по критерию удержания затравки в подготовительном к разливке режиме работы МНЛЗ. Методика основана на выполнении следующих действий.

1. С учетом того, что первый тянущий ролик по техническим причинам не может быть расположен ближе l_0 к кристаллизатору рассчитываются номера n_i и число M роликовых пар, имеющих контакт с затравкой:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^{n_0-1} t_{Stepi} < l'_{fir} - l_{Cr} < \sum_{i=1}^{n_0} t_{Stepi}; \\ \sum_{i=1}^{n_1-1} t_{Stepi} < l_0 - l_{Cr} < \sum_{i=1}^{n_1} t_{Stepi}; \\ \sum_{i=1}^{n_2} t_{Stepi} < l'_{fir} + l_{fir} - l_{Cr} < \sum_{i=1}^{n_2+1} t_{Stepi}; \\ M = n_2 - n_0 + 1, \end{aligned} \quad (5)$$

где n_0 – номер ближайшей к кристаллизатору роликовой пары, имеющей контакт с телом затравки; n_1 – номер роликовой пары, расположенной от кристаллизатора на расстоянии l_0 ; n_2 – номер дальней от кристаллизатора роликовой пары, имеющей контакт с телом затравки; t_{Stepi} – шаг установки роликов в ЗВО, м; l_{Cr} – расстояние от кристаллизатора до первой пары роликов, м; l'_{fir} – расстояние от кристаллизатора первой пары роликов, имеющей контакт с телом затравки, м; l_{fir} – длина тела затравки, м.

2. По методикам [7, 10] рассчитывается требуемая величина усилий стопорения и сцепления. Расчет выполняется для самых тяжелых условий удержания затравки: минимальных значений сил сцепления затравки с роликами и наибольших значений сил тяжести.

3. Выполняется расчет требуемого числа m_{dr} приводных роликов:

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^{m_{пр}-1} F_{fr\ firj} < G_{M\ max} + G_{fir} \times \\ \times \cos \alpha_{fir} - \sum_{i=1}^M F_{firi} < \sum_{j=1}^{m_{пр}} F_{fr\ firj}, \end{aligned} \quad (6)$$

где $G_{M\ max}$ – сила тяжести жидкого металла в кристаллизаторе, Н; G_{fir} – сила тяжести затравки; α_{fir} – угол между вертикалью и касательной к телу затравки в центре её тяжести; M – число пар роликов, имеющих контакт с телом затравки; F_{firi} – усилие сопротивления протягиванию затравки через i -ю пару роликов, Н.

Для технологических условий и параметров промышленности МНЛЗ на основе предложенной методики разработана математическая модель расчета распреде-

ления тянущих роликов на радиальном участке ЗВО. В результате исследования на модели установлено, что надежное удержание затравки в роликовой проводке ЗВО и жидкого металла в кристаллизаторе происходит естественным образом без участия электропривода тянущих роликов за счет сил трения между роликами и затравкой от распорного давления в камерах затравки на неприводные ролики ЗВО: $F_{sr} = -39,4 \text{ кН} < 0$.

МЕТОДИКА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ
ТЯНУЩИХ РОЛИКОВ ВДОЛЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КАНАЛА
ЗВО В НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ РАЗЛИВКИ

Методика основана на выполнении следующих действий.

1. Исходными условиями для расчета распределения электроприводов тянущих роликов вдоль ЗВО выбираются:

- ближайший к кристаллизатору тянущий ролик может быть установлен в позиции n_1 ;
- ролики имеют паспортные размеры (износ и остаточный прогиб бочки отсутствуют);
- тянущий ролик может занимать любую позицию в нижнем ряду роликовой проводки ЗВО, начиная с номера n_1 до номера последнего ролика в ЗВО.

2. Для каждого положения головной части слитка, начиная от кристаллизатора до последней пары роликов ЗВО, по известным математическим соотношениям [10, 12, 16] вычисляются массивы значений: усилий сцепления между роликами и затравкой; усилий давления слитка на ролики; усилий сцепления между роликами и слитком; усилий сопротивления вытягиванию слитка и затравки из каждой пары роликовой проводки. Расчет выполняется для самых неблагоприятных условий вытягивания слитка и затравки из ЗВО:

- наименьших значений коэффициентов сцепления между слитком и роликом;
- наибольших значений коэффициентов трения в опорах роликов и на контактах роликов со слитком и затравкой;
- наибольшей ширины отливаемой заготовки.

3. На начальной стадии расчета при положении переднего конца заготовки в кристаллизаторе принимается решение: первый тянущий ролик занимает позицию в нижнем ряду с номером n_1 в общей нумерации роликовых пар.

4. Для этого положения слитка по данным массива п. 2 выполняется проверка неравенства

$$F_{fr} + F_{fr\ fir} > F_{Cr} + F_C + F_{fir} - G, \quad (7)$$

где $F_{fr} = \sum_{j=1}^{n_{dr}} F_{frj}$ – общее усилие сцепления привод-

ных роликов со слитком, Н; F_{frj} – усилие сцепления j -ого приводного ролика и слитка, рассчитанное по условиям п. 2; n_{dr} – число приводных роликов,

имеющих контакт со слитком; $F_{fr\ fir} = \sum_{j=n_{dr}+1}^{m_{dr}} F_{fr\ firj}$ –

общее усилие сцепления приводных роликов с затравкой, Н; $F_{fr\ firj}$ – усилие сцепления приводного

ролика и затравки, рассчитанное по условию п. 2, Н; $m_{dr} \cdot n_{dr}$ – число приводных роликов, имеющих контакт с затравкой; F_{Cr} – усилие сопротивления вытя-

гиванию слитка из кристаллизатора, Н; $F_C = \sum_{i=1}^N F_{Ci}$ –

общее усилие сопротивления вытягиванию слитка из роликовых пар, Н; F_{Ci} – усилие сопротивления вытягиванию слитка из i -й пары роликов, Н; N – количество роликовых пар, имеющих контакт со

слитком; $F_{fir} = \sum_{i=1}^M F_{firi}$ – общее усилие сопротивле-

ния вытягиванию затравки из M роликовых пар, Н; M – количество роликовых пар, имеющих контакт с затравкой; G – сумма сил тяжести металла в кристаллизаторе и продольных составляющих сил тяжести слитка в ЗВО и затравки, Н.

Если неравенство (7) не выполняется, то по выражению (8) рассчитывается требуемое число тянущих роликов m_{dr} :

$$F_{firi} \cdot (m_{dr} - 1) < F_{firi} \left(\frac{M - m_{dr}}{M} + 1 \right) -$$

$$-G_{firT} - G_T + F_{Cr} < F_{firi} \cdot m_{dr}, \quad (8)$$

где G_{firT} – продольная составляющая силы тяжести затравки, Н; G_T – продольная составляющая силы тяжести слитка, Н.

Далее осуществляется переход к следующему положению переднего конца слитка (в пространстве между первой роликовой парой и второй).

5. Тянущие ролики равномерно распределяются в роликовом пространстве между n_1 и n_2 роликовыми парами. Позиции тянущих роликов фиксируются и осуществляется переход к следующей позиции слитка.

6. Для нового положения затравки и слитка вновь выполняется расчет составляющих неравенства (7), и оно проверяется на соответствие. Если неравенство выполняется, то осуществляется переход к следующему положению слитка и затравки. В противном случае следующий тянущий ролик устанавливается в позиции роликовой пары, наиболее удаленной от кристаллизатора и имеющей контакт с затравкой. После этого вновь проверяется условие (7), и если оно выполняется, то осуществляется переход к следующей позиции головной части слитка.

Расчет продолжается до тех пор, пока головная часть слитка не выйдет из последней роликовой пары ЗВО.

В результате расчета распределения тянущих роликов вдоль ЗВО по предложенной методике для параметров промышленной МНЛЗ установлено (рис. 2): общее число электроприводов тянущих роликов в начальной стадии разлива металла можно существенно сократить (с 70 до 21 тянущего ролика); при этом на радиальном участке число приводных роликов можно сократить с 16 до 7, на криволинейном – с 20 до 5 и на горизонтальном – с 34 до 9, причем в первой группе горизонтального участка с 10 до 3 и во второй группе с 24 до 5.

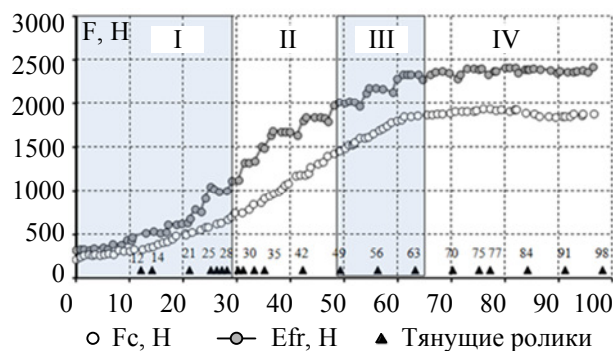


Рис. 2. Распределение электроприводов тянущих роликов вдоль ЗВО по критерию вытягивания затравки с головной частью слитка

Рис. 2. Распределение электроприводов тянущих роликов вдоль ЗВО по критерию вытягивания затравки с головной частью слитка

МЕТОДИКА РАСЧЕТА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ТЯНУЩИХ РОЛИКОВ В РАБОЧЕМ РЕЖИМЕ РАБОТЫ МНЛЗ

С целью определения реального изменения общего момента сопротивления M_{c2} при вытягивании слитка на низких скоростях во время замены промежуточного ковша или погружного стакана относительно величины момента M_{c1} при вытягивании слитка на рабочей скорости выполнена обработка временных диаграмм изменения общего тока нагрузки электропривода ТПУ. В результате дисперсионного и регрессионного анализа изменения величины коэффициента $k_c = M_{c2}/M_{c1}$ (объем выборки $N=1536$ наблюдений) получено уравнение регрессии и рассчитан его доверительный интервал изменения коэффициента k_c в функции временного интервала Δt вытягивания слитка на низкой скорости. Установлено, что наибольшая величина коэффициента составляет $k_c = 1,62$, что позволяет выполнить более точный расчет распределения приводных роликов вдоль ЗВО по третьему критерию.

Методика расчета распределения тянущих роликов вдоль ЗВО по критерию надежного вытягивания слитка из кристаллизатора и роликовой проводки ЗВО в рабочем режиме работы МНЛЗ с учетом увеличения общего момента сопротивления вытягиванию слитка в k_c раз на низкой скорости вытягивания слитка включает следующую последовательность расчета.

1. Исходные допущения:

- прогиб и износ бочки роликов ЗВО отсутствуют;
- выставка роликового полотна МНЛЗ и растворы роликовых пар соответствуют их паспортным параметрам;
- закрытие лунки жидкой фазы в слитке на рабочей скорости разлива происходит в районе 64 роликовой пары ЗВО;
- первый тянущий ролик установлен в нижнем ряду роликовой пары n_1 , расположенной на расстоянии l_0 от кристаллизатора;
- приводной ролик может быть установлен в нижнем ряду роликовой пары, начиная с номера n_1 до номера последней роликовой пары.

2. Рассчитываются массивы усилий давления слитка на ролики P_i и усилие F_{Cr} сопротивления вытягиванию слитка из кристаллизатора для самых неблагоприятных

ятных условий вытягивания слитка из ЗВО на рабочей скорости разливки стали.

Величина кратности k_c увеличения момента сопротивления вытягиванию слитка при разливке на низкой скорости принята экспериментально определенной величине.

В соответствии с последним по данным исходного массива P_i выполняется расчет усилий давления P'_i на ролики при разливке стали на низкой скорости по выражению

$$P'_i = k_c \cdot P_i. \quad (9)$$

С учетом P'_i на разработанной математической модели [10] выполняется расчет массивов усилий сопротивления F'_{ci} вытягиванию слитка и усилий сцепления F'_{fi} .

3. С учетом того, что первый тянущий ролик установлен в нижнем ряду роликовой пары с номером n_1 , выполняется расчет величины дисбаланса усилий ΔF_{p1} между требуемой по технологии величиной усилия F_{p1} вытягивания слитка из кристаллизатора и первых n_1 пар роликов и величиной реального усилия вытягивания F'_{p1} , которое по условию сцепления ролика со слитком способен приложить электродвигатель первого тянущего ролика к заготовке:

$$\Delta F_{p1} = F_{p1} - F'_{p1}, \quad (10)$$

$$\text{где } F'_{p1} = F'_{fr1}(1 - 0,05); \quad (11)$$

$F'_{fr1} \cdot 0,05$ – принятый в расчете запас усилий для предотвращения срыва контакта между тянущим роликом и слитком.

4. Позиция n_2 второго тянущего ролика определяется из системы неравенств:

$$\begin{cases} \Delta F_{p1} + \sum_{i=n_1+1}^{n_2} F'_{Ci} - \sum_{i=n_1+1}^{n_2} G_{Ti} < F'_{fr2(n_2)} \cdot (1 - 0,05); \\ \Delta F_{p1} + \sum_{i=n_1+1}^{n_2+1} F'_{Ci} - \sum_{i=n_1+1}^{n_2+1} G_{Ti} > F'_{fr2(n_2+1)} \cdot (1 - 0,05), \end{cases} \quad (12)$$

где F'_{fr2} – усилие сцепления второго тянущего ролика со слитком при условии, что он занимает позицию в нижнем ряду роликовой пары с номером n_2 , Н; $F'_{fr2(n_2+1)}$ – усилие сцепления второго тянущего ролика со слитком при условии, что он занимает позицию в нижнем ряду следующей роликовой пары с номером n_2+1 , Н.

5. Позиции следующих за вторым j -х тянущих роликов определяются из последовательного решения следующей системы неравенств:

$$\begin{cases} \sum_{i=n_{(j-1)}+1}^{n_j} F'_{Ci} - \sum_{i=n_{(j-1)}+1}^{n_j} G_{Ti} < F'_{frj(n_j)}(1 - 0,05); \\ \sum_{i=n_{(j-1)}+1}^{n_j+1} F'_{Ci} - \sum_{i=n_{(j-1)}+1}^{n_j+1} G_{Ti} > F'_{frj(n_j+1)}(1 - 0,05), \end{cases} \quad (13)$$

где $F'_{frj(n_j)}$ – усилие сцепления между слитком и j -м тянущим роликом при условии его расположения в позиции n_j пары роликов; $F'_{frj(n_j+1)}$ – усилие сцепления между слитком и j -м тянущим роликом при условии его расположения в позиции (n_j+1) пары роликов.

На примере МНЛЗ промышленного предприятия в соответствии с разработанной методикой выполнен расчет распределения тянущих роликов по третьему критерию (3) в рабочем режиме разливки с учетом коэффициента k_c увеличения общего момента сопротивления вытягиванию слитка при разливке на низкой скорости и усилия давления на ролики от протягивания затвердевшей заготовки на горизонтальном участке ЗВО. Результаты расчета приведены на рис. 3.

На рис. 3 темным цветом выделены усилия в приводных роликах. Согласно рис. 3 в рабочем режиме разливки стали число электроприводов за счет их рационального распределения вдоль ЗВО допустимо сократить с 70 до 24 (на радиальном участке – 4 ролика, на криволинейном – 7 приводных роликов, на первом горизонтальном – 4 приводных ролика и на втором горизонтальном – 9 приводных роликов).

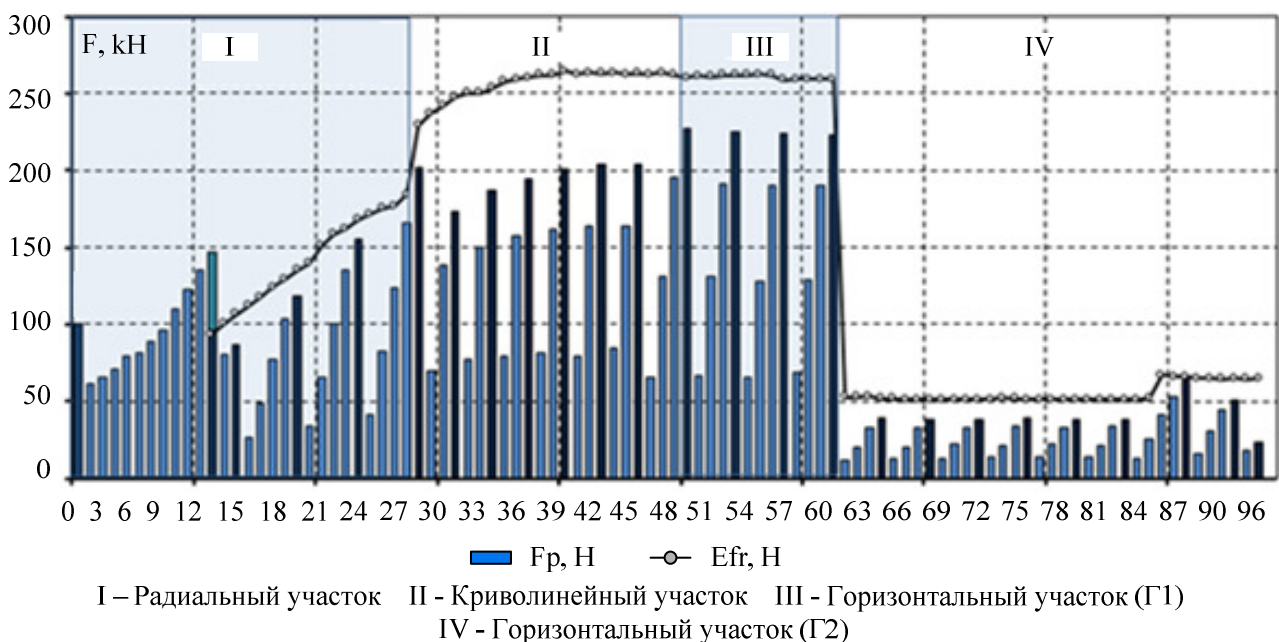


Рис. 3. Распределение тянущих роликов по критерию надежного вытягивания слитка в рабочем режиме разливки

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ
РАСЧЕТА ПРОДОЛЬНЫХ УСИЛИЙ,
СОЗДАВАЕМЫХ В СЛИТКЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ТПУ

Предложенная математическая модель расчета продольных усилий (14) отличается от ранее известных [10, 13] тем, что позволяет рассчитывать продольные усилия в слитке на каждом шаге роликовой проводки ЗВО.

$$\begin{aligned} F_{0,1} &= F_{Cr}; \\ F_{1,2} &= F_{Cr} + F_{C1}; \\ F_{i-1,i} /_{i=n_1} &= F_{Cr} + \sum_{i=1}^{n_1-1} F_{Ci}; \\ F_{i-1,i} /_{(n_1+1)<i<(n_2+1)} &= F_{Cr} + \sum_{i=1}^{i-1} F_{Ci} - F_{p1}; \\ F_{i-1,i} /_{(n_j+1)<i<(n_{(j+1)}+1)} &= F_{Cr} + \sum_{i=1}^{i-1} F_{Ci} - \sum_{j=1}^j F_{pj}; \\ F_{i-1,i} /_{(n_{(m-1)}+1)<i<(n_m+1)} &= F_{Cr} + \sum_{i=1}^{i-1} F_{Ci} - \sum_{j=1}^{m-1} F_{pj}; \end{aligned} \quad (14)$$

Согласно четвертому критерию во всех межроликовых пространствах ЗВО должно выполняться условие

$$F_{i-1,i} /_{(n_j+1)<i<(n_{(j+1)}+1)} = F_{Cr} + \sum_{i=1}^{i-1} F_{Ci} - \sum_{j=1}^j F_{pj} < 0. \quad (15)$$

Согласно (15) решение задачи минимизации продольных усилий возможно лишь в том случае, если в каждом межроликовом пространстве ЗВО величина усилия вытягивания, прикладываемая к слитку предыдущими электроприводами тянущих роликов, будет превышать текущее значение усилия сопротивления F_c вытягиванию слитка. При этом электродвигатели тянущих роликов в слитке должны формировать обратные по знаку растягивающим усилия подпора.

С учетом последнего предложена следующая методика распределения тянущих роликов вдоль ЗВО по четвертому критерию. Она включает последовательность операций:

1. С учетом того, что первый тянущий ролик ($j=1$) занимает позицию n_1 в общей нумерации i роликовых пар ЗВО по системе уравнений (14) для части роликовой проводки с номерами пар $i < n_1+1$, выполняется расчет распределения растягивающих продольных усилий в слитке. Усилие вытягивания F_{p1} , прикладываемое к слитку электродвигателем первого тянущего ролика, определяется по выражению (11).

2. По выражению

$$F_{i-1,i} /_{i=(n_1+1)} = F_{Cr} + \sum_{i=1}^{n_1} F_{Ci} - F_{p1} \quad (16)$$

рассчитывается величина растягивающего продольного усилия, которое необходимо сформировать в слитке в пространстве между n_1 и n_1+1 роликовыми парами электроприводу второго тянущего ролика для компенсации дисбаланса усилий ΔF_{p2} (10).

Если в результате расчета по (14) $F_{i-1,i/i=(n_1+1)} < 0$, то есть выполняется общее условие (15) к распределению тянущих роликов по критерию минимизации растягивающих продольных усилий в слитке, то выполняется переход к п. 5 методики.

3. Если $F_{i-1,i/i=(n_1+1)} > 0$, что противоречит условию (15), то принимается решение о необходимости установки в позиции n_1+1 следом за первым тянущим роликом второго тянущего ролика. Для позиции n_1+1 второго тянущего ролика по выражению (11) выполняется расчет усилия вытягивания F'_{p2} . С учетом этого для межроликового пространства между n_1+1 и n_2+1 тянущими роликами по (15) выполняется проверка условия $F_{i-1,i} < 0$. Если неравенство справедливо, то осуществляется переход к п. 5. Иначе принимается решение о необходимости установки в позиции n_1+2 третьего тянущего ролика и расчет по п. 4 повторяется до тех пор, пока не будет выполняться неравенство (15).

4. Выбор позиции следующего тянущего ролика включает в себя:

– расчет по уравнению

$$F_{n_j,(n_j+1)} = F_{Cr} + \sum_{i=1}^{n_j} F_{Ci} - \sum_{j=1}^j F_{pj} \quad (17)$$

величины продольного усилия в пространстве между парой роликов с номером n_j , в нижнем ряду которой установлен j -й тянущий ролик, и следующей за ней роликовой парой n_j+1 ;

– расчет числа $l=1 \dots \infty$ неприводных пар роликов, через которые j -й тянущий ролик может протолкнуть заготовку за счет подпора в слитке, величиной усилия подпора, равного величине нагрузки следующего тянущего ролика. Величина l определяется из решения системы следующих неравенств:

$$\begin{cases} F_{n_j,(n_j+1)} + \sum_{i=(n_j+1)}^{(n_j+1)+(\ell-1)} F_{Ci} < 0; \\ F_{n_j,(n_j+1)} + \sum_{i=(n_j+1)}^{(n_j+1)+\ell} F_{Ci} > 0; \end{cases} \quad (18)$$

– определение позиции следующего $j+1$ тянущего ролика по выражению

$$n_{j+1} = n_j + l + 1. \quad (19)$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что на радиальном участке ЗВО наивысшим рангом с позиций числа приводных роликов обладает методика распределения роликов по условию надежного вытягивания затравки с головной частью слитка (рис. 2–4), а на криволинейном и горизонтальном участках ЗВО – методика их распределения по условию вытягивания слитка в рабочем режиме работы МНЛЗ. Поэтому с целью оптимизации последовательности расчета предложено первоначально выполнять расчет распределения тянущих роликов на участках ЗВО по указанным методикам, а по остальным методикам выполнять проверку на выполнение их условий

с коррекцией в случае необходимости позиций электроприводов.

Разработана обобщенная методика рационального распределения электроприводов тянущих роликов вдоль ЗВО, в которых указана последовательность расчета с учетом коррекции числа тянущих роликов и их позиций при проверке выполнения условий критериев распределения электроприводов тянущих роликов с более низким рангом.

Для технологических условий промышленной МНЛЗ по обобщенной методике выполнен расчет рационального распределения электроприводов тянущих роликов вдоль ЗВО. Доказано, что без нарушения технологических требований, предъявляемых к электроприводу тянущих роликов с позиций обеспечения им стабильной работы МНЛЗ и отливки заготовок высокого качества, число электроприводов тянущих роликов допустимо сократить более чем в 2 раза, с 70 до 28. При этом в самых неблагоприятных условиях разливки стали на МНЛЗ запас усилий стопорения при удержании затравки в ЗВО составляет 117%, запас усилий сцепления при вытягивании затравки с головной частью слитка в зависимости от их положения в роликовой проводке ЗВО составляет 11,7–34,9%, а при вытягивании заготовки в рабочем режиме разливки – 32%. При этом электроприводом ТПУ в пространстве между 14 и 98 парами роликов выполняется ограничение на нулевом уровне растягивающих продольных усилий в слитке.

Технико-экономический анализ вариантов исполнения электропривода ТПУ установил, что срок

окупаемости при замене на новых МНЛЗ существующей схемы электропривода ТПУ с групповой схемой силового питания всех электродвигателей тянущих роликов от одного тиристорного преобразователя на индивидуальную схему силового питания электродвигателей тянущих роликов с рациональным их распределением вдоль ЗВО, рассчитанном по разработанной методике, составляет 2,8–3 года, а при использовании индивидуального электропривода с традиционной схемой распределения приводов – 5,8–7,8 лет на МНЛЗ № 5 ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат».

На МНЛЗ №5 ОАО «ММК» впервые на отечественных слябовых МНЛЗ криволинейного типа внедрен индивидуальный электропривод тянущих роликов. Число тянущих роликов сокращено с 70 до 56.

5. Аналогично п. 4 выполняется расчет позиций остальных тянущих роликов в направлении от кристаллизатора к отводящему ролюгангу МНЛЗ.

Анализ результатов расчета распределения электроприводов тянущих роликов вдоль ЗВО, выполненный для технологических условий и параметров промышленной МНЛЗ по критерию минимизации растягивающих продольных усилий в слитке, показал (см. рис. 4), что за счет целесообразного распределения вдоль ЗВО тянущих роликов и прикладываемых ими к слитку усилий вытягивания число электроприводов тянущих роликов допустимо снизить с 70 до 19 (на радиальном участке – 6 приводных роликов; на криволинейном – 5; на первом горизонтальном – 4 и втором горизонтальном – 4).

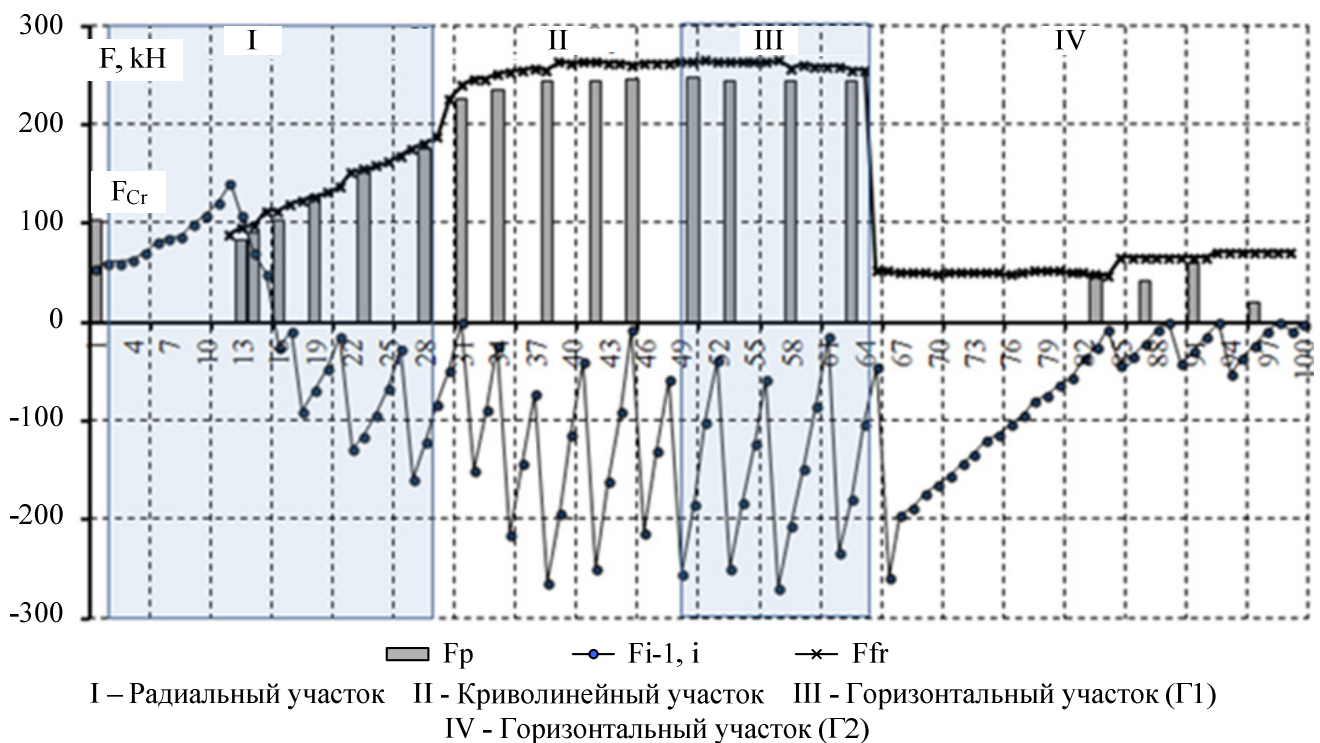


Рис. 4. Распределение электроприводов тянущих роликов вдоль технологического канала ЗВО для параметров промышленной МНЛЗ по критерию минимизации растягивающих продольных усилий в слитке

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ницковских В.М., Карлинский С.Е., Беренов А.Д. Машины непрерывного литья заготовок. М.: Metallurgiya, 1991. 272 с.
2. Safonov, D.S., Logunova, O.S., Chistiakov, D.V. (2016) Optimization of nozzle layout in continuous casting machine. Bulletin of the South Ural State University, Series: Mathematical Modelling, Programming and Computer Software 1(9): 114 – 122.
3. Luk'yanov, S.I., Suspitsyn, E.S., Krasil'nikov, S.S., Konovalov, M.V. (2014) Diagnosing technological defects in continuous slab casters. Metallurgist 58:310-315. doi:10.1007/s11015-014-9907-1
4. Lukyanov S.I., Suspitsyn E.S., Krasilnikov S.S., Shvidchenko D.V. (2015) Intelligent system for prediction of liquid metal breakouts under a mould of slab continuous casting machines. Int J Adv Manuf Technol 79(9):1861–1868. doi:10.1007/s00170-015-6945-1.
5. Logunova, O.S., Devyatov, D.Kh., Nurov, Kh.Kh. (2005) Computerized quality estimates of continuous-cast billet. Steel in Translation 35(9): 36-42.
6. Lukyanov S.S., Belyi A.V., Logunova O.S., Shvidchenko D.V., Pishnograev R.S., Suspitsyn Ye.S. (2017) Strand withdrawal rate stabilization: via the electric drive of the secondary cooling zone of a continuous casting machine. Manuf Technol 89 (5): 1975-1987. doi:10.1007/s00170-016-9224-x.
7. Марголин Ш.М. Электропривод машин непрерывного литья заготовок. М.: Metallurgiya, 1987. 279 с.
8. Электропривод тянущих роликов МНЛЗ/ Лукьянов С.И., Селиванов И.А., Фомин Н.В., Васильев А.Е. // Привод и управление. 2001. №1. С. 10–12.
9. Обобщенная методика диагностирования механического и электрического оборудования металлургических агрегатов/ Лукьянов С.И., Суспицын Е.С., Швидченко Д.В., Пишнограев Р.С., Коновалов М.В. // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2009. №1. С. 38–42.
10. Лукьянов С.И., Васильев А.Е., Лукьянов Д.С. Автоматизированный электропривод тянуще-правильного устройства МНЛЗ: монография. Магнитогорск: МГТУ, 2004. 176 с.
11. R.S. Takhautdinov, S.I. Luk'yanov, K.N. Vdovin, Yu.A. Bodayev, A.D. Nosov, V.G. Suspitsin, I.A. Selivanov, E.I. Sidel'nikova (2002) Effect of the Current Distribution between the Electric Motors of the Pinch Rollers in the Secondary Cooling Zone of a Continuous Caster on the Quality of the Cast Semifinished Product. Metallurgist 46(2): 24-27. doi: 10.1023/A:1015659432005.
12. Автоматизированная система контроля и управления МНЛЗ / Девятков Д.Х., Лукьянов С.И., Логунова О.С., Суспицын Е.С., Тутарова В.Д., Швидченко Д.В. Магнитогорск, 2009. 640 с.
13. Лукьянов Д.С. Распределение электроприводов тянущих роликов на машине непрерывного литья заготовок: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Магнитогорск: МГТУ, 2005. 20 с.
14. Исследование буксов тянущих роликов зоны вторичного охлаждения машины непрерывного литья заготовок ККЦ ОАО «ММК» / Лукьянов С.И., Фомин Н.В., Белый А.В.; ГОУ ВПО «Магнитогорск. гос. техн. ун-т им. Г.И. Носова. Магнитогорск, 2000. Деп. в ВИНТИ 24.07.2000, №2064 – В00.
15. Селиванов И.А., Лукьянов С.И., Фомин Н.В. Анализ причин колебания электропривода зоны вторичного охлаждения МНЛЗ ККЦ ММК // Электротехнические системы и комплексы. 2000. №5. С. 5–9.
16. Математическая модель расчета распределения моментов по приводным роликам зоны вторичного охлаждения для условий МНЛЗ ККЦ ОАО «ММК» / Селиванов И.А., Лукьянов С.И., Погорелов И.Л., Лукьянов В.П. // Электротехнические системы и комплексы. 1998. №3. С. 127–133.
17. Разработка и внедрение интеллектуальных систем диагностирования технического состояния электрического оборудования / Лукьянов С.И., Карандаев А.С., Евдокимов С.А., Сарваров А.С., Петушков М.Ю., Храмин В.Р. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2014. №1 (45). С. 129–136.

Поступила в редакцию 24 апреля 2017 г.

INFORMATION IN ENGLISH

DISTRIBUTION METHOD OF WITHDRAWAL ROLL ELECTRIC DRIVES AT CONTINUOUS CASTING MACHINE

Sergej I. Lukyanov

D.Sc. (Eng.), Professor, Director of the Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Dmitry S. Lukyanov

Ph.D. (Eng.), Customer Services Managing Director, Compass Plus, Magnitogorsk, Russia.

Oksana S. Logunova

D.Sc. (Eng.), head of Computer Engineering and Software Engineering department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Gennadiy V. Nikiforov

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

Sergey S. Krasilnikov

Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Department of electronics and microelectronics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

The paper presents the results of the research aimed at solving the problem of rational distribution of electric drives of withdrawal rolls along the technological line of the continuous casting machine and selecting the minimum number of withdrawal rolls in different

sections of the secondary cooling zone. The research includes the construction and ranking criteria for the distribution of drive rollers along the technological line of the continuous casting machine; the development of methods and algorithms for calculating the required

distribution of load moments by withdrawal rolls and distribution of electric drives of withdrawal rolls along the secondary cooling zone in three modes of operation of the electric drive of the withdrawal and straightening unit: retention of the seed in the preparatory casting mode of the continuous casting machine; pulling the seed with the head of the ingot at the initial stage of metal pouring; stretching of the ingot in the working mode of casting. Theoretical studies were carried out using analytical and numerical methods to solve algebraic equations, methods of structural modeling. It is proved that due to the significant reduction in the number of withdrawal rolls, the payback period of replacement at new machines for continuous casting of the group scheme of power supply for electric motors to individual ones decreases from 5.8-7.8 years with the traditional distribution of withdrawal rolls along the secondary cooling zone to 2.8-3 years with their rational distribution calculated by the developed methods. The results of the work were used in the design of a slab machine for continuous casting of curvilinear blanks intended for casting of wide billets up to 2.5 m. According to the proposed method, the number of electric drives of withdrawal rolls is reduced to 56.

Keywords: Continuous casting machine, electric drive, pull roller, rational distribution, distribution criteria.

REFERENCES

1. Nickovskiy V.M., Karlinskij S.E., Berenov A.D. *Mashiny nepreryvnogo litya zagotovok* [Continuous casting machines]. Moscow: Metallurgy, 1991. 272 p. (In Russian)
2. Safonov, D.S., Logunova, O.S., Chistiakov, D.V. (2016) Optimization of nozzle layout in continuous casting machine. Bulletin of the South Ural State University, Series: Mathematical Modelling, Programming and Computer Software 1(9): 114–122.
3. Luk'yanov, S.I., Suspitsyn, E.S., Krasilnikov, S.S., Kononov, M.V. (2014) Diagnosing technological defects in continuous slab casters. Metallurgist 58:310-315. doi:10.1007/s11015-014-9907-1
4. Luk'yanov S.I., Suspitsyn E.S., Krasilnikov S.S., Shvidchenko D.V. (2015) Intelligent system for prediction of liquid metal breakouts under a mould of slab continuous casting machines. Int J Adv Manuf Technol 79(9):1861–1868. doi:10.1007/s00170-015-6945-1.
5. Logunova, O.S., Devyatov, D.Kh., Nurov, Kh.Kh. (2005) Computerized quality estimates of continuous-cast billet. Steel in Translation 35(9): 36–42.
6. Luk'yanov S. S., Belyi A.V., Logunova O. S., Shvidchenko D.V., Pishnograev R. S., Suspitsyn Ye. S. (2017) Strand withdrawal rate stabilization: via the electric drive of the secondary cooling zone of a continuous casting machine. Manuf Technol 89 (5): 1975-1987. doi:10.1007/s00170-016-9224-x.
7. Margolin S.H.M. *Elektroprivod mashin nepreryvnogo litya zagotovok* [Electric Drive of a Continuous Casting Machine]. Moscow: Metallurgy, 1987. 279 p. (In Russian)
8. Luk'yanov S.I., Selivanov I.A., Fomin N.V., Vasilyev A.E. *Elektroprivod tyanushchih rol'kov MNLZ* [Electric Drive of CCM Withdrawal Rolls]. Electric Drive and Control. 2001? no. 1, pp. 10–12. (In Russian)
9. Luk'yanov S.I., Suspitsyn E.S., Shvidchenko D.V., Pishnograev R.S., Kononov M.V. *Izvestiya vysshih uchebnykh zavedenij. Elektromekhanika* [Proceedings of Universities. Electromechanics], 2009, no. 1, pp. 38–42. (In Russian)
10. Luk'yanov S.I., Vasilyev A.E., Luk'yanov D.S. *Avtomatizirovannyj ehlektroprivod tyanushche-pravilnogo ustroystva MNLZ: monografiya* [Automated Electric Drive of the Withdrawal and Straightening Unit of a CCM: monograph]. Magnitogorsk: MGTU, 2004. 176 p. (In Russian)
11. Takhautdinov R.S., Luk'yanov S.I., Vdovin K.N., Bodyaev Yu.A., Nosov A.D., Suspitsyn V.G., Selivanov I.A., Sidelnikova E.I. (2002) Effect of the Current Distribution between the Electric Motors of the Pinch Rollers in the Secondary Cooling Zone of a Continuous Caster on the Quality of the Cast Semifinished Product. Metallurgist 46(2): 24-27. doi: 10.1023/A:1015659432005.
12. Devyatov D.H., Luk'yanov S.I., Logunova O.S., Suspitsyn E.S., Tutarova V.D., Shvidchenko D.V. *Avtomatizirovannaya sistema kontrolya i upravleniya MNLZ* [Automated System of CCM Control]. Magnitogorsk, 2009. 640 p. (In Russian)
13. Luk'yanov D.S. *Raspredelenie ehlektroprivodov tyanushchih rol'kov na mashine nepreryvnogo litya zagotovok. Avtoreferat kand. tekhn. nauk* [Distribution of Electric Drives of CCM Withdrawal Rolls. Abstract of Ph.D. thesis]. Magnitogorsk: MGTU, 2005. 20 p. (In Russian)
14. Luk'yanov S.I., Fomin N.V., Belyi A.V. *Issledovanie buksovok tyanushchih rol'kov zony vtorichnogo ohlazhdeniya mashiny nepreryvnogo litya zagotovok KKC OAO «MMK»* [Slipping of Withdrawal Rolls of the Secondary Cooling Section of a Continuous Casting Machine of the Oxygen Converter Shop of the OJSC “MMK”]. Magnitogorsk, 2000; Dep. v VINITI 24.07.2000, №2064 – V00.
15. Selivanov I.A., Luk'yanov S.I., Fomin N.V. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical systems and complexes]. 2000, no. 5, pp. 5–9. (In Russian)
16. Selivanov I.A., Luk'yanov S.I., Pogorelov I.L., Luk'yanov V.P. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical systems and complexes]. 1998. no. 3. pp. 127–133.
17. Luk'yanov S.I., Karandaev A.S., Evdokimov S.A., Sarvarov A.S., Petushkov M.YU., Khrumshin V.R. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2014, no. 1 (45), pp. 129–136.

Методика распределения электроприводов тянущих роликов на машине непрерывного литья заготовок / С.И. Лукьянов, Д.С. Лукьянов, О.С. Логунова, Г.В. Никифоров, С.С. Красильников // Электротехнические системы и комплексы. 2017. № 2 (35). С. 4–12. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-2\(35\)-4-12](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-2(35)-4-12)

Luk'yanov S.I., Luk'yanov D.S., Logunova O.S., Nikiforov G.V., Krasilnikov S.S. Distribution Method of Withdrawal Roll Electric Drives at Continuous Casting Machine. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2017, no. 2 (35), pp. 4–12. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-2\(35\)-4-12](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-2(35)-4-12)

Шохин В.В., Андреев А.И., Морковина П.С.

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

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОКАТНОГО СТАНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФИЗИЧЕСКИХ И МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Исследование работы прокатных станов в различных режимах проводят обычно с использованием математических моделей электроприводов и прокатываемой полосы. В этом случае сложно, а иногда невозможно, учесть некоторые факторы, оказывающие влияние на процессы обработки металла. В работе предлагается для исследования процессов намотки полосы на барабан моталки создать физические модели электроприводов клетки и моталки и математическую модель наматываемой полосы. Использование такой виртуальной модели позволяет в режиме реального времени производить исследование работы прокатного стана, изучать физические процессы, происходящие на стане в различных режимах, производить оценку влияния параметров регуляторов в системах регулирования скорости, момента, натяжения на процессы в стане. Использование такой модели в учебном процессе будет способствовать более глубокому пониманию реальных свойств прокатного стана.

Ключевые слова: электрический привод, прокатный стан, моталка, моделирование, регулирование натяжения, лабораторная установка.

ВВЕДЕНИЕ

Целью работы является создание с помощью физического и математического моделирования лабораторной установки для изучения основных режимов работы одноклетьевого прокатного стана. Для электрических приводов создаются физические модели на основе лабораторных автоматизированных электроприводов переменного тока с преобразователями частоты с электромагнитными агрегатами, моделирующими нагрузки на двигатели [1]. Полоса моделируется математически с помощью программируемых контроллеров. На первом этапе создается модель электропривода клетки, моталки и полосы между клетью и моталкой.

Использование виртуальной модели прокатного стана позволяет в режиме реального времени производить исследование работы прокатного стана, изучать физические процессы, происходящие на стане в различных режимах, производить оценку влияния параметров регуляторов в системах регулирования скорости, момента, натяжения на процессы в стане [2–7].

МЕТОДИКИ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для клетки используется электропривод переменного тока с асинхронным двигателем с векторной системой регулирования скорости. Для создания нагрузки применена вторая электрическая машина, механически связанная с двигателем, который моделирует электропривод клетки. Для второй электрической машины создается система регулирования момента, с помощью которой задаются момент прокатки и составляющие момента от переднего и заднего натяжений.

Для моталки используется физическая модель с приводом переменного тока с короткозамкнутым асинхронным двигателем. Для создания нагрузки (натяжения) применен нагрузочный агрегат, состоящий из двух асинхронных двигателей, каждый из которых питается от своего преобразователя частоты. Для обоих двигателей используется система регулирования мо-

мента. На **рис. 1** представлена схема проектируемой лабораторной установки, в которой показаны модели клетки, моталки и полосы.

Система регулирования скорости двигателя клетки построена по принципу подчиненного регулирования координат, при этом используется векторное управление с ориентацией вращающейся системы координат по вектору потокосцепления ротора [8, 9]. Имеются два контура в канале регулирования скорости и два контура в канале регулирования потокосцепления. Настройка контуров выполнена по модульному оптимуму.

Система регулирования моталки отличается от системы регулирования скорости клетки тем, что в ней отсутствует контур регулирования скорости. На регулятор составляющей тока статора, пропорционального моменту двигателя, подается сигнал задания, определяющий натяжение в полосе между клетью и моталкой. Технические данные применяемых электрических машин указаны в **таблице**. Номинальный момент двигателя (расчетное значение) 15,1 Нм. Для клетки и моталки применены одинаковые двигатели.

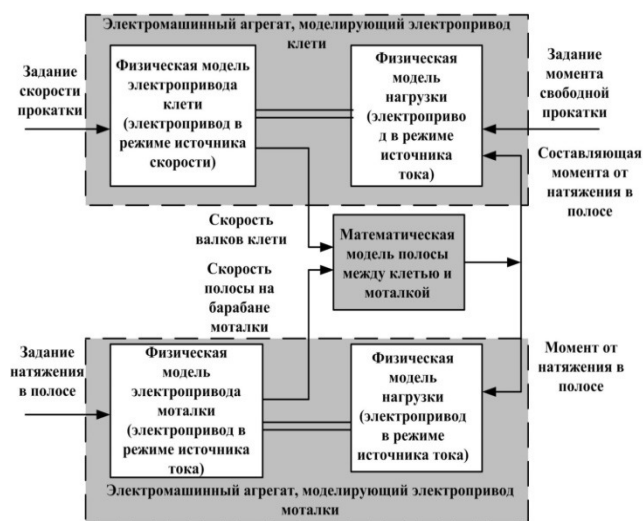


Рис. 1. Схема лабораторной установки

При моделировании процесса прокатки предполагается одноклетьевой виртуальный прокатный стан для обработки сталей с пределом текучести 300–600 Н/мм².

Толщина металла на выходе из клетки от 1 до 0,1 мм, при этом обжатие до 5%. Коэффициент трения в очаге деформации при прокатке – 0,03. Длина прокатанного металла до 1000 м. Момент прокатки на валу двигателя от 2 до 15 Нм. Скорость прокатки до 15 м/с. Радиус прокатных валков 0,1 м. Ширина прокатываемой полосы 0,02 м. Модуль упругости прокатываемой полосы 2×10^{11} Н/м². Удельная масса прокатываемого металла 7800 кг/м³. Величина опережения при свободной прокатке $\text{Соп}=0,05$. Коэффициент, связывающий опережение в очаге деформации и величину переднего натяжения, $\text{Соп}/F=0,000025$ 1/Н. Расстояние между клетью и моталкой 2 м. Радиус барабана моталки 0,15 м. Момент инерции механизма моталки, приведенный к валу двигателя $0,5 \times J_{\text{дв}}$. Передаточное число редуктора моталки 1.

Натяжение T между клетью и моталкой рассчитываем по известной формуле [10, 11]

Технические данные применяемых электрических машин

Характеристика	Обозначение	Единица измерения	Величина
Тип	4А90Л4У3		
Мощность	$P_{2н}$	кВт	2,2
Напряжение			
Синхронная частота вращения	n_0	об/мин	1500
Ток статора	$I_{1н}$	А	5,02
КПД		%	80
$\cos \varphi$			0,83
Параметры схемы замещения	X_m	Ом	92,03
	R_1	Ом	4,1409
	R_2	Ом	2,4445
	X_1	Ом	3,2959
	X_2	Ом	5,2964
Механические характеристики	M_n		2,1
	M_k		2,4
	$S_{ном}$		5,1
	S_k		33
	$I_{п}$		6
Момент инерции	J_d	кгм ²	0,0056

$$T = \frac{EBh}{l} \int_0^l (v_0 - v) dt + T_0,$$

где T_0 – начальное (заданное) натяжение полосы; E – модуль упругости металла; l – расстояние между последней клетью и барабаном моталки; v_0, v – соответственно линейные скорости намотки и полосы, выходящей из последней клетки.

Для расчета радиуса рулона на моталке используем зависимость

$$R_p = R_6 \sqrt{\frac{h \int_0^t v dt}{\pi R_6^2} + 1},$$

где R_p – радиус рулона; R_6 – радиус барабана моталки; h – толщина полосы; v – линейная скорость движения полосы.

Момент инерции рулона на моталке вычисляем по формуле

$$J_p = \frac{\pi B_{cp} \gamma}{2 i^2} (R_p^4 - R_6^4),$$

где B_{cp} – средняя ширина полосы; γ – удельный вес металла; i – передаточное число редуктора моталки.

С целью определения реальной возможности реализовать моделирование работы прокатного стана с частичным использованием физических лабораторных электроприводов и математической модели процесса прокатки на одноклетьевом прокатном стане с одной клетью и моталкой проведено моделирование работы всего комплекса оборудования. Для этого использована программная среда MATLAB и приложение SIMULINK [12]. Основные положения при моделировании описаны в работах [13–15]. На рис. 2 представлена структура модели, которая учитывает работу клетки и моталки без системы регулирования натяжения полосы. На этом же рисунке указаны связи между блоками и физические величины, необходимые для расчета параметров модели.

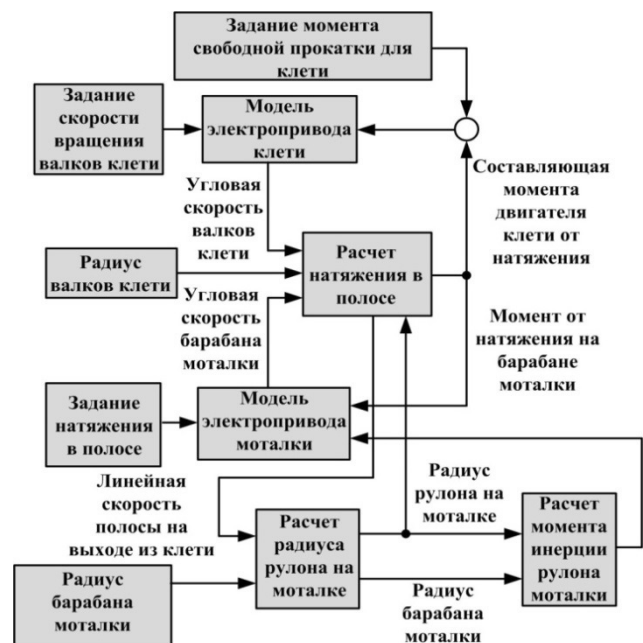


Рис. 2. Узлы модели прокатного стана без системы регулирования натяжения полосы (клеть-моталка)

Осциллограммы, иллюстрирующие работу клетки и моталки при отсутствии системы регулирования натяжения полосы, представлены на **рис. 3**. В этом случае для моталки задается неизменным сигнал задания момента двигателя. Последовательно рассмотрены процессы задания натяжения для моталки при отсутствии задания на скорость прокатки, разгон клетки до рабочей скорости, процесс намотки полосы на барабан моталки и снижение скорости полосы.

Как и на реальном стане, в процессе разгона натяжение в полосе уменьшается из-за влияния динамического момента, необходимого для обеспечения разгона барабана моталки, причем изменение натяжения связано с изменением момента инерции рулона в процессе разгона. При намотке полосы на барабан моталки скорость вращения барабана уменьшается, так как увеличивается радиус рулона при неизменной скорости полосы. Момент двигателя моталки в процессе намотки полосы задан неизменным. Это приводит к уменьшению натяжения полосы с ростом радиуса рулона.

Для изучения работы стана с системой регулирования натяжения необходимо построить узлы вычисления текущего радиуса рулона и момента инерции рулона. В реальном прокатном стане это может быть выполнено следующим образом.

Для вычисления сигнала, пропорционального текущему радиусу рулона, используется равенство

$$R = v / \omega,$$

где ω – угловая скорость вращения барабана моталки.

Операция деления осуществляется в узле вычисления текущего радиуса рулона включением множительного устройства в цепь обратной связи интегрирующего устройства (**рис. 4**).

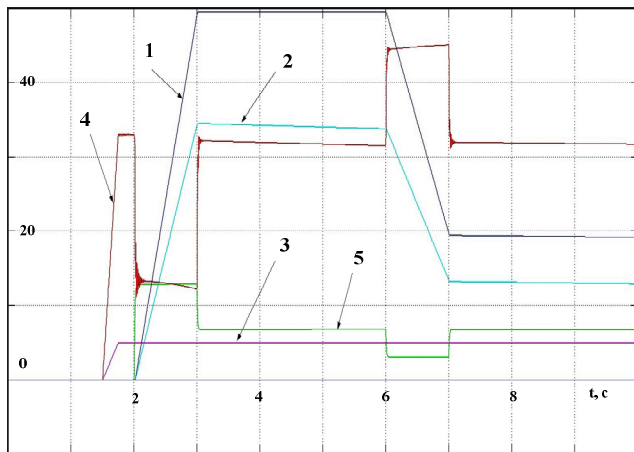


Рис. 3. Осциллограммы работы стана без системы регулирования натяжения полосы: 1 – скорость двигателя клетки, 1/с; 2 – скорость двигателя моталки, 1/с; 3 – момент двигателя моталки, Нм; 4 – натяжение в полосе, Н; 5 – момент двигателя клетки, Нм

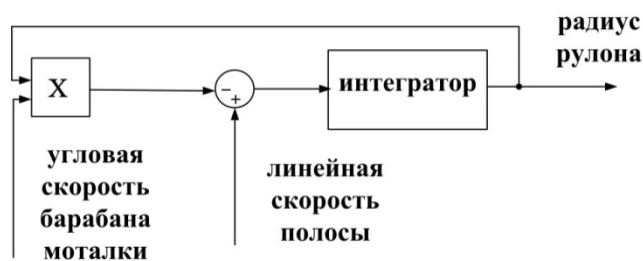


Рис. 4. Вычисление текущего радиуса рулона

Интегратор и множительное устройство, включенное по цепи обратной связи по радиусу рулона, образуют интегрозапоминающее устройство (ИЗУ). В данном узле осуществляется операция деления в неявной форме сигнала, пропорционального линейной скорости прокатки v , на сигнал, пропорциональный угловой скорости барабана моталки.

Процесс деления заканчивается тогда, когда на выходе ИЗУ сигнал, пропорциональный радиусу рулона R , достигнет значения, при котором сигнал на выходе, пропорциональный $(v - \omega R)$, станет равным нулю. Сигнал $(v - \omega R)$ получается на выходе сумматора, на входе которого суммируется сигнал, пропорциональный v и сигнал с выхода множительного устройства, пропорциональный произведению ωR . Таким образом, сигнал на выходе ИЗУ пропорционален радиусу рулона R , а сигнал на входе – его производной dR/dt .

Сигнал, пропорциональный текущему радиусу, рулона вычисляется по представленной выше формуле, но для расчета используется вычисленный текущий радиус рулона.

Схема включения узлов при использовании системы регулирования натяжения в динамических режимах работы стана представлена на **рис. 5**.

На следующем рисунке (**рис. 6**) представлены осциллограммы работы стана с регулятором, компенсирующим динамический момент моталки при изменении скорости стана.

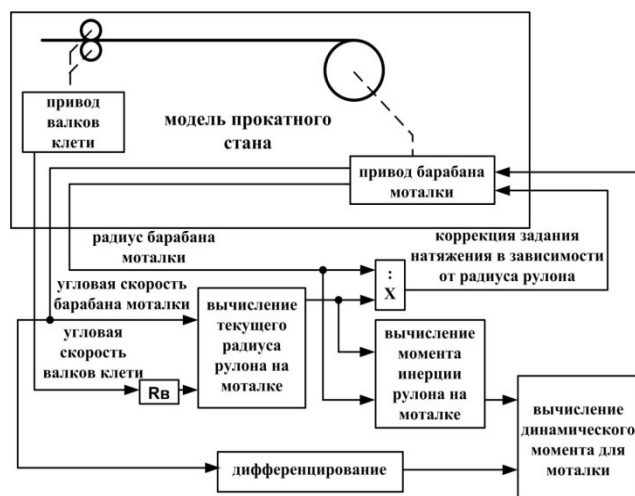


Рис. 5. Узлы схемы при использовании системы регулирования натяжения в динамических режимах работы стана

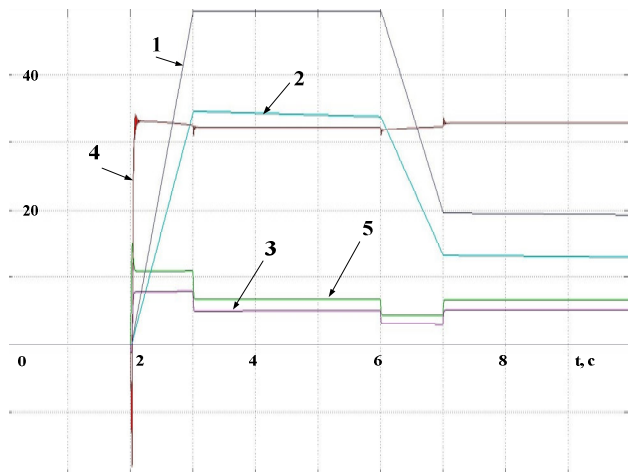


Рис. 6. Осциллограммы работы стана с компенсацией динамического момента моталки: 1 – скорость двигателя клети, 1/с; 2 – скорость двигателя моталки, 1/с; 3 – момент двигателя моталки, Нм; 4 – натяжение в полосе, Н; 5 – момент двигателя клети, Нм

Применение регулятора, который компенсирует динамический момент двигателя моталки в режимах разгона и торможения стана, существенно влияет на точность регулирования натяжения.

На рис. 7 показаны полученные на модели графики изменения момента двигателя моталки, угловой скорости вращения барабана моталки, момента инерции рулона, натяжения полосы в зависимости от радиуса рулона наматываемой полосы при постоянной линейной скорости прокатки. Из графиков следует, что натяжение сохраняется постоянным, при этом электромагнитная мощность двигателя моталки $P_{эл}$ также постоянна. Поведение указанных на рисунке параметров соответствует следующим зависимостям:

$$M = TR_p;$$

$$\nu = \omega R_p;$$

$$P_{эл} = M\omega = TR_p \nu / R_p = T\nu = \text{const},$$

где M – момент двигателя моталки.

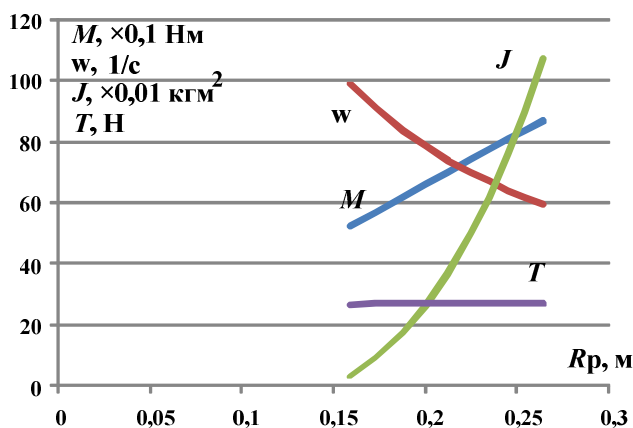


Рис. 7. Графики изменения параметров моталки в зависимости от радиуса рулона при постоянной линейной скорости прокатки

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные осциллограммы и графики свидетельствуют о правильности выбранных принципов построения модели виртуального прокатного стана, об адекватности процессов в модели и в реальном процессе прокатки на стане, об удовлетворительной настройке систем регулирования скорости клети и момента моталки. Полученные в процессе моделирования коэффициенты и постоянные времени элементов модели могут быть использованы для настройки параметров лабораторной установки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Учебные лабораторные стенды кафедры автоматизированного электропривода и мехатроники МГТУ им. Г.И. Носова / Радионов А.А., Омельченко Е.Я., Линьков С.А., Шохин В.В. // Труды международной пятнадцатой научно-технической конференции «Электроприводы переменного тока», 12–16 марта 2012 г. Екатеринбург: ФГА-ОУ ВПО «УрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина», 2012, С. 309–310.
2. Математическое моделирование взаимосвязанных электро-механических систем межклетового промежутка широкополосного стана горячей прокатки / А.С. Карандаев, В.Р. Храмшин, И.Ю. Андришин, В.В. Головин, П.В. Шильяев // Известия вузов. Электромеханика. 2009. № 1. С. 12–20.
3. 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.
4. Математическая модель взаимосвязанных электро-технических систем непрерывной группы широкополосного стана / В.Р. Храмшин, И.Ю. Андришин, А.Н. Гостев, А.С. Карандаев // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2013. №1. С. 12–21.
5. Khrumshin V.R., Radionov A.A., Kornilov G.P., Odintsov K.E. Improvement of electric and mechanical system for automated strip tension control at continuous wide-strip hot-rolling mill. Procedia Engineering. 2016, vol. 150, pp. 11–17.
6. Khrumshin V.R. Ways to compensate for static deviations in speed in electric drives of broad-strip hot rolling-mill stands. Russian Electrical Engineering. 2013, vol. 84, no. 4, pp. 221–227.
7. Shilyaev P.V., Andryushin I.Yu., Golovin V.V., Radionov A.A., Karandaev A.S., Khrumshin V.R. Algorithms of a digital automatic system for tension and loop control in a wide-strip hot-rolling mill. Russian Electrical Engineering. 2013, vol. 84, no. 10, pp. 533–541.
8. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием: учебник для вузов / 2-е изд., испр. М.: Издательский центр «Академия», 2007. 272 с.
9. Терехов В.М., Осипов О.И. Системы управления электроприводов: учебник для вузов / под ред. В.М. Терехова. М.: Издательский центр «Академия», 2006. 304 с.
10. Морозов Д.П. К теории электро-механических процессов станов холодной прокатки // Вестник электропромышленности. 1944. №3. С. 16–19.
11. Дружинин Н.Н. Непрерывные станы как объект автоматизации. М.: Металлургия, 1975, 336 с.
12. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystem и Simulink. И.В. Черных. М.: ДМК Пресс, 2008. 288 с.
13. Шохин В.В., Пермякова О.В. Исследование силового взаимодействия электроприводов непрерывного прокатного стана // Труды VIII Международной (XIX Всероссийской) конференции по автоматизированному электро-

приводе АЭП-2014: в 2 т. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2014. Т. 2. С. 342–347

14. Shokhin V.V., Permyakova O.V. The study of continuous rolling mill inter-stand tension inferential control systems Nosov Magnitogorsk State Technical University Magnitogorsk, Russia. Peer-review under responsibility of the organizing committee of the International Conference on Industrial Engineering (ICIE-2015).

Procedia Engineering 129 (2015) 231–238.

15. Шохин В.В., Пермякова О.В., Короткова Е.В. Моделирование взаимосвязанного частотно-регулируемого электропривода прокатного стана // Электротехнические системы и комплексы: междунар. сб. науч. трудов. Вып. 21. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2013. С. 70–75.

Поступила в редакцию 09 марта 2017 г.

INFORMATION IN ENGLISH

SIMULATION OF A ROLLING MILL USING PHYSICAL AND MATHEMATICAL MODELS

Valery V. Shokhin

Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Department of automatic electric drive and mechatronics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, e-mail: shww@mgn.ru.

Andrey I. Andreev

Graduate student, Department of automated electric drive and mechatronics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Polina S. Morkovina

Graduate student, Department of automated electric drive and mechatronics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Research of rolling mill operation in different modes is usually executed using mathematical model of electric drives and a rolling strip. In this case, it is hard or sometimes impossible to take into account some factors, which influence metal processing processes. The authors of this paper offer to develop physical models of electric drives of a rolling mill and a coiler and a mathematical model of the rolling strip to study the processes of strip coiling on the coiling drum. Application of this virtual model of a rolling mill allows online execution of rolling mill operation study, investigation of physical processes, which take place in the mill during different modes, impact evaluation of regulation parameters in speed, moment, tension regulation systems on the mill processes. Making use of this model in the educational process will contribute to deeper understanding of real properties of a rolling mill.

Keywords: Electric drives, rolling mill, coiler, modelling, tension regulation systems, laboratory installation.

REFERENCES

1. Radionov A.A., Omelchenko E.Y., Linkov S.A., Shokhin V.V. *Uchebnye laboratornye stendy kafedry avtomatizirovannogo elektroprivoda i mekhatroniki MGTU im. G.I. Nosova* [Learning laboratory benches of the Department of Automated electric drive and mechatronics, Nosov Magnitogorsk state technical university] // Proceedings of the fifteenth international scientific and technical conference "AC Drives", 12–16 March 2012. Ekaterinburg: FGAOU VPO "Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin", 2012, pp. 309–310. (In Russian)
2. Karandaev A.S., Khrashin V.R., Andryushin I.Yu., Shilyaev, Golovin V.V. 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. (In Russian)
3. Karandaev A.S., Khrashin V.R., Galkin V.V., Lukin A.A. [Mathematical modeling of thyristor electric drive with a flipper. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika* [Proceedings of universities. Electrical engineering]. 2010, no. 3, pp. 47–53. (In Russian)
4. Khrashin V.R., Andryushin I.Yu., Gostev A.N.,

- Karandaev A.S. 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. (In Russian)
5. Khrashin V.R., Radionov A.A., Kornilov G.P., Odintsov K.E. Improvement of electric and mechanical system for automated strip tension control at continuous wide-strip hot-rolling mill. *Procedia Engineering*, 2016, vol. 150, pp. 11–17.
6. Khrashin V.R. Ways to compensate for static deviations in speed in electric drives of broad-strip hot rolling-mill stands. *Russian Electrical Engineering*, 2013, vol. 84, no. 4, pp. 221–227.
7. Shilyaev P.V., Andryushin I.Yu., Golovin V.V., Radionov A.A., Karandaev A.S., Khrashin V.R. Algorithms of a digital automatic system for tension and loop control in a wide-strip hot-rolling mill. *Russian Electrical Engineering*, 2013, vol. 84, no. 10, pp. 533–541.
8. Sokolovski G.G. *Elektroprivody peremennogo toka s chastotnym regulirovaniem* [AC Frequency Control Electric Drives: textbook for higher schools], Academia publishing center, Moscow, 2007, 272 p. (In Russian)
9. Terekhov V.M., Osipov O.I. *Sistemy upravleniya elektroprivodov* [Control System of Electric Drives: textbook for higher schools], Academia publishing center, Moscow, 2006, 304 p.
10. Morozov D.P. About the Theory of Electric and Mechanical Process of Cold-Rolling Mills. *Bulletin of Electrotechnical Industry*, 1944, no. 3, pp.16–19. (In Russian)
11. Druzhinin N.N. *Nepreryvnye stany kak obyekt avtomatizatsii* [Continuous mills as an Automation Object]. Moscow: Metallurgy, 1975, 336 p. (In Russian)
12. Chernykh I.V. *Modelirovaniye elektrotekhnicheskikh ustroystv v MATLAB, SimPowerSystem i Simulink* [Modeling electric devices in MATLAB, SimPowerSystem and Simulink]. DMK Press, Moscow, 2008, 288 p. (In Russian)
13. Shokhin V.V., Permyakova O.V. *Issledovanie silovogo vzaimodeystviya elektroprivodov nepreryvnogo prokatnogo stana* [Investigation of the force interaction of electric drives of the continuous rolling mill]. Proceedings of the VIIIth International (XIX th nationwide) conference on automated electric drive of AEP-2014: 2 v. Saransk: Publishing house Mordov. University

- press, 2014, vol. 2, pp. 342–347. (In Russian)
14. Shokhin V.V., Permyakova O.V. The study of continuous rolling mill inter-stand tension inferential control systems Nosov Magnitogorsk State Technical University Magnitogorsk, Russia. Peer-review under responsibility of the organizing committee of the International Conference on Industrial Engineering (ICIE-2015). *Procedia Engineering* 129 (2015) pp. 231–238.
15. Shokhin V.V., Permyakova O.V., Korotkova E.V. *Modelirovanie vzaimosvyazannogo chastotno-reguliruemogo elektroprivoda prokatnogo stana* [Modeling of interconnected variable-frequency electric drives of the rolling mill]. *Electrical systems and complexes: the international meeting of scientific papers*, Vol. 21. Magnitogorsk: Publishing center of Nosov State Technical University, 2013, pp. 70–75.
-

Шохин В.В., Андреев А.И., Морковина П.С. Моделирование прокатного стана с использованием физических и математических моделей // *Электротехнические системы и комплексы*. 2017. № 2 (35). С. 13–18. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-2\(35\)-13-18](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-2(35)-13-18)

Shokhin V.V., Andreev A.I., Morkovina P.S. Simulation of a Rolling Mill Using Physical and Mathematical Models. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2017, no. 2 (35), pp. 13–18. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-2\(35\)-13-18](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-2(35)-13-18)

Крубцов Д.С.

ООО «Объединенная сервисная компания»

ПОВЫШЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ АКТИВНЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ПРОКАТНЫХ СТАНОВ К НЕСИММЕТРИИ ПИТАЮЩЕГО НАПРЯЖЕНИЯ

Проанализирована известная система управления активного выпрямителя с предупредлением по напряжению обратной последовательности, повышающая устойчивость его работы при несимметрии питающего напряжения. Особенностью данной системы является наличие блока задержки, который совместно с фильтром высших гармоник вносит ошибку между истинным значением напряжения и выделенным сигналом обратной последовательности. Предложена система управления активного выпрямителя с предупредлением по сетевому напряжению, в которой отсутствует дополнительный блок задержки. Проанализированы три способа фильтрации сетевого напряжения, среди которых выбран оптимальный. Произведена оценка работы активного выпрямителя с усовершенствованной системой управления при различных провалах напряжения. Предложенная система управления удовлетворяет поставленным требованиям и повышает устойчивость работы активного выпрямителя при рассматриваемых провалах напряжения.

Ключевые слова: прокатный стан, активный выпрямитель, система управления, провал напряжения, несимметрия напряжения.

ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение электромагнитной совместимости (ЭМС) мощных активных выпрямителей с питающей сетью, как уже отмечалось ранее [1], рассматривается и решается на двух уровнях: во-первых, как воздействие активного выпрямителя на сеть [2–4], которое проявляется главным образом в генерации высших гармоник и искажении напряжения в точке подключения, а во-вторых, по восприимчивости самого выпрямителя к нарушениям со стороны сети.

Использование широтно-импульсной модуляции (ШИМ) в активном выпрямителе исключает потребление реактивной мощности, а благодаря методу удаления выделенных гармоник [5–9] частотный диапазон гармонических составляющих в сетевом токе может быть скорректирован в достаточно широких пределах.

Устойчивая работа активных выпрямителей возможна при изменении коэффициента модуляции в определенном диапазоне. Это обстоятельство накладывает жесткие требования к качеству питающего напряжения и, в первую очередь, как показали исследования, к несимметрии питающего напряжения.

Несимметрия напряжения часто возникает при несимметричных провалах и проявляется в том, что в сетевом напряжении кроме прямой последовательности возникает составляющая обратной последовательности [10]. В результате создаются условия для протекания токов обратной последовательности, величина которых ограничивается исключительно сопротивлением трансформатора или реактора на входе преобразователя. Значительные токи обратной последовательности приводят к отключению активного выпрямителя, нарушению технологического режима и простоям оборудования.

Таким образом, задача повышения устойчивости активного выпрямителя к нарушениям со стороны сети является актуальной и практически значимой. Её решение возможно по двум направлениям: во-первых, уменьшением вероятности появления провалов напряжения как первопричины несимметрии, что достигается применением автономных источников, многократным резервированием, разделением кольцевых схем и пр. [1, 11–15], а во-вторых, адаптацией системы управ-

ления активного выпрямителя к искажениям напряжения питающей сети.

В настоящей статье рассмотрены и проанализированы методы повышения устойчивости активных выпрямителей к несимметрии питающего напряжения аппаратными средствами, т.е. за счет совершенствования систем управления.

В литературе известна система управления активным выпрямителем с предупредлением по напряжению обратной последовательности. Для выделения сигнала обратной последовательности выполняют ряд операций; на первом этапе исходная трехфазная система преобразуется в двухфазную с помощью преобразования Кларка [16–20]:

$$\begin{bmatrix} u_{\alpha} \\ u_{\beta} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -0,5 & -0,5 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_{ab} \\ 0 \\ u_{bc} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где u_{α} , u_{β} – напряжения в неподвижной системе координат $\alpha\beta$; u_{ab} , u_{bc} – линейные напряжения.

Сигналы u_{α} и u_{β} при несимметрии напряжения перестают быть ортогональными, их представляют как сумму напряжений прямой и обратной последовательности. Последние выделяют, вводя задержку на четверть периода по схеме (рис. 1). На данном рисунке блок Т/4 обеспечивает задержку напряжений u_{α} и u_{β} на четверть периода.

$$\begin{bmatrix} u_{\alpha+} \\ u_{\beta+} \\ u_{\alpha-} \\ u_{\beta-} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & -1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_{\alpha}(t) \\ u_{\beta}(t) \\ u_{\alpha}(t - \frac{T}{4}) \\ u_{\beta}(t - \frac{T}{4}) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где $u_{\alpha+}$, $u_{\beta+}$ – составляющие напряжения прямой последовательности; $u_{\alpha-}$, $u_{\beta-}$ – составляющие напряжения обратной последовательности; $u_{\alpha}(t)$, $u_{\beta}(t)$ – измеренное напряжение в системе координат $\alpha\beta$; $u_{\alpha}(t-T/4)$, $u_{\beta}(t-T/4)$ – измеренное напряжение в системе координат $\alpha\beta$ с задержкой на четверть периода.

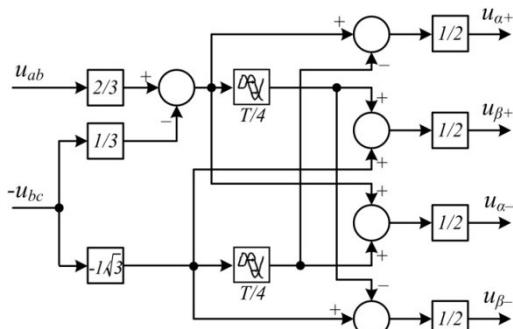


Рис. 1. Структурная схема блока выделения составляющих напряжения прямой и обратной последовательностей

Даже при столь малой задержке возникает рассогласование между истинным значением и выделенным сигналом обратной последовательности. Эта ошибка становится еще более заметной при введении фильтра высших гармоник; присутствие, которого весьма необходимо, так как из-за искажения кривой сетевого напряжения в сигнале задания возникают ложные срабатывания широтно-импульсного модулятора и, как следствие, возможна перегрузка ключей по току.

РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ

В настоящей статье предложены и проанализированы системы с предупреждением по напряжению сети (рис. 2).

Для устойчивой работы ШИМ сетевое напряжение пропускают через фильтр. Был проведен анализ статических и динамических показателей активного выпрямителя с фильтрами различных типов, организация которых не вызывает затруднение, а именно:

- 1) фильтр второго порядка с бесконечной импульсной характеристикой (БИХ-фильтр) в неподвижной системе координат $\alpha\beta$ и частотой среза 500 Гц;
- 2) БИХ-фильтр в подвижной системе координат dq ;
- 3) фильтр скользящего среднего с конечной импульсной характеристикой (КИХ-фильтр) в подвижной системе координат с периодом усреднения 0,001 с.

Для оценки качества перечисленных выше фильтров при переходе от симметричного к несимметричным режимам сравнивались следующие показатели: первоначальный бросок сетевого тока и его небаланс в установившемся несимметричном режиме; размах колебаний напряжений в звене постоянного тока; диапазон изменения коэффициента модуляции в несимметричных режимах. Результаты моделирования показали, что наилучшие показатели и адаптацию к несимметрии питающего напряжения обеспечивает система управления по третьему варианту, схема которого приведена на рис. 3.

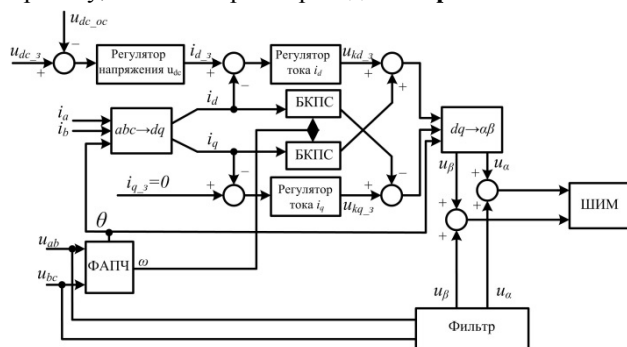


Рис. 2. Структурная схема системы управления активного выпрямителя с предупреждением по сетевому напряжению



Рис. 3. Блок выделения составляющей напряжения обратной последовательности с помощью КИХ-фильтра

В первом блоке сетевое напряжение преобразуют в систему вращающихся координат dq . Выходной сигнал этого блока содержит постоянную составляющую, пропорциональную напряжению обратной последовательности, переменную составляющую двойной частоты от напряжения прямой последовательности, а также напряжение высших гармоник. Для подавления высокочастотного сигнала и напряжения прямой последовательности используют КИХ-фильтр с периодом осреднения 0,001 с. Далее выделенный сигнал преобразуется в неподвижную систему координат $\alpha\beta$ и суммируется с выходами регуляторов тока. Амплитудно-частотные характеристики фильтров второго порядка с частотой среза 500 Гц и фильтра скользящего среднего с периодом усреднения 1/1000 с приведены на рис. 4.

Как видно из графика, в диапазоне частот, генерируемых активным выпрямителем, начиная с 60-й гармоники (3000 Гц) и далее, эффективность по ослаблению высших гармоник становится примерно одинаковой. Для оценки работоспособности и запасов устойчивости активного выпрямителя с предложенной системой управления при наиболее экстремальных провалах напряжения производилось сравнение реальных показателей с предельно допустимыми, взятыми из опыта эксплуатации:

1. Бросок тока при появлении несимметрии напряжения не должен превышать $1,9 I_{ном}$, а его максимальное значение в установившемся режиме при этом не должно быть выше $1,5 I_{ном}$.
2. Величина колебаний напряжения в звене постоянного тока, обусловленная токами обратной последовательности, не должна превышать 5% номинальной величины.

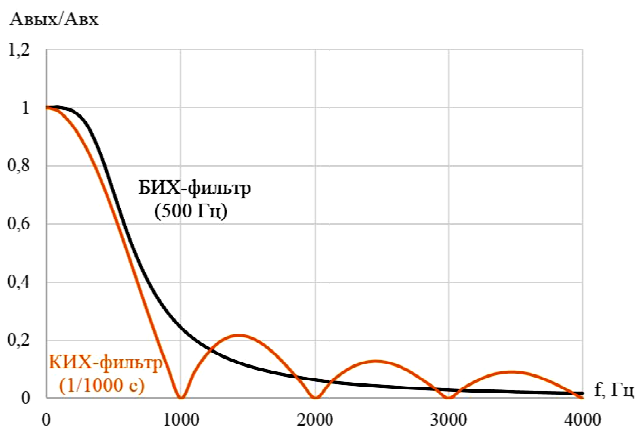


Рис. 4. Амплитуда-частотные характеристики фильтра второго порядка с частотой среза 500 Гц и фильтра скользящего среднего с периодом усреднения 1/1000 с

3. Коэффициент модуляции в несимметричных режимах не должен быть ниже порогового значения для используемого метода ШИМ, равного 0,45.

В последующем задавались сочетания несимметричных провалов напряжения:

- а) провал в фазе А на 10%, в фазе В на 20%;
- б) провал в фазе А на 15%, в фазе В на 30%;
- в) провал в фазе А на 20%, в фазе В на 45%.

Результаты моделирования приведены на рис. 5–7. Осциллограммы, обозначенные буквами а, б, в, соответствуют вышеприведенным сочетаниям провалов напряжения.

Как видно из рис. 5, для всех исследуемых провалов напряжения бросок тока в переходных режимах не превышает $1,56 I_{ном}$, а в установившемся режиме величина потребляемого тока при самом глубоком провале составляет $1,29 I_{ном}$, что находится в допустимых пределах. Для всех исследуемых несимметричных провалов величина колебаний напряжений находится в допустимых пределах и не превышает 2,5% от установившегося значения. Наименьшее значение коэффициента модуляции активного выпрямителя при самой неблагоприятной ситуации составляет 0,48, а это значит, что все три условия, сформулированные ранее, полностью выполняются.

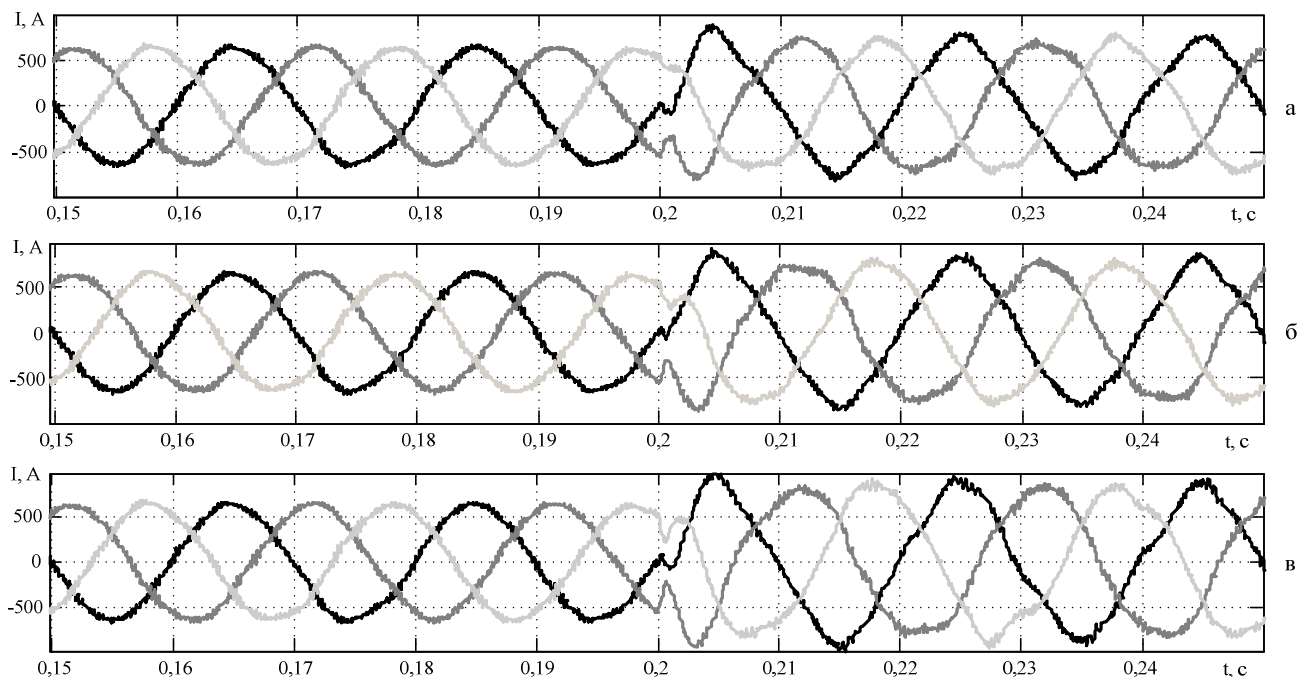


Рис. 5. Кривые мгновенных значений потребляемого тока при различной несимметрии питающей сети

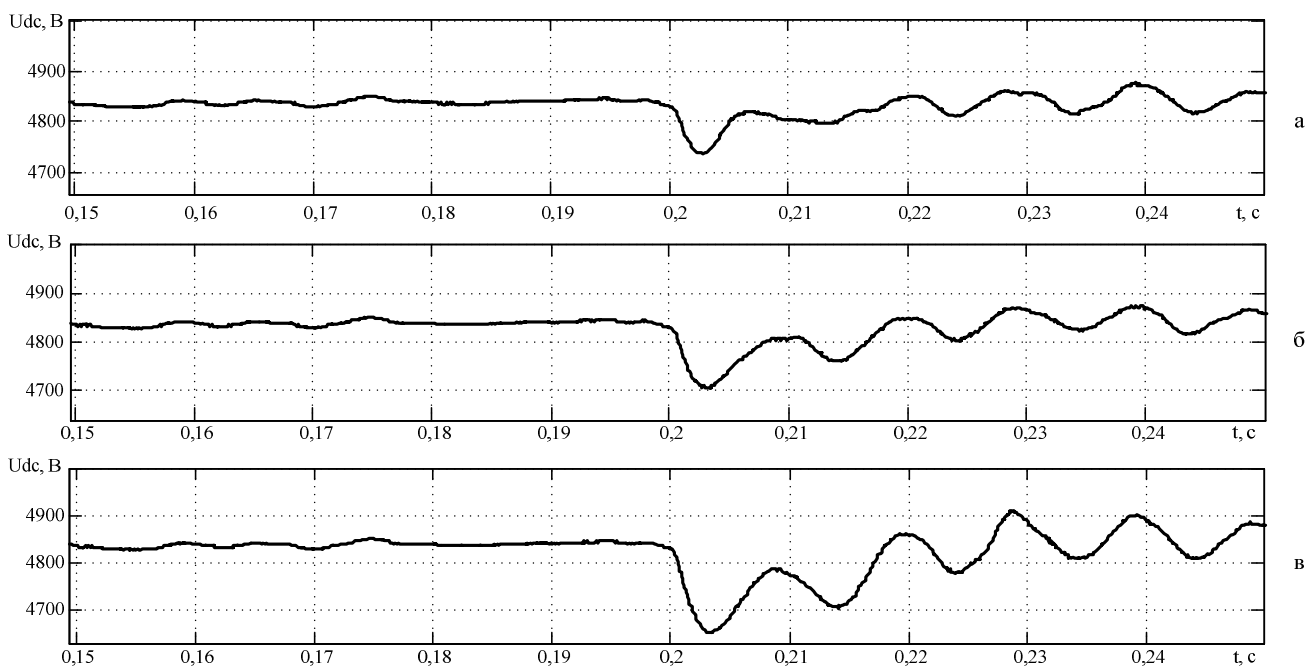


Рис. 6. Кривые мгновенных значений напряжений в звене постоянного тока при различной несимметрии питающей сети

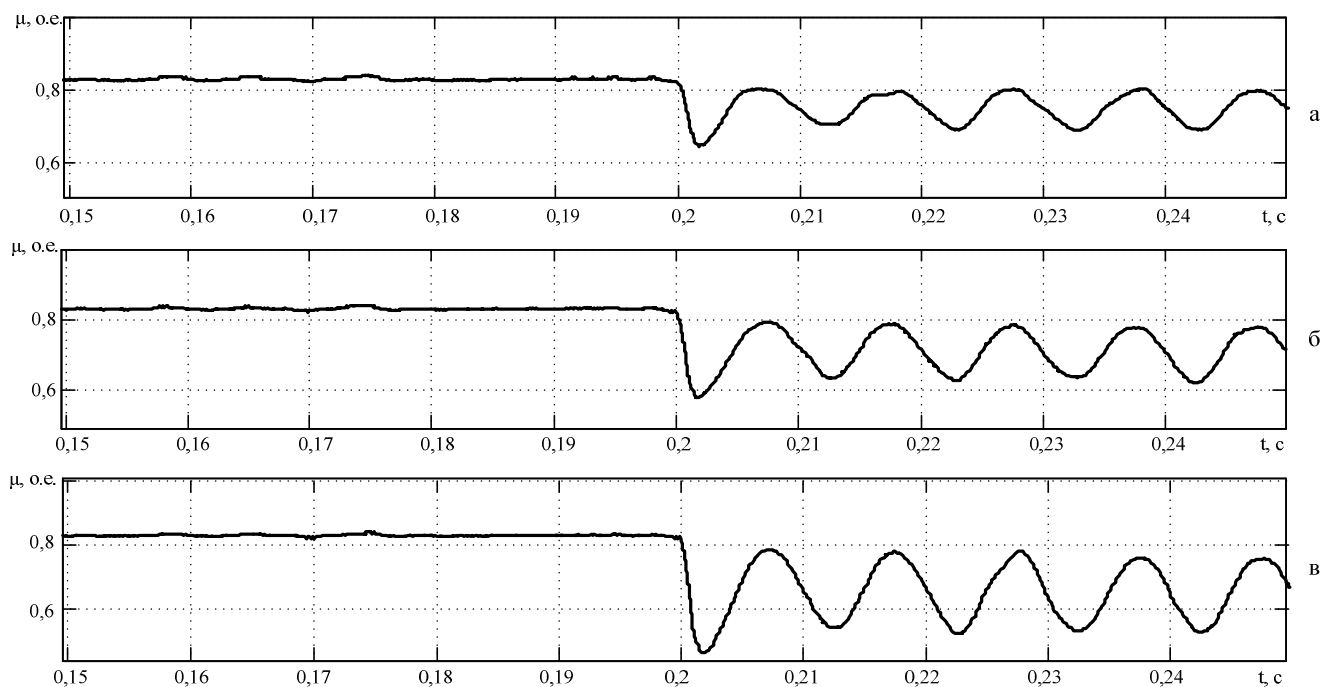


Рис. 7. Кривые мгновенных значений коэффициента модуляции при различной несимметрии питающей сети

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Система с предупреждением по напряжению обратной последовательности не обеспечивает устойчивой работы мощного высоковольтного активного выпрямителя при несимметричных провалах напряжения. Это обусловлено задержкой при выделении составляющей напряжения обратной последовательности и наличием фильтра высших гармоник.

2. Адаптация системы управления активного выпрямителя к несимметрии питающего напряжения осуществляется путем введения сетевого напряжения в качестве корректирующего сигнала прямого действия.

3. Для фильтрации сетевого напряжения используется фильтр скользящего среднего с конечной импульсной характеристикой (КИХ - фильтр) во вращающейся системе координат. Среди предложенных вариантов фильтрации он обеспечивает наименьший бросок тока в переходных режимах и наилучшую симметрию в симметричном режиме.

4. Предложенная система управления активного выпрямителя с адаптацией к несимметрии питающего напряжения удовлетворяет поставленным требованиям и повышает устойчивость работы активного выпрямителя при рассматриваемых провалах напряжения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Способы повышения устойчивости электроприводов непрерывных производств при провалах напряжения / Храмин Т.Р., Корнилов Г.П., Крубцов Д.С., Николаев А.А., Карандаева О.И., Журавлев П.Ю. // Вестник ЮУрГУ: Энергетика. 2014. №2. С. 80–87.
2. Храмин Т.Р., Корнилов Г.П., Крубцов Д.С. Оценка гармонического состава напряжения сети при работе активных выпрямителей большой мощности // Труды международной пятнадцатой научно-технической конференции «Электроприводы переменного тока». Екатеринбург, 2012. С. 157–160.
3. Исследование воздействия активных выпрямителей большой мощности на питающую сеть / Храмин Т.Р., Корнилов Г.П., Николаев А.А., Храмин Р.Р., Крубцов

Д.С. // Вестник ИГЭУ. 2013. №1. С. 80–83.

4. Study of Evaluation Voltage Harmonic Distortion on Active Rectifiers / Kornilov G.P., Khrumshin T.R., Nikolaev A.A., Krubtsov D.S., Khrumshin R.R. // International School on Nonsinusoidal Currents and Compensation: Proceedings of the XI International Conference-Seminar (ISNCC 2013), Zelona Gora, Poland. 2013, pp. 1–3.
5. Храмин Т.Р., Корнилов Г.П., Крубцов Д.С. Оценка методов широтно-импульсной модуляции напряжения активных выпрямителей прокатных станов // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2013. №2. С. 48–53.
6. Применение широтно-импульсной модуляции с удалением выделенных гармоник для улучшения качества выходного напряжения трехуровневого инвертора / Левин А.Д., Радковский Г.В., Радченко Ю.Н., Липанов В.М., Шутько В.Ф. // Электротехника. 2006. № 1. С. 57–61.
7. A Flexible Selective Harmonic Mitigation Technique to Meet Grid Codes in Three-Level PWM Converters / Franquelo L.G., Napoles J., Portillo Guisado R.C., Leon J.I., Aguirre M.A. // IEEE Transactions On Industrial Electronics. 2007. Vol. 54. № 6. pp. 3022–3029.
8. Resonances in a High-Power Active-Front-End Rectifier System / Rodriguez J.R., Pontt J., Huerta R., Alzamora G., Becker N., Kouro S., Cortes P., Lezana P. // IEEE Transactions On Industrial Electronics. 2005. Vol. 52. № 2. pp. 482–488.
9. Fei W. A, Du X., Wu B. Generalized Half-Wave Symmetry SHE-PWM Formulation for Multilevel Voltage Inverters // IEEE Transactions On Industrial Electronics. 2010 Vol. 57. № 9. pp. 3030–3038.
10. Крубцов Д.С., Храмин Т.Р., Вишняков С.Г. Повышение устойчивости мощных электроприводов на базе активных выпрямителей при провалах напряжения // Материалы 72-й международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы современной науки, техники и образования». Магнитогорск: Изд-во МГТУ им. Г.И.Носова. 2014. Т 2. С.113–118.
11. Проблемы качества внутривозовского электроснабжения и их решение на примере ОАО «ММК» / Журавлев Ю.П., Коваленко А.Ю., Корнилов Г.П., Славгородский В.Б., Николаев А.А., Храмин Т.Р. // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2011. №4. С. 26–30.
12. Ограничение провалов напряжения в системах электроснабжения промышленных предприятий/ Корнилов Г.П.,

- Коваленко А.Ю., Николаев А.А., Абдулвелеев И.Р., Храмин Т.Р. // Электроэнергетика. 2014. № 2(23). С. 44–48.
13. Теличко Л.Я., Басов П.М. Способы сохранения устойчивости ответственных электроприводов металлургических предприятий при провалах напряжения в системе электропитания // Энергетические системы. 2010. №1. С. 38–42.
 14. Влияние ДКИН на качество электроэнергии при коротких замыканиях в питающих электрических сетях / Федотов А.И., Кузнецов Р.В., Федотов Е.А., Леухин А.Н. // Изв. вузов. Проблемы энергетики. 2015. № 3-4. С. 36–41.
 15. Использование статического тиристорного компенсатора сверхмощной дуговой сталеплавильной печи для обеспечения устойчивости электроэнергетической системы и повышения надежности внутризаводского электроснабжения / Николаев А.А., Корнилов Г.П., Ивекеев В.С., Ложкин И.А., Котышев В.Е. // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2014. №1. С. 59–69.
 16. Operation of Grid-Connected DFIG Under Unbalanced Grid Voltage Condition / Zhou Y., Bauer P., Ferreira J.A., Pierik J. // IEEE Transactions On Energy Conversion. 2009. Vol. 24. № 1. pp. 240–246.
 17. Control Strategies Based on Symmetrical Components for Grid-Connected Converters Under Voltage Dips / Alepuz S., Busquets-Monge S., Bordonau J., Martnnez-Velasco J.A., Silva C.A., Pontt J., Rodriguez J. // IEEE Transactions On Industrial Electronics. 2009. Vol. 56. № 6. pp. 2162–2173.
 18. Haijun T., Di H. Study of Control Strategy Based Dual-PWM Converter under Unbalanced Input Voltage Condition // Advances in Electronic Engineering, Communication and Management Vol.1, Lecture Notes in Electrical Engineering. 2012. Vol. 139. pp. 267–272.
 19. Analysis of Compensation Strategies for Dynamic Voltage Restorer Based on DSFR-PLL Control / Zhang X., Yan J., Wen Z., Jin D. // Advances in Electronic Engineering, Communication and Management Vol.2, Lecture Notes in Electrical Engineering. 2012. Vol. 140. pp. 555–562.
 20. Храмин Т.Р., Корнилов Г.П., Крубцов Д.С. Повышение устойчивости мощных активных выпрямителей при провалах напряжения // Труды VIII Международной (XIX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2014. Саранск, 2014. Т.2. С. 334–338.

Поступила в редакцию 25 апреля 2017 г.

INFORMATION IN ENGLISH

IMPROVING STABILITY OF ACTIVE RECTIFIERS OF ELECTRIC ROLLING MILLS TO UNBALANCED VOLTAGE

Dmitrij S. Krubcov

Electrician, Shop «Energy service», LLC «United service company», Magnitogorsk, Russia. E-mail: vozburk@mail.ru

The well-known control system of the active rectifier with negative phase-sequence voltage precontrol increasing stability of its operation in case of asymmetry of power voltage has been analyzed. The main characteristic of this system is the existence of the unit of a time delay, which together with the harmonic filter introduces an error between the true value of voltage and the selected reverse sequence signal. The control system of the active rectifier with the mains voltage precontrol in which there is no additional unit of a time delay is described. Three methods of the mains voltage filtering are analyzed and the optimum one is selected. Evaluation of the work of the active rectifier with advanced control system in case of different dips of voltage is made. The offered control system meets the delivered requirements and increases stability of operation of the active rectifier in case of the considered voltage dips.

Keywords: Rolling mill, active rectifier, control system, voltage dip, voltage unbalance.

REFERENCES

1. Hramshin T.R., Kornilov G.P., Krubcov D.S., Nikolaev A.A., Karandaeva O.I., Zhuravlev P.Ju. Methods of improving the stability of electric drives of continuous production during voltage sags. *Vestnik JuURGU: Jenergetika* [Bulletin SUSU: Power Engineering.], 2014, no. 2, pp. 80–87. (In Russian)
2. Hramshin T.R., Kornilov G.P., Krubcov D.S. Estimation of the harmonic composition of the mains voltage during operation of active rectifiers of high power. *Trudy mezhdunarodnoj pjatnadcatoj nauchno-tehnicheskoy konferencii «Jelektroprivody peremennogo toka»*. Ekaterinburg [Proceedings of the international fifteenth scientific and technical conference "AC electric drives"]. Ekaterinburg, 2012, pp. 157–160. (In Russian)
3. Hramshin T.R., Kornilov G.P., Nikolaev A.A., Hramshin R.R., Krubcov D.S. Research of the Influence of High Power Active Rectifiers on Mains Supply. *Vestnik IGJeU* [Bulletin of ISPU], 2013, no. 1, pp. 80–83. (In Russian)
4. Kornilov G.P., Hramshin T.R., Nikolaev A.A., Krubcov D.S., Hramshin R.R. Study of Evaluation Voltage Harmonic Distortion on Active Rectifiers. International School on Nonsinusoidal Currents and Compensation: Proceedings of the XI International Conference-Seminar (ISNCC 2013), Zelona Gora, Poland. 2013, pp. 1–3.
5. Hramshin T.R., Kornilov G.P., Krubcov D.S. *Otsenka metodov shirotno-impulsnoi modulyatsii napryazheniya aktivnykh vypryamiteley prokatnykh stanov* [Evaluation of PWM methods of voltage active rectifiers at rolling mills]. Russian Internet Journal of Industrial Engineering, 2013, no. 2, pp. 48–53. (In Russian)
6. Levin A.D., Radkovskiy G.V., Radchenko Y.N., Lipanov V.M., Shut'ko V.F. Application of SHE PWM to improve the quality of the output voltage. *Jelektrotehnika* [Electrical Engineering], 2006, no.1, pp. 57–61. (In Russian)
7. Franquero L.G., Napoles J., Portillo Guisado R.C., Leon J.I., Aguirre M.A. A Flexible Selective Harmonic Mitigation Technique to Meet Grid Codes in Three-Level PWM Converters. *IEEE Transactions On Industrial Electronics*, 2007, vol. 54, no. 6, pp. 3022–3029.
8. Rodriguez J.R., Pontt J., Huerta R., Alzamora G., Becker N., Kouro S., Cortes P., Lezana P. Resonances in a High-Power Active-Front-End Rectifier System. *IEEE Transactions On Industrial Electronics*, 2005, vol. 52, no. 2, pp. 482–488.
9. Fei W. A, Du X., Wu B. Generalized Half-Wave Symmetry SHE-PWM Formulation for Multilevel Voltage Inverters. *IEEE Transactions On Industrial Electronics*, 2010, vol. 57, no. 9, pp. 3030–3038.
10. Krubcov D.S., Hramshin T.R., Vishnjakov S.G. Improving the sustainability of powerful electric drives on the basis of active rectifiers with voltage dips. *Materialy 72-j mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii «Aktual'nye problemy sovremennoj nauki, tehniki i*

- obrazovaniya*» MGTU im. G.I.Nosova. [Proceedings of the 72th international scientific-technical conference "Actual problems of modern science, technology and education"]. 2014, vol. 2, pp. 113–118. (In Russian)
11. Zhuravlev Ju.P., Kovalenko A.Ju., Kornilov G.P., Slavgorodskij V.B., Nikolaev A.A., Hramshin T.R. Problems of quality of in-plant power supply and their solution on the example of OJSC MMK. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Jelektromehanika* [Proceedings of higher educational institutions. Electromechanics], 2011, no. 4, pp. 26–30. (In Russian)
 12. Kornilov G.P., Kovalenko A.Ju., Nikolaev A.A., Abdulvelev I.R., Hramshin T.R. Restriction of voltage dips in industrial power supply systems. *Jelektroenergetika* [Power engineering], 2014, no. 2(23), pp. 44–48. (In Russian)
 13. Telichko L.Ja., Basov P.M. Methods for maintaining the stability of critical electric drives of metallurgical enterprises in case of voltage failures in the power supply system. *Jenergeticheskie sistemy* [Power systems], 2010, no. 1, pp. 38–42. (In Russian)
 14. Fedotov A.I., Kuznecov R.V., Fedotov E.A., Leuhin A.N. Effect of DCIN on the quality of electricity in case of short circuits in supplying electrical networks. *Izvestija VUZ. Problemy jenergetiki* [Proceedings of higher educational institutions. Energy problems], 2015, no. 3–4, pp. 36–41. (In Russian)
 15. Nikolaev A.A., Kornilov G.P., Ivekeev V.S., Lozhkin I.A., Kotyshev V.E. Using of Static Var Compensator of the UltraHigh Power Electric Arc Furnace to Support Electric Power System Stability and to Increase Reliability of Factory Power Supply. *Russian Internet Journal of Industrial Engineering*, 2014, no. 1, pp. 59–69. (In Russian)
 16. Zhou Y., Bauer P., Ferreira J.A., Pierik J. Operation of Grid-Connected DFIG Under Unbalanced Grid Voltage Condition. *IEEE Transactions On Energy Conversion*, 2009, vol. 24, no. 1, pp. 240–246.
 17. Alepuz S., Busquets-Monge S., Bordonau J., Martnez-Velasco J.A., Silva C.A., Pontt J., Rodriguez J. Control Strategies Based on Symmetrical Components for Grid-Connected Converters Under Voltage Dips. *IEEE Transactions On Industrial Electronics*, 2009, vol. 56, no. 6, pp. 2162–2173.
 18. Haijun T., Di H. Study of Control Strategy Based Dual-PWM Converter under Unbalanced Input Voltage Condition. *Advances in Electronic Engineering, Communication and Management Vol.1, Lecture Notes in Electrical Engineering*, 2012, vol. 139, pp. 267–272.
 19. Zhang X., Yan J., Wen Z., Jin D. Analysis of Compensation Strategies for Dynamic Voltage Restorer Based on DSFR-PLL Control. *Advances in Electronic Engineering, Communication and Management Vol.2, Lecture Notes in Electrical Engineering*, 2012, vol. 140, pp. 555–562.
 20. Hramshin T.R., Kornilov G.P., Krubcov D.S. Improving the stability of powerful active rectifiers in voltage sags. *Trudy VIII Mezhdunarodnoj (XIX Vserossijskoj) konferencii po avtomatizirovannomu jelektroprivodu AJeP-2014 Saransk* [Proceedings of the VIII International (XIX All-Russian) Conference on Automated Electric Drive AEP-2014 Saransk]. 2014, vol. 2, pp. 334–338. (In Russian)

Крубцов Д.С. Повышение устойчивости активных выпрямителей электроприводов прокатных станов к несимметрии питающего напряжения // *Электротехнические системы и комплексы*. 2017. № 2 (35). С. 19–24. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-2\(35\)-19-24](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-2(35)-19-24)

Krubcov D.S. Improving Stability of Active Rectifiers of Electric Rolling Mills to Unbalanced Voltage. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2017, no. 2 (35), pp. 19–24. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-2\(35\)-19-24](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-2(35)-19-24)

Греков Э.Л.¹, Филимонов С.И.²¹ ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет»² ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет»

СРАВНЕНИЕ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ ЭКСКАВАТОРНЫМ ФИЛЬТРОКОМПЕНСИРУЮЩИМ УСТРОЙСТВОМ В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДА «ТИРИСТОРНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ-ДВИГАТЕЛЬ»

Современный экскаваторный электропривод, выполненный по системе «тиристорный преобразователь-двигатель» (ТП-Д), необходимо применять с фильтрокомпенсирующим устройством (ФКУ). Исходя из опыта эксплуатации, а также из простоты и надежности применяемых схем, на карьерных экскаваторах зарекомендовало себя ФКУ ступенчатого типа. Применение ФКУ обеспечивает требуемое качество электрической энергии (ЭЭ), а также коэффициент мощности $\text{tg}\varphi = 0,33-0$. Для исследования алгоритмов управления ФКУ и их влияния на показатели качества ЭЭ была разработана имитационная модель в Matlab/Simulink, учитывающая особенности реализации цифровой системы управления и работы силовой части электроприводов. В качестве задающих и возмущающих сигналов были взяты реальные графики работы экскаватора ЭКГ-12К. Для подтверждения адекватности сравнивались результаты моделирования с реальными графиками. Проведены исследования трех основных методов формирования управляющих сигналов на включение ФКУ: по реактивной мощности электроприводов, по сигналам обратной связи по току якоря и регуляторов напряжения. Так как электроприводы экскаватора распределены по двум силовым трансформаторам со своими ФКУ, для каждого метода предложены три способа управления: раздельное включение ступеней и совместное, по суммарному или наибольшему сигналу. Получены зависимости изменения времени включения ступени от уровня задания и длины питающей линии 6 кВ. Исследованы показатели качества ЭЭ и энергетические показатели. Получены их зависимости от длины питающей линии.

Ключевые слова: фильтро-компенсирующее устройство, экскаваторный электропривод, тиристорный преобразователь.

ВВЕДЕНИЕ

Необходимым условием при проектировании экскаваторного электропривода, выполненного по системе ТП-Д, является наличие ФКУ [1]. С помощью ФКУ обеспечивается требуемое качество ЭЭ согласно [2], а также коэффициент мощности $\text{tg}\varphi = 0,33-0$ согласно техническим заданиям на проектирование [3, 4]. В данный момент из всего разнообразия производимых ФКУ под критерии минимальной стоимости, простоты и надежности схемы попадают только две группы ФКУ: ступенчатого типа (ФКУ-С) и с непрерывно «косвенным» регулированием (ФКУ-К). Тип ФКУ-С – это сборки, состоящие из реакторов и конденсаторов, которые по сигналу управления подключаются коммутационными аппаратами. Тип ФКУ-К – это постоянно подключенная к сети фильтро-конденсаторная сборка и тиристорно-реакторная, регулирующая группа, осуществляющая плавное регулирование реактивной мощности с помощью изменения угла управления тиристорами [6]. Среди этих групп на экскаваторе получили распространение ФКУ типа ФКУ-С. ФКУ устанавливается на борту экскаватора и подключается к каждому силовому трансформатору со стороны обмотки низкого напряжения.

ОСНОВНЫЕ ПРОБЛЕМЫ И ПУТИ РЕШЕНИЯ

На рис. 1 в качестве примера представлена схема электроснабжения карьерного экскаватора ЭКГ-12К с главными приводами и ФКУ. Применяемое ФКУ имеет неотключаемую ступень мощностью 200 кВАр и две подключаемые ступени мощностью по 300 кВАр на каждый силовой трансформатор. Мощными приемниками электрической энергии на борту экскаватора являются приводы подъема (Н), напора (С) и поворота (S). Экскаватор подключается по воздушной линии напряжением 6 кВ к главной понизительной подстанции (ГПП).

Структурно однолинейная схема похожа на схему электроснабжения экскаватора ЭШ-6/45, представленную в [3]. Однако, в отличие от драглайна, главные приводы ЭКГ-12К распределены по трансформаторам неравномерно. А так как у электроприводов разные нагрузочные диаграммы, то и силовые трансформаторы загружены неравномерно.

В представленных экскаваторных электроприводах для управления применяется двухконтурная система регулирования тока и напряжения с зависимым задатчиком интенсивности ЗЗИ [4, 5]. Структурная схема электропривода напора приведена на рис. 2. В приводе подъема каждый двигатель имеет индивидуальное питание и два индивидуальных контура тока, управляемых от одного регулятора напряжения.

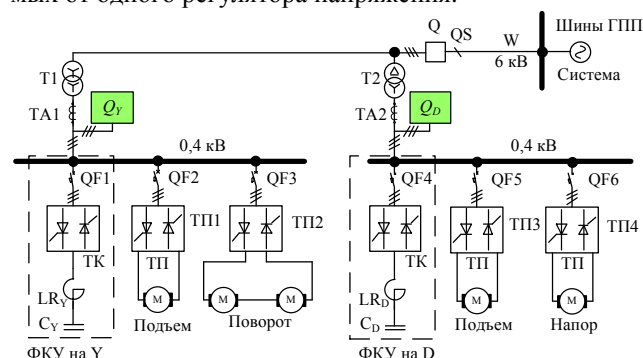


Рис. 1. Однолинейная схема электроснабжения экскаватора ЭКГ-12К

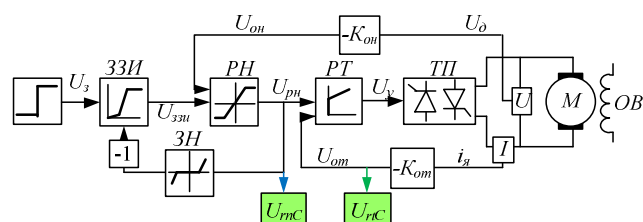


Рис. 2. Структурная схема электропривода напора

Экскаватор является потребителем с резкопеременной нагрузкой. В связи с этим в питающей сети в первую очередь возникают колебания (КН) и отклонения напряжения (ОН). Кроме того, на эти показатели качества ЭЭ значительно влияет питающая экскаватор линия, которая может достигать в длину более 15 км. А как известно [6, 7], с увеличением длины питающей линии ОН и КН в точке передачи ЭЭ изменяются. Наибольшее ОН происходит в моменты копания, когда токи приводов подъема и напора максимальны. В эти периоды необходимо подключать ступени ФКУ как можно раньше для компенсации отрицательных ОН ($\delta U_{(t)}$). С другой стороны, при компенсации наброса реактивной мощности (РМ) нагрузки подключаемые ступени ФКУ должны включаться так, чтобы не вызвать дополнительных КН [8]. Поэтому представляет интерес исследование различных алгоритмов управления с точки зрения быстродействия включения ступеней ФКУ.

Таким образом, правильное управление экскаваторным ФКУ является сложной и важной задачей, при решении которой необходимо учитывать много факторов.

В [3] были проведены исследования методов включения ступеней ФКУ в зависимости от режимов работы электроприводов и даны рекомендации по выбору уставок. Но на этапе наладки при управлении по суммарному току необходимо каждый раз настраивать уставки включения ФКУ в зависимости от режима работы экскаватора.

Кроме того, доподлинно не известно в какой степени изменяются показатели качества в зависимости от длины питающей линии при работе экскаватора в карьере. Поэтому для этих целей была разработана имитационная модель экскаватора ЭКГ-12К в Matlab/Simulink, представленная на **рис. 3**. Структура модели состоит из подсистем, моделирующих двигатели, тиристорные преобразователи и питающую сеть 6 и 0,4 кВ. Последняя подсистема «Сеть 6/0,4 кВ» представлена на **рис. 4**.

Разработанная имитационная модель отличается от энергетической, представленной в [3], и позволяет производить оценку следующих показателей качества электрической энергии согласно [1]: КН (кратковременная доза фликера P_{st}), ОН, суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения K_U , коэффициенты гармонических составляющих напряжения пятого $K_{U(5)}$ и седьмого $K_{U(7)}$ порядка, коэффициенты несимметрии напряжения по обратной K_{2U} и нулевой K_{0U} последовательности. Помимо этого модель рассчитывает коэффициенты гармонических составляющих тока K_I , $K_{I(5)}$, $K_{I(7)}$, коэффициенты несимметрии тока K_{2I} и K_{0I} , энергетические показатели экскаватора, среднецикловой ток в линии, а также отклонения активной и реактивной мощности. Последние величины наглядно показывают, сколько экскаватор потребил и сгенерировал активной и реактивной мощностей в сети 6 кВ при копании в цикле.

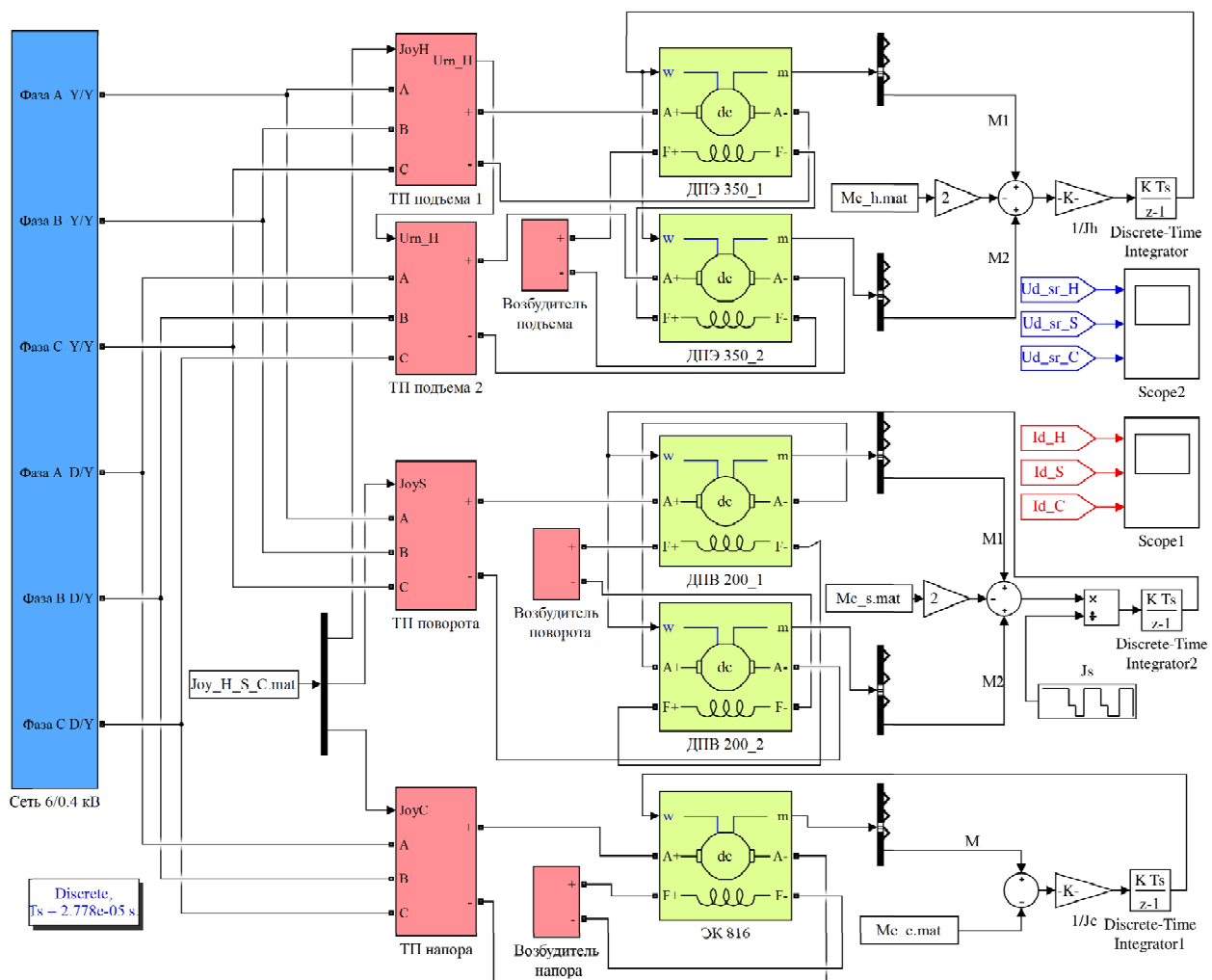


Рис. 3. Имитационная модель экскаватора ЭКГ-2К

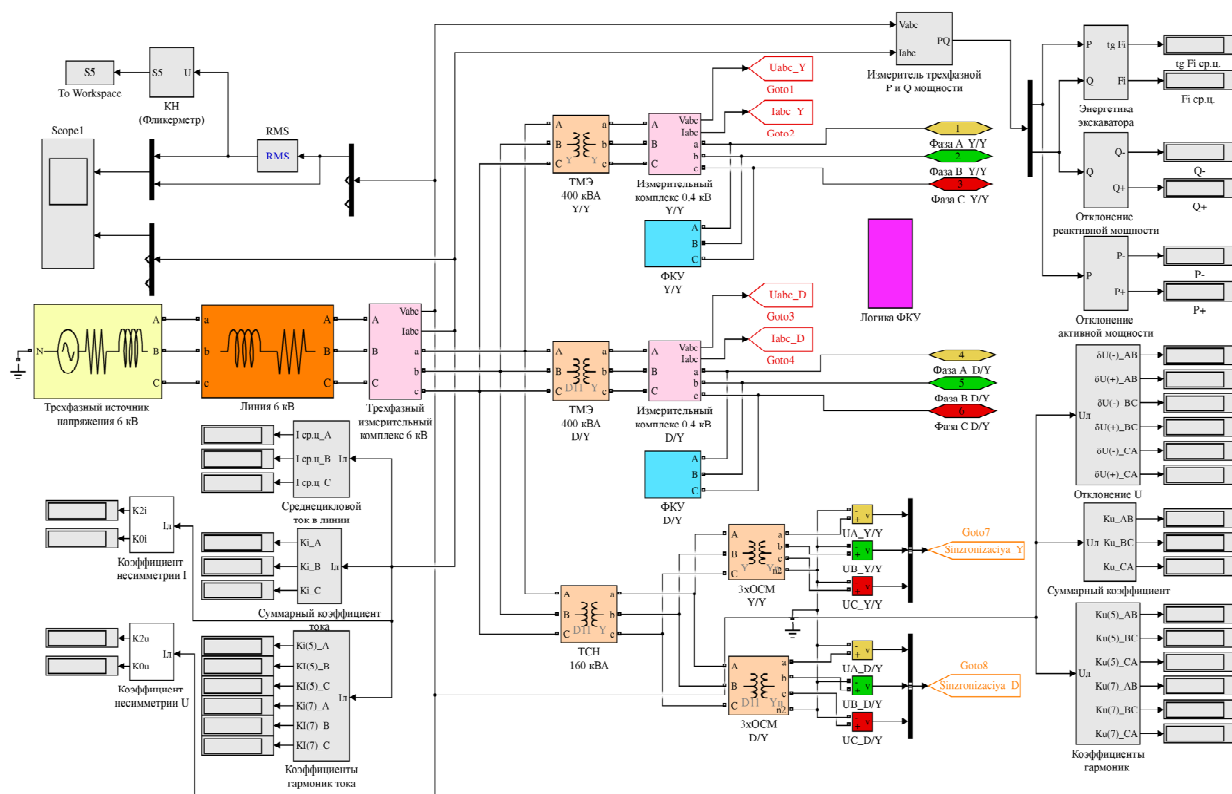


Рис. 4. Подсистема «Сеть 6 и 0,4 кВ»

Структура подсистем возбудителей для электроприводов экскаватора является одинаковой. Поэтому в качестве примера на **рис. 5** представлена система возбуждения привода поворота. Возбудители являются неререверсивными и моделируются источником напряжения, замкнутым обратной связью по току с ПИ-регулятором. Проявление нелинейности магнитной системы двигателя реализуется блоком «Lookup Table» в цепи задания. Это позволяет моделировать явление «насыщения», применяя стандартные модели ДПТ. Такая реализация возможна, так как исследования в статье направлены не на особенности динамики электроприводов, а на систему управления ФКУ. Для ослабления магнитного потока в моменты реверса двигателя используется обратная связь по напряжению « $U_d S$ » на выходе преобразователя в якорной цепи.

Для работы представленной модели необходимо иметь информацию по задающим сигналам с джойстиков «Joy_H_S_C.mat», а так же по моментам статических нагрузок « M_c » каждого привода и моментам инерции « J » (см. **рис. 3**). Такую информацию можно получить, анализируя данные с «черного ящика» (ЧЯ) цифровой системы управления экскаватора ЭКГ-12 К производства АО «Рудоавтоматика им В.В. Сафошина». Цифровая система позволяет регистрировать весь процесс экскавации на протяжении длительного промежутка времени.

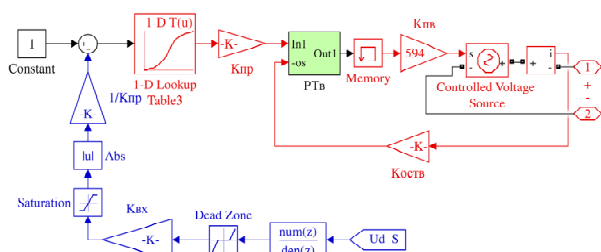


Рис. 5. Структура подсистемы «Возбудитель поворота»

Рассмотрим работу модели на промежутке времени, равном 100 с. За это время машинист успевал совершить почти три цикла экскавации. Сигналы управления с джойстиков, токи возбуждения I_e и якоря I_d , напряжения U_d каждого привода были записаны в соответствующие файлы с расширением *.mat программного комплекса Matlab/Simulink. После этого была разработана вспомогательная модель, в которой по уравнению движения были вычислены статические моменты M_c (**рис. 6, в, и, к**) и определены моменты инерции J электроприводов. Графики «Joy» и « M_c » были введены в исходную модель (см. **рис. 3**) и ею обработаны. В результате получены переходные процессы тока I_d и напряжения U_d (**рис. 6**), идентичные тем, которые были взяты из ЧЯ. Например, на **рис. 6, б** и **г** представлены соответственно смоделированная и реальная осциллограммы тока I_d привода подъема. Сравнение полученных осциллограмм говорит о том, что модель является адекватной.

Для управления экскаваторным ФКУ целесообразно рассмотреть три основных метода:

- 1) по реактивной мощности электроприводов **РМЭ**;
- 2) по сигналам обратных связей по току главных приводов **ОСТ**;
- 3) по сигналам регуляторов напряжений главных приводов **СРН**.

Первый метод управления основывается на количественной оценке реактивных мощностей электроприводов, подключенных к силовым трансформаторам Т1 и Т2. Вычисление реактивной мощности происходит в блоках « Q_Y » и « Q_D » по сигналам с трансформаторов тока ТА1 и ТА2 и напряжениям (см. **рис. 1**). Представленный метод применялся в

[3] для определения оптимальной величины срабатывания уставок ступеней ФКУ. Метод был адаптирован под энергетическую модель. В результате было выявлено, что при его использовании независимо от режима работы для обеспечения минимального среднециклового тока использовался только один набор уставок.

Второй метод управления подразумевает использование сигналов обратных связей по току каждого привода экскаватора. Эта связь показана на **рис. 2**, а ее сигнал поступает в блок « U_{rc} ». При исследовании в [3] данного метода выявлено, что в разных режимах работы необходимо каждый раз выбирать новые уставки ФКУ для минимального среднециклового тока.

Последний, третий метод в проведенных в [3] исследованиях не участвовал, так как применялась энергетическая модель, не учитывающая подчиненную систему управления. Этот метод используется в системах управления ФКУ производства АО «Рудоавтоматика им. В.В. Сафошина». При его применении необходимо использовать сигналы с выходов регуляторов напряжения (РН) каждого привода экскаватора. На **рис. 2** эти сигналы поступают в блок « U_{mc} ».

При технической реализации методов управления ФКУ на практике и при компьютерном моделировании можно выделить три способа:

1. совместное управление ФКУ «Y» и «D» при суммировании сигналов;
2. совместное управление ФКУ «Y» и «D» при сравнении сигналов;
3. раздельное управление ФКУ «Y» и «D».

Соответственно ступени ФКУ одного уровня, подключаемые к разным трансформаторам, могут включаться либо одновременно, либо в разное время.

Первый способ подразумевает суммирование сигналов в каждом из рассматриваемых методов. При реализации данного способа в методах СРН и ОСТ необходимо сигналы взять по модулю и согласовать по коэффициентам обратных связей по току якоря:

$$U_{rn} = 2|U_{rnH}| + |U_{rnC}| \cdot \frac{K_{omH}}{K_{omC}} + |U_{rnS}| \cdot \frac{K_{omH}}{K_{omS}}, \quad (1)$$

$$U_{rt} = 2 \cdot |U_{rtH}| + |U_{rtC}| \cdot \frac{K_{omH}}{K_{omC}} + |U_{rtS}| \cdot \frac{K_{omH}}{K_{omS}}, \quad (2)$$

где K_{omH} , K_{omS} , K_{omC} – коэффициенты обратных связей по току приводов экскаватора.

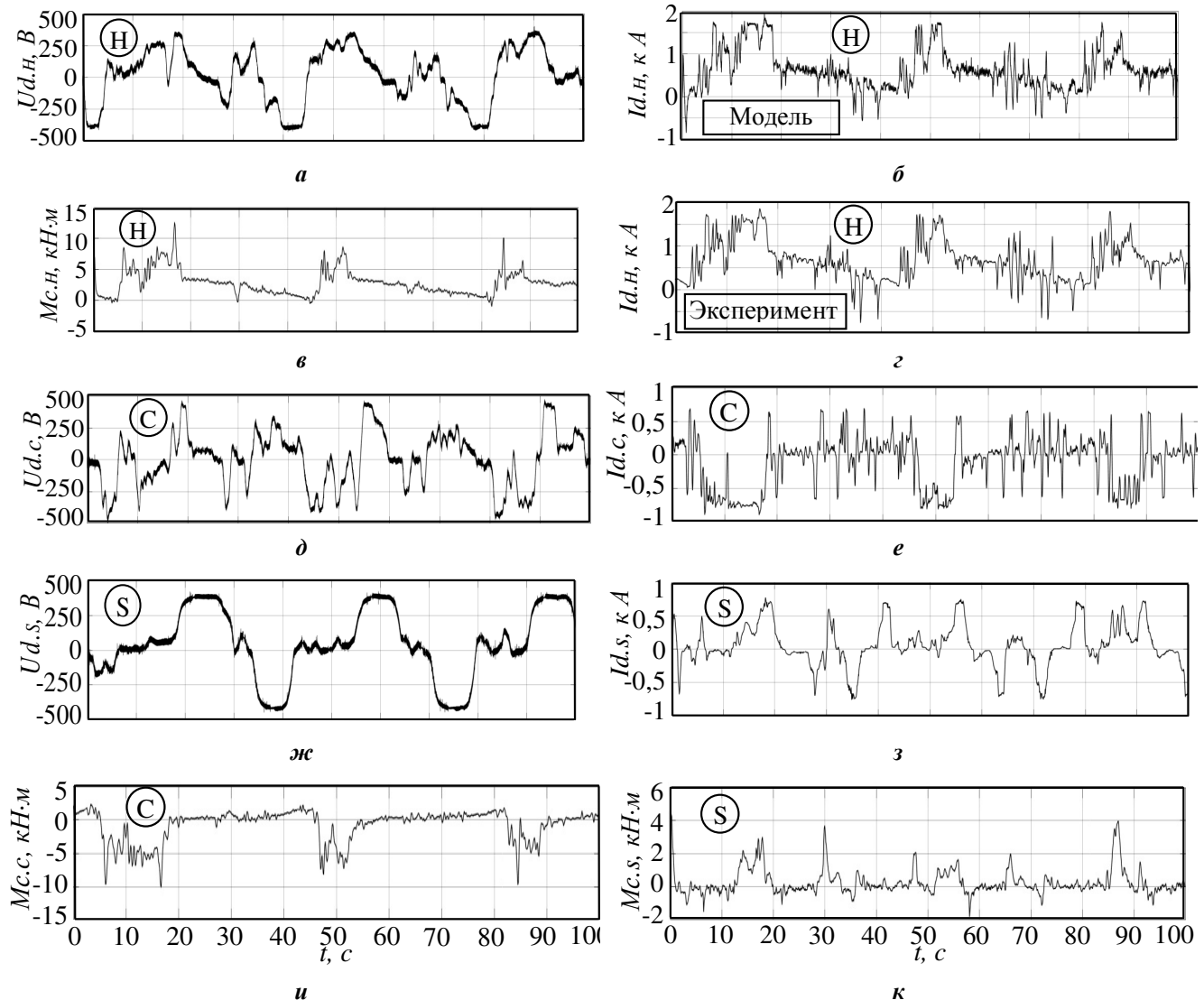


Рис. 6. Осциллограммы а, б, в – U_d , I_d , M_c привода подъема; г – I_d привода подъема реальная; ж, з, к – U_d , I_d , M_c привода поворота; д, е, и – U_d , I_d , M_c привода напора

В методе РМЭ суммируются не только сигналы по реактивным мощностям электроприводов, подключенных к трансформаторам Т1 «Q_Y» и Т2 «Q_D», но и значения установленной мощности неотключаемых и подключаемых ступеней ФКУ. Сигналы из блоков «Q_Y» и «Q_D» – это оставшаяся нескомпенсированная реактивная мощность экскаватора $Q_{э.нecк}$:

$$Q_{upr} = Q_{э.нecк} + 2(Q_{неоткл} + s_1 \cdot Q_{1ct} + s_2 \cdot Q_{2ct}), \quad (3)$$

где $Q_{э.нecк} = Q_Y + Q_D$ – нескомпенсированная реактивная мощность экскаватора, кВАр; $Q_{неоткл}$, Q_{1ct} , Q_{2ct} – реактивные мощности неотключаемой и подключаемых ступеней, кВАр; 2 – количество силовых трансформаторов, к которым подключены ступени ФКУ; s_1 и s_2 – функции включения ступеней Q_{1ct} и Q_{2ct} .

После суммирования сигналов в любом рассматриваемом методе формируются импульсы управления ступенями ФКУ (рис. 7). Суммарный сигнал сравнивается с уставками и определяет состояние RS триггеров. Для того чтобы ступени ФКУ не отключались часто из-за резкопеременного суммарного сигнала, устанавливаются блоки «Задержка1» и «Задержка2», обеспечивающие выдержку времени на отключение.

В способе совместного управления при сравнении сигналов необходимо объединить приводы, подключаемые к одному трансформатору. Как и в предыдущем случае, при реализации данного способа в методах СРН и ОСТ сигналы берутся по модулю и согласовываются соответственно равенствам:

$$U_{rn1} = |U_{rnH}| + |U_{rnC}| \cdot \frac{K_{omH}}{K_{omC}}; \quad (4)$$

$$U_{rn2} = |U_{rnH}| + |U_{rnS}| \cdot \frac{K_{omH}}{K_{omS}}; \quad (5)$$

$$U_{rt1} = |U_{rtH}| + |U_{rtC}| \cdot \frac{K_{omH}}{K_{omC}}; \quad (6)$$

$$U_{rt2} = |U_{rtH}| + |U_{rtS}| \cdot \frac{K_{omH}}{K_{omS}}. \quad (7)$$

При использовании метода РМЭ необходимо определять реактивную мощность до компенсации для каждого силового трансформатора отдельно:

$$Q_{upr_Y} = Q_Y + Q_{неоткл} + s_{1_Y} \cdot Q_{1ct} + s_{2_Y} \cdot Q_{2ct}; \quad (8)$$

$$Q_{upr_D} = Q_D + Q_{неоткл} + s_{1_D} \cdot Q_{1ct} + s_{2_D} \cdot Q_{2ct}. \quad (9)$$

В этом способе сигналы на выходе триггеров, состояние которых определяется уставками на включение и отключение, объединяются с помощью функции «ИЛИ» (рис. 8). Таким образом, на вход блока задержки поступает сигнал, если хотя бы один из триггеров принимает состояние «1».

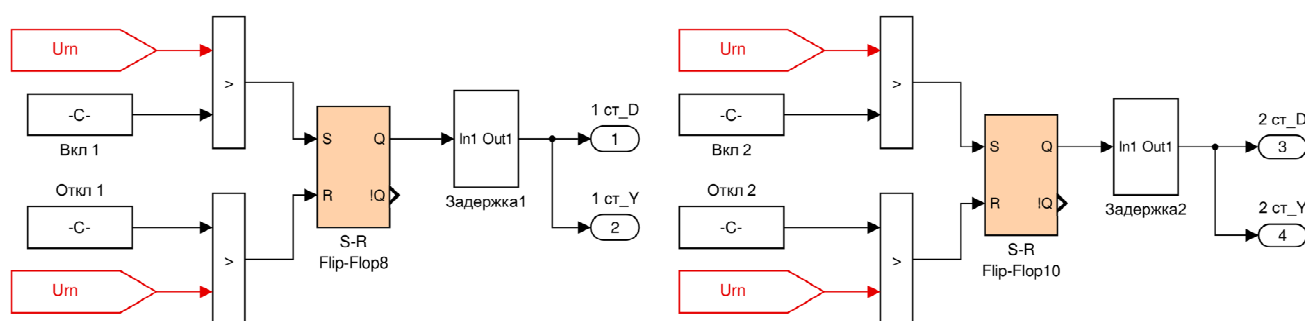


Рис. 7. Формирование импульсов управления при суммировании сигналов в методе СРН

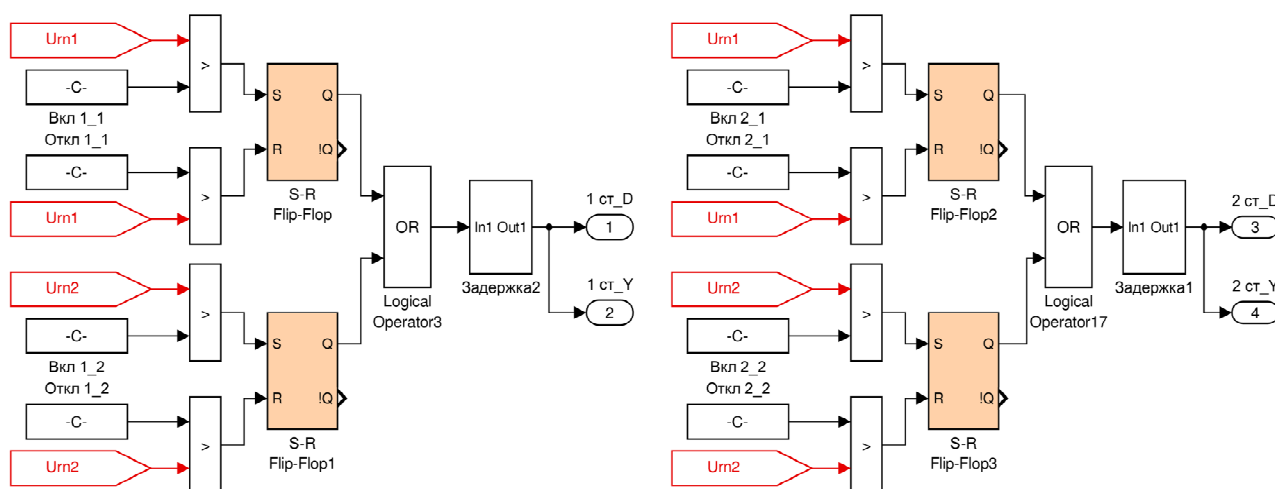


Рис. 8. Формирование импульсов управления при сравнении сигналов в методе СРН

При использовании раздельного управления ступенями ФКУ в применяемых методах необходимо произвести объединение и согласование сигналов по формулам (4) – (7). А при использовании метода РМЭ использовать равенства (8) и (9). Таким образом, получаются сигналы, которые позволяют сформировать импульсы управления ступенями ФКУ раздельно по каждому трансформатору.

ИССЛЕДОВАНИЯ АЛГОРИТМОВ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Чтобы произвести оценку каждого из методов управления по быстродействию, на разработанной модели был проведен эксперимент. Привод подъема, как самый мощный на экскаваторе, разгонялся без статической нагрузки при различных заданиях U_3^* . После этого электропривод нагружался активным статическим моментом, равным двум номинальным, так, чтобы в якорных цепях появились токи, близкие к стопорным значениям. Такая ситуация характерна для режима копания при столкновении ковша с плотной или плохо взорванной породой. При таких токах, согласно рассмотренным методам, сработает как минимум первая ступень ФКУ. Время включения ступени фиксируется относительно времени приложения нагрузки. Зависимости $t_{cp} = f(U_3^*)$ для каждого из рассматриваемых методов при длине питающей линии 5, 10 и 20 км представлены на рис. 9. Как видно, независимо от длины питающей линии большинство графиков являются возрастающими.

В методе РМЭ (кривая 1) с ростом задания U_3^* возрастает время срабатывания ступени t_{cp} . А на полном задании при длине линии 20 км имеет наибольшую задержку по времени на включение. При уменьшении U_3^* рассматриваемый метод срабатывает быстрее по сравнению с другими. Это объясняется тем, что при полном задании U_3^* напряжение преобразователя U_d является максимальным и при набросе нагрузки из сети ТП потребляет активную мощность (АМ) и РМ. Эта РМ является сравнительно небольшой и ступени ФКУ включатся, как только скорость вращения двигателя и, следовательно, напряжение на якоре снизятся под действием нагрузки до уровня, когда величина РМ будет достаточной. С уменьшением задания U_3^* напряжение преобразователя U_d также уменьшается, а вместе с ним и поток АМ из сети. Однако потребляемая РМ растет, и время включения ФКУ снижается. Таким образом, метод РМЭ во всех случаях при небольшом U_3^* является самым оперативным.

Под номером 2 представлена кривая для метода ОСТ. При длинной линии и максимальном U_3^* метод работает быстрее, чем РМЭ. Однако в большинстве случаев является наихудшим по быстродействию. Это связано с тем, что при использовании этого сигнала приходится применять фильтр с постоянной времени 10 мс для вычисления среднего значения.

Кривая под номером 3 представляет метод СРН. Здесь уставки настроены по методике, предложенной в [3]. Как видно по рис. 8, независимо от длины линии и U_3^* время t_{cp} ступени ФКУ изменяется в пределах периода сетевого напряжения. Это значит, что фактически между РН и набросом нагрузки отсутствует связь

через задание U_3^* , а график 3 стремится к прямой линии. Время задержки на включение ступени формируется из инерционной постоянной времени самого РН, а также времени реакции системы на наброс нагрузки.

Выход РН и обратная связь по току якоря – это эквивалентные сигналы. Но так как последний фильтруется, то включение ФКУ происходит с большей задержкой. Следовательно, удобнее использовать метод СРН вместо ОСТ.

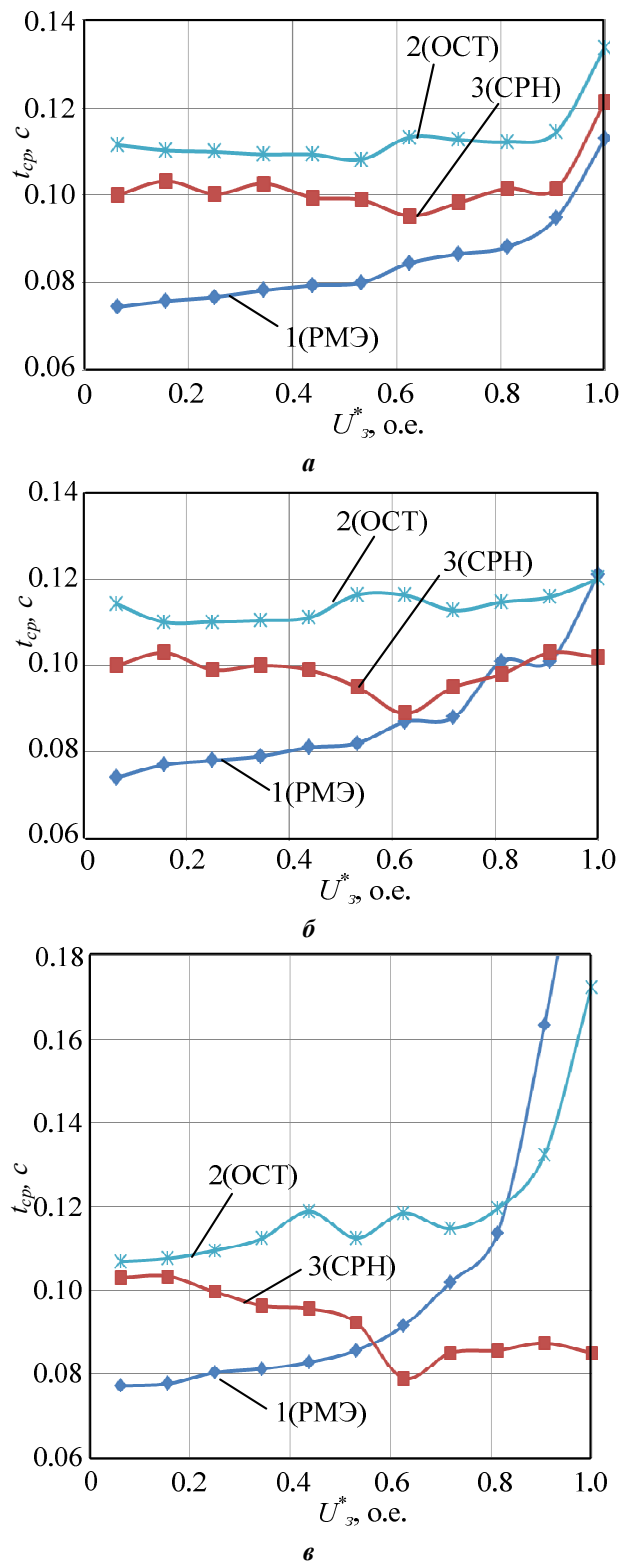


Рис. 9. Время включения первой ступени ФКУ при длине линии а – 5 км, б – 10 км, в – 20 км

Теперь рассмотрим, как влияют методы управления на качество ЭЭ в сети 6 кВ при питании от линий разной длины. Для питания экскаватора принимается линия одного сечения А-70 и не имеющая «скруток». Длина линии изменялась от 2,5 до 20 км, что характерно для карьерной сети. Линейное напряжение источника питания 6,3 кВ, мощность короткого замыкания $S_{кз} = 300$ МВА. При этом необходимо помнить, что с ростом длины линии мощность КЗ на вводе экскаватора снижается экспоненциально (на 20 км $S_{кз} = 3,5$ МВА).

В исследованиях проведена оценка следующих показателей качества и энергетики экскаватора: ОН ($\delta U_{(+)}$ и $\delta U_{(-)}$), КН (P_{st}), K_U , $I_{ср.ц}$, $\text{tg}\varphi_{ср.ц}$. Согласно [2] ОН, K_U и КН измеряются на интервалах 10 мин и не должны превышать установленных значений в течение 100, либо 95% времени интервала в 1 неделю. Для оценки этих показателей качества даже на 10-минутном интервале требуется существенная вычислительная мощность компьютера. К тому же при оценке P_{st} необходимо помнить, что резкопеременная нагрузка экскаватора хоть и циклична, но изменяется случайным образом. В связи с этим было принято для расчета показателей качества ОН и K_U и всех энергетических показателей усреднить величины на 100-секундном интервале времени. Для оценки кратковременной дозы фликера P_{st} на 10-минутном интервале предложенная модель (см. **рис. 3**) упрощалась, исключив все остальные показатели. Длительная доза фликера P_{lt} исключается из расчета, так как интервал ее вычисления составляет 2 ч.

Чтобы оценить несимметричность нагрузки, показатели ОН и коэффициенты тока и напряжения в модели рассчитываются для трех фаз. Анализ результатов исследования показал, что для экскаватора характерна практически симметричная нагрузка. Так, например, при расчете ПКЭ в методе РМЭ при раздельном управлении и длине линии 12,5 км коэффициенты несинусоидальности для трех линейных напряжений составляют 6,74, 6,73 и 6,72%. Наибольшее отличие этих величин от среднего значения – менее 0,15%. Коэффициенты несинусоидальности трех линейных токов составляют 23,99, 24,04 и 22,27%. Здесь наибольшее отличие – менее 5%. Помимо этого, на незначительную несимметрию указывает коэффициент $K_{2U} = 0,39\%$, который в 5 раз меньше допустимой величины 2%, установленной в [2]. В дальнейшем результаты исследований приводятся относительно тока фазы А и линейного напряжения АВ.

Зависимости всех представленных показателей от длины питающей линии показаны на **рис. 10**. По ним можно сделать следующие выводы. Коэффициент несинусоидальности K_U (**рис. 10, а**) при работе экскаватора без ФКУ с увеличением длины линии резко увеличивается, а при длине более 2,5 км выходит за предельно допустимое значение 8%. Применение ФКУ значительно снижает K_U , а выход за предельные 8% происходит на интервале от 15 до 20 км. Причем большая граница соответствует методу РМЭ.

Наименьшая зависимость кратковременной дозы фликера P_{st} от длины линии соответствует режиму работы без ФКУ (**рис. 10, б**). Это объясняется тем, что включения ступеней ФКУ создают дополнительные колебания напряжения. Наибольшие значения P_{st} по-

лучаются при использовании метода РМЭ при любых способах. Этот метод чувствителен не только к нагрузке, но и выходному напряжению (углам управления ТП). Так как в цикле экскавации скорость вращения двигателей так же часто меняется, как и нагрузка, то, следовательно, и частота включений ступеней ФКУ получается больше, чем в методе СРН. Что и отражается в виде ухудшения показателя P_{st} . Доза фликера практически линейно увеличивается от длины линии. С другой стороны, ни одна из представленных зависимостей не укладывается в норму $P_{st} = 1,38$ согласно [2].

Показатели качества ОН также в большей степени зависят от длины линии. Система ТП-Д без ФКУ приводит к значительному снижению $\delta U_{(+)}$ и увеличению $\delta U_{(-)}$. При длине линии более 12,5 км показатель $\delta U_{(-)}$ превышает допустимые 10%. Следовательно, система ТП-Д без ФКУ при длинных линиях окажется в аварийном режиме по ОН. Кроме того, по **рис. 10, д** видно уменьшение $I_{ср.ц}$ с ростом L , а изменение $\text{tg}\varphi_{ср.ц}$ (**рис. 10, е**) имеет оптимум. Это говорит о том, что система управления ТП при уменьшении напряжения в сети уменьшает углы управления тиристорами, что, соответственно, уменьшает уровень РМ, $I_{ср.ц}$, $\text{tg}\varphi_{ср.ц}$. Однако при значительных длинах линии и уменьшении напряжения в сети электроприводы экскаватора не могут достичь максимально заданных скоростей, и производительность экскаватора падает. Поэтому после 10 км уменьшается потребление АМ и $\text{tg}\varphi_{ср.ц}$ увеличивается.

При включенном ФКУ показатель $\delta U_{(-)}$ во всех методах растет при увеличении длины линии, но не выходит за пределы 10%. Положительное $\delta U_{(+)}$ в большей степени изменяется у метода РМЭ при сравнении сигналов. Следовательно, при этом способе управления наблюдаются значительные величины генерируемой ступенями ФКУ РМ и числа их включений. Об этом свидетельствует большое значение $I_{ср.ц}$ (см. **рис. 10, д**). А после 12,5 км происходит сильная перекомпенсация РМ (см. **рис. 10, е**). При остальных способах метода РМЭ положительные $\delta U_{(+)}$ сначала немного уменьшаются при увеличении линии до 7,5 км. Это связано с ростом падения напряжения ΔU в линии и небольшим увеличением числа включений ступеней ФКУ. Затем с изменением длины линии $\delta U_{(+)}$ число включений ступеней значительно увеличивается, и после 15 км происходит существенная перекомпенсация РМ в цикле (см. **рис. 10, е**). При этом ток $I_{ср.ц}$ значительно возрастает.

Использование метода СРН при любых способах приводит сначала к уменьшению $\delta U_{(+)}$, а затем к его увеличению. Наименьшее отклонение имеет способ раздельного управления. Объяснение этого точно такое же, как в предыдущем случае. Только для способа раздельного управления не происходит перекомпенсация на длинной линии. Во всех способах метода СРН наблюдается наименьшее значение $\text{tg}\varphi_{ср.ц}$ и фактически линейное увеличение среднециклового тока $I_{ср.ц}$ с ростом L .

Очевидно, что самый оптимальный способ, при котором будет минимальная загрузка силового трансформатора, – это метод СРН при раздельном управлении. Но, с другой стороны, для «поддержания» электрической сети по $\delta U_{(+)}$ лучшим образом проявил себя способ управления при сравнении сигналов метода РМЭ. Следовательно, электромагнитная совмести-

мость (ЭМС) такого экскаватора будет лучше.

Проведем сравнительный анализ гармонического состава тока и напряжения в сети при работе системы ТП-Д с ФКУ и без ФКУ. Для этого в качестве примера питание экскаватора будет осуществляться по линии длиной 12,5 км, а ФКУ управляться методом РМЭ. Результаты показателей качества ЭЭ (ПКЭЭ) представлены в **таблице**. Для оценки уровня искажений в ней приводятся значения, нормируемые согласно [2], а также ненормируемые.

При работе системы ТП-Д с ФКУ происходит зна-

чительное снижение уровня 5 и 7 гармоники напряжения по сравнению с отсутствующим ФКУ, а значения не выходят за пределы, установленные в [2]. Суммарный коэффициент K_U снизился почти в 3 раза и не превышает предельно допустимого значения 8%.

Отрицательное ОН снизилось также почти в 3 раза, а положительное ОН при использовании ФКУ достигает величины менее 5%. Оба показателя соответствуют допустимой величине 10%. Кратковременная доза фликера P_{st} в обоих случаях превышает допустимые значения.

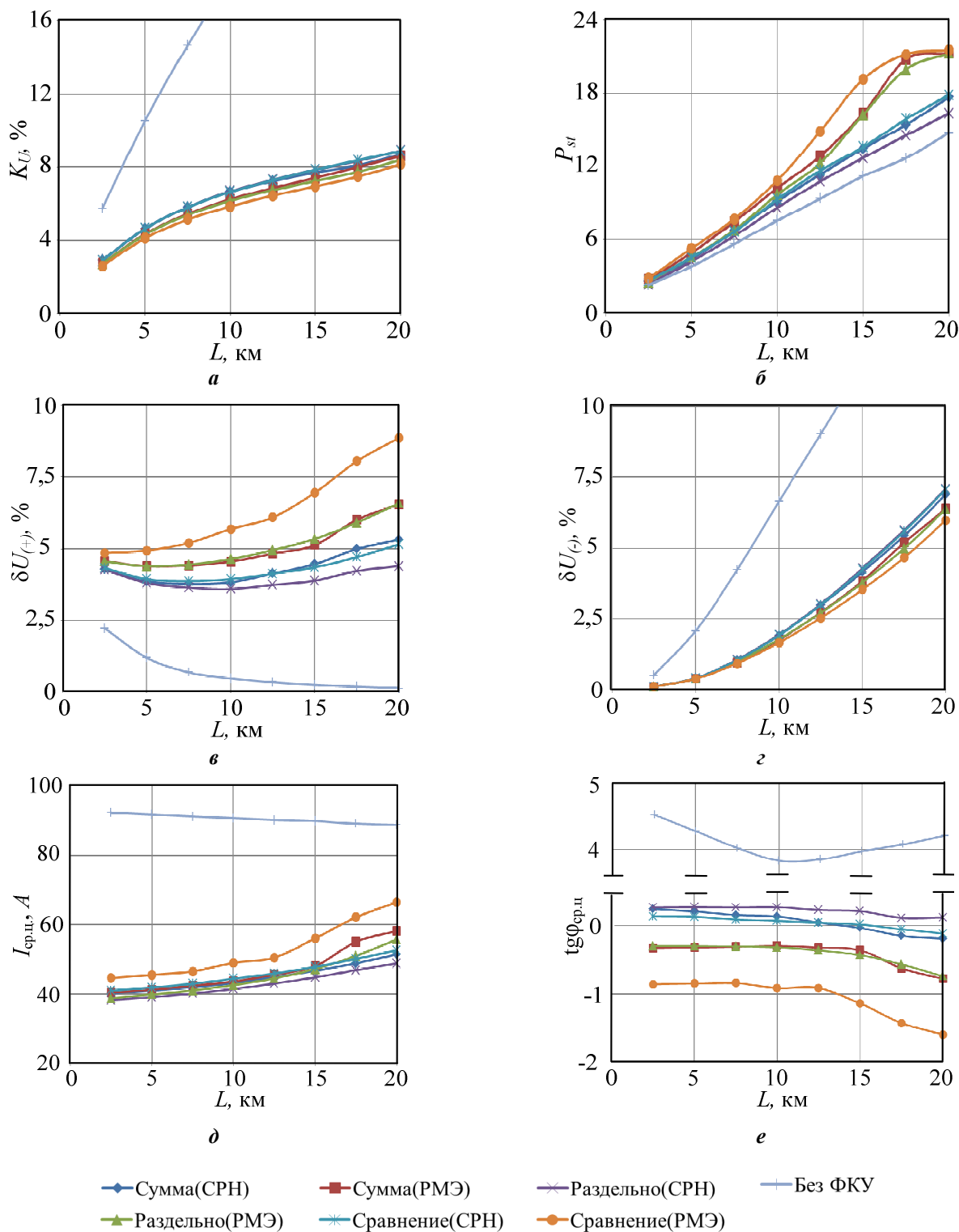


Рис. 10. Зависимости показателей ПКЭЭ и энергетических показателей экскаватора от длины питающей линии

Анализ гармонического состава тока и напряжения

	I_1, A	$I_{с\kappa\text{в}}, A$	ПКЭЭ								
			Нормируемые						Ненормируемые		
			$K_U, \%$	$K_{U(5)}, \%$	$K_{U(7)}, \%$	$\delta U_{(+)}, \%$	$\delta U_{(-)}, \%$	P_{st}	$K_I, \%$	$K_{I(5)}, \%$	$K_{I(7)}, \%$
ГОСТ	–	–	5(8)	4	3	10	10	1,38	-	-	-
РМЭ	17,1	3,83	6,85	0,18	0,27	4,82	2,73	12,86	22,29	3,10	2,67
Без ФКУ	92,5	10	21,84	3,73	4,04	0,35	9,02	9,35	10,81	5,48	3,14

Ненормируемые в [2] коэффициенты 5 и 7 гармоники тока при использовании ФКУ снизились соответственно в 1,76 и 1,17 раза. Следует отметить, что суммарный коэффициент несинусоидальности тока K_I , наоборот, вырос. Это связано с тем, что при включении ФКУ значительно уменьшается уровень первой гармоники, которая связана с коэффициентом K_I согласно формуле [9]:

$$K_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{40} I_{(n)}^2}}{I_{(1)}} = \frac{I_{с\kappa\text{в}}}{I_{(1)}}, \quad (10)$$

где $I_{с\kappa\text{в}}$ – среднеквадратичная сумма действующих значений высших гармоник тока, А; $I_{(1)}$ – действующее значение тока первой гармоники, А.

Следовательно, в нашем случае более рационально измерять не удельный вес гармонических составляющих, а их абсолютную величину ($I_{с\kappa\text{в}}$). Для этой цели с помощью разработанной модели произведена оценка значений $I_{с\kappa\text{в}}$ при отсутствии и наличии ФКУ, которые составили 10 и 3,83 А соответственно. То есть уровень гармоник тока снизился более чем в 2,5 раза.

ВЫВОДЫ

1. Разработана имитационная модель главных электроприводов экскаватора ЭКГ – 12К, позволяющая использовать реальные циклы экскавации и проводить оценку показателей качества и энергетики.

2. Доказана адекватность представленной модели путем сравнения реальных и модельных осциллограмм токов и напряжений двигателей.

3. Проведен анализ построения структур методов и способов управления экскаваторным ФКУ.

4. Проведен анализ методов управления по быстрейшему включению ступеней ФКУ. По результатам анализа выявлено, что метод ОСТ является менее предпочтительным. Время срабатывания ступеней ФКУ при методе СРН фактически не зависит от задания U^*z и длины линии. В методе РМЭ время срабатывания ступеней ФКУ зависит от U^*z . При U^*z менее половины от номинального метод является самым оптимальным.

5. Проведена оценка качества ЭЭ и энергетических показателей экскаватора при работе в цикле. При отсутствии ФКУ все показатели выходят за пределы допустимых значений. Экскаватор будет работать в аварийном режиме. Присутствие ФКУ значительно улучшает качество ЭЭ и при длинной линии только коэф-

фициент несинусоидальности K_U выходит за пределы ГОСТа. С ростом длины линии наименьший показатель $\delta U_{(+)}$ имеет метод РМЭ. Минимальную загрузку сети по среднеквадратичному току имеет метод СРН.

6. Кратковременная доза фликера в точке передачи ЭЭ (точка подключения экскаватора) для всех методов выходит за пределы [2]. Таким образом, не рекомендуется от экскаваторной линии запитывать помещения с потребителями, где предусмотрена зрительная работа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Энергетическая эффективность регулирования в тиристорных и транзисторных электроприводах экскаваторов / Микитченко А.Я., Шевченко А.Н., Бирюков Ю.А., Шестаков П.Р. // Горное оборудование и электромеханика. 2008. №5. С. 24–31.
2. ГОСТ 32144-2013. Межгосударственный стандарт. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 2013-03-25. М.: Стандартинформ, 2014. 20 с.
3. Греков Э.Л., Шевченко А.Н., Филимонов С.И. Исследование методов управления экскаваторным фильтро-компенсирующим устройством // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2014. №1. С. 196–203.
4. Электропривод экскаватора ЭКГ-5 по системе ТП-Д производства ОАО «Рудоавтоматика» / Сафoshин В.В., Микитченко А.Я., Шевченко А.Н., Шоленков А.Н., Щербак А.В., Шоков М.А. // Горное оборудование и электромеханика. 2009. №4. С. 16–22.
5. Филимонов С.И. Разработка модели двухступенчатого зависимого задатчика интенсивности в программном комплексе MATLAB // Universum: технические науки. 2016. №1(23). С. 2.
6. Шевырев Ю.В. Способы повышения электроэнергетических показателей электротехнических комплексов буровых установок с тиристорным электроприводом постоянного тока // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 2004. №6. С. 64–69.
7. Шевырева Н.Ю. Влияние на качество электроэнергии ступенчатого фильтро-компенсирующего устройства при работе буровых установок // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2015. №1. С. 408–415.
8. Жежеленко И.В., Саенко Ю.Л. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 2000. 252 с.
9. ГОСТ 30804.4.7-2013. Межгосударственный стандарт. Совместимость технических средств электромагнитная. Общее руководство по средствам измерений и измерениям гармоник и интергармоник для систем электроснабжения и подключаемых к ним технических средств. Введ. 2013-03-25. М.: Стандартинформ, 2013. 33 с.

Поступила в редакцию 27 апреля 2017 г.

INFORMATION IN ENGLISH

COMPARISON OF SHOVEL FILTER-COMPENSATING DEVICE CONTROL ALGORITHMS IN THE “THYRISTOR CONVERTER-MOTOR” ELECTRIC DRIVE SYSTEM

Eduard L. Grekov

Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Department of automated electric drive, electromechanical and electrical, Orenburg State University, Orenburg, Russia.

Sergey I. Filimonov S.I.

Assistant Professor, Shukhov Belgorod state technological university, Belgorod, Russia.

Modern shovel electric drive designed as “thyristor converter-motor” (TCM) system should be used along with a filter-compensating device (FCD). On the basis on the practical experience it was concluded that in terms of the applied scheme simplicity and reliability, step type FCD showed the best results on the quarry shovels. Usage of FCD provides the necessary quality of the electric energy and the power factor $\cos \varphi = 0.33 \div 0$. The imitation model in the complex *Matlab/Simulink* for the FCD control algorithms study and their influence on the electric energy quality measures was developed considering digital control system features realization and power part of the electric drives operation. The real graphs of the shovel EKG-12K operation were used as setting and disturbing signals. To confirm the relevance, real-life graphs were compared with the modeling results. Three main methods of the FCD activation control signal development were studied: by the electric drives reactive power, by the feedback signals of armature current and voltage regulators. Because the shovel electric drives are separated between the two power transformers with their own FCD, for each method there were suggested three ways to control them: separated and joint stage inclusion, by the maximal or the summary signal. Relationships for the task level and the length of the power line 6 kV for the time changing of the stage inclusion were received. The electric energy quality and energy measures were studied. Their dependence on the length of the power line was obtained.

Keywords: Filter-compensating device, dredge electric drive, thyristor converter.

REFERENCES

1. Mikitchenko A.Y., Shevchenko A.N., Biryukov U.A., Shestakov P.R. Energy efficiency regulation of thyristor and transistor drives of excavator. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika* [Mining equipment and electromechanics], 2008, no. 5, pp. 24–31. (In Russian)
2. State Standard 32144-2013. Interstate standard. Electric Energy. Compatibility of technical equipment. Electric power quality standards in public power-supply systems. Moscow, Standartinform Publ., 2014. 20 p. (In Russian).
3. Grekov E.L., Shevchenko A.N., Filimonov S.I. Dredge filter-compensating device operating method research. *Vestnik BGTU im. V.G. Shukhova* [Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov], 2014, no. 1, pp. 196–203. (In Russian)
4. Safoshin V.V., Mikitchenko A.Ya., Shevchenko A.N., Sholenikov A.N., Sherbakov A.V., Shokov M.A. Electric drive for excavator EKG-5 on the basis of thyristor converter - motor system produced by “Rudoavtomatika”. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika* [Mining equipment and electromechanics], 2009, no. 4, pp. 16–22. (In Russian)
5. Filimonov S.I. Two-stage dependent intensity regulator Model development in MATLAB. *Universum: tekhnicheskie nauki* [Universum: technical science], 2016, no. 1(23), pp. 2. (In Russian)
6. Shevrev Yu. V. Ways of increasing electric power indices of complex drilling rigs. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Geologiya i razvedka*. [News of higher educational institutions. Geology and exploration.], 2004, no. 6, pp. 64–69. (In Russian)
7. Shevrev N.Yu. Influence of multistage filter compensation device on energy quality during the operation of drill rigs with variable – frequency electric drive. *Gornyy informatsionno-analiticheskij byulleten' (nauchno-tekhnicheskij zhurnal)* [Mining information-analytical Bulletin (scientific and technical journal)], 2015, no.1, pp. 408–415.
8. Zhezhelentko I.V., Saenko Yu.L. *Pokazateli kachestva elektroenergii i ih kontrol na promyshlennnykh predpriyatiyakh* [Power Quality Ratings and Their Monitoring in Industrial Enterprises], 3rd ed., rev. and ext. Moscow, Energoatomisdat Publ., 2000. 252 p. (In Russian)
9. State Standard 30804.4.7-2013. Interstate standard. Compatibility of technical equipment. General guide on harmonics and interharmonics measurement and instrumentation, for power supply systems and equipment connected thereto. Moscow, Standartinform Publ., 2013. 33 p. (In Russian)

Греков Э.Л., Филимонов С.И. Сравнение алгоритмов управления экскаваторным фильтрокомпенсирующим устройством в системе электропривода «тиристорный преобразователь-двигатель» // Электротехнические системы и комплексы. 2017. № 2 (35). С. 25–34. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-2\(35\)-25-34](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-2(35)-25-34)

Grekov E.L., Filimonov S.I. Comparison of Shovel Filter-Compensating Device Control Algorithms in the “Thyristor Converter-motor” Electric Drive System. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2017, no. 2 (35), pp. 25–34. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-2\(35\)-25-34](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-2(35)-25-34)

ПРОБЛЕМЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ СКВАЖИННЫХ ШТАНГОВЫХ НАСОСОВ

Механизированная добыча нефти связана со значительным потреблением электроэнергии, при этом основными потребителями являются электроприводы скважинных насосов. В связи с нестабильностью цен на нефть добывающие предприятия вынуждены искать пути снижения затрат электроэнергии и повышения энергетической эффективности работы приводов скважинных насосов. В статье сделан анализ установки скважинного штангового насоса с точки зрения энергоэффективности, а также рассмотрено влияние на характеристики электродвигателя циклически изменяющейся нагрузки. В силу особенностей режима работы электродвигатель большую часть времени остается недогруженным, из-за чего ухудшаются его КПД и коэффициент мощности. Благодаря конструктивным особенностям установок скважинных штанговых насосов нагрузка на вал электродвигателя меняется внутри каждого цикла качания, соответственно изменяются также все его параметры. Поэтому для расчетов необходимо определить средние значения эффективной мощности, КПД и коэффициента мощности за цикл качания. Также потери в установках скважинных штанговых насосов зависят от степени уравновешенности противовесов. Если коэффициент неуравновешенности установки лежит в пределах от минус 5 до 5%, то потери мощности от несбалансированности можно не учитывать. При больших значениях коэффициента неуравновешенности потери мощности определяются по специальной зависимости и учитываются в общей мощности, потребляемой насосной установкой. В статье авторами предложена методика, позволяющая определить энергетические характеристики электропривода установки скважинного штангового насоса в условиях циклически изменяющейся нагрузки и недостаточной уравновешенности. Предложены аналитические зависимости, для определения эксплуатационных значений КПД и коэффициента мощности $\cos\varphi$ при циклическом нагружении. При помощи данных расчетов могут быть оптимизированы режимы работы электроприводов насосных установок, что позволит снизить удельное потребление электроэнергии при насосной добыче нефти и уменьшить затраты нефтедобывающих предприятий на приобретение электроэнергии.

Ключевые слова: нефтяная скважина, насос, электропривод, асинхронный электродвигатель, станок-качалка, потребление электроэнергии, энергетическая эффективность, эффективная мощность, циклическая нагрузка, коэффициент неуравновешенности, ваттметр-программа.

ВВЕДЕНИЕ

Использование скважинных штанговых насосов (СШН) является одним из основных способов механизированной добычи нефти. В нашей стране установками СШН оснащено около 40% скважин, которые обеспечивают до 20% всей добываемой нефти [1]. На месторождениях США и Канады использование СШН является доминирующим способом эксплуатации нефтедобывающих скважин [2].

Хотя в последние годы доля использования СШН при добыче нефти снижается, уступая место более производительным погружным электроцентробежным насосам, данный способ эксплуатации будет еще долго применяться благодаря таким достоинствам, как более высокий КПД насосной установки в целом, меньшие удельные затраты электроэнергии на добычу скважинного флюида, использование для привода электродвигателей (ЭД) в общепромышленном исполнении, а также возможность применения в осложненных условиях – в пескопроявляющих скважинах, при наличии в добываемой нефти парафина, при высоком газовом факторе, при откачке коррозионной жидкости [3].

СТРУКТУРА ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА УСТАНОВКИ СШН

Упрощенная схема установки СШН приведена на рис. 1. Весь комплекс оборудования состоит из поверхностной и погружной подсистем. Поверхностная подсистема включает в себя станцию управления 1, ЭД 2, редуктор 3, кривошипно-шатунный механизм 4; балансир 5. Погружная подсистема состоит из колонны штанг 6 и СШН 7.

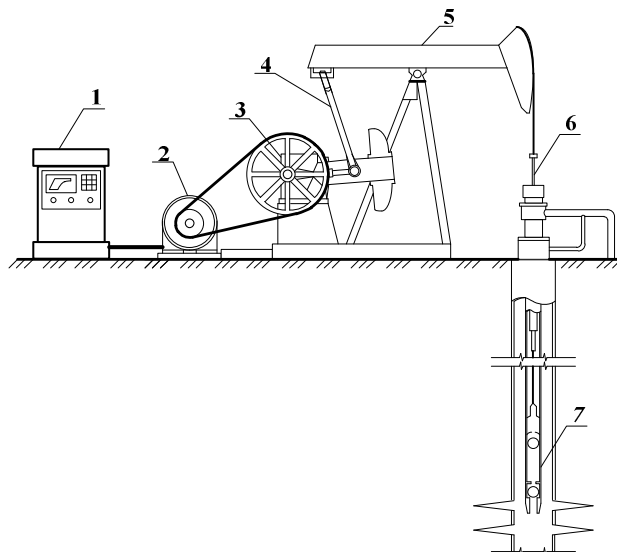


Рис. 1. Упрощенная схема установки СШН:
1 – станция управления; 2 – ЭД; 3 – редуктор;
4 – кривошипно-шатунный механизм;
5 – балансир; 6 – колонна штанг; 7 – СШН

Для привода установок СШН используются низкооборотные трехфазные асинхронные ЭД напряжением 0,4 кВ мощностью до 55 кВт с повышенным пусковым моментом серий АИР, 5А и других. Следует отметить, что в эксплуатации находится большое количество морально и физически устаревших ЭД серий АОП, АО2, АОП2, 4А, 3А, а также ЭД зарубежного производства. Синхронная частота вращения составляет 500, 750, 1000 или 1500 об/мин [4].

Проблемы невысоких энергетических характеристик электроприводов установок СШН связаны прежде всего с режимами работы, обусловленными технологическими особенностями: циклически изменяющимся характером нагрузки, необходимостью большого запаса по мощности, в результате чего большую часть времени ЭД остается недогруженным [5], снижением общего КПД установки из-за большого количества промежуточных элементов между ЭД и насосом, в каждом из которых происходят потери энергии.

Значительный запас мощности необходим для обеспечения пуска в ход установки СШН, особенно в зимних условиях. В результате после запуска установки ЭД работает недогруженным с пониженными значениями КПД и коэффициента мощности $\cos \varphi$ [6].

Большое количество промежуточных элементов между ЭД и насосом обусловлено необходимостью преобразовать быстрое вращение вала электродвигателя в медленное возвратно-поступательное движение колонны штанг. Для этого использовано последовательное соединение таких элементов, как клиноременная передача, редуктор, кривошипно-шатунный механизм, балансир, канатная подвеска и колонна штанг. В настоящее время появились новые механизмы приводов СШН, например, цепные и линейные приводы, обеспечивающие более высокий КПД при передаче энергии от ЭД до насоса [7]. Однако значительная часть действующего фонда скважин оснащена традиционными станками-качалками (СК), менять которые в настоящих экономических условиях у нефтедобывающих предприятий нет возможности.

Циклический характер нагрузки обусловлен принципом работы СШН и кинематикой станка-качалки. Для выравнивания нагрузки внутри цикла качания применяют уравнивающие грузы, но точно сбалансировать установку СШН достаточно сложно, что вызывает дополнительные потери электроэнергии [8].

Эксплуатация скважин с высоковязкой продукцией также сопровождается дополнительными потерями электроэнергии [9].

ВЛИЯНИЕ ЦИКЛИЧЕСКОГО ХАРАКТЕРА НАГРУЗКИ НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭД ПРИВОДА УСТАНОВКИ СШН

Расчет потерь в ЭД установки СШН осложняется тем, что нагрузка является циклически изменяющейся в каждом цикле качания, соответственно все параметры ЭД, в том числе КПД и коэффициент мощности $\cos \varphi$, также изменяются внутри каждого цикла качания [10]. Пример изменения потребляемой ЭД активной мощности за один цикл качания (ваттметрограмма $P=f(t)$) показан на **рис. 2**. Первая половина графика (до 8,5 с) соответствует движению плунжера насоса вверх, то есть подъему скважинной жидкости, а вторая (после 8,5 с) – спуску колонны штанг и плунжера насоса (при этом происходит подъем противовесов с накоплением потенциальной энергии, которая будет использована в следующем цикле качания для подъема продукции скважины).

Видно, что в течение одного цикла качания потребляемая активная мощность изменяется от нулевого значения до 16 кВт, но даже на этом пике установленный ЭД номинальной мощностью 30 кВт остается недогруженным.

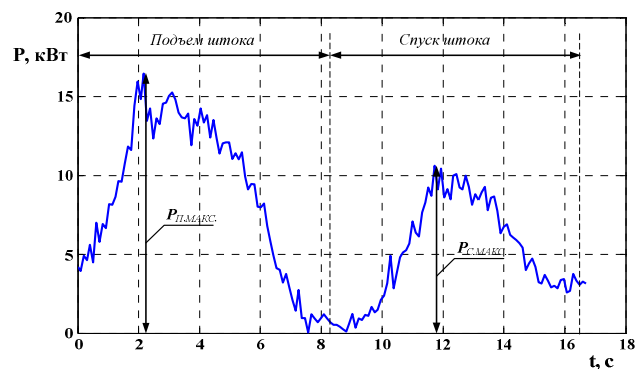


Рис. 2. График изменения потребляемой ЭД активной мощности за один цикл качания

Неравенство пиковых значений мощности при подъеме и спуске колонны штанг $P_{П.МАКС.}$ и $P_{С.МАКС.}$ свидетельствует о недостаточном уравнивании установки СШН [11].

Даже при идеальном уравнивании установки СШН график нагрузки двигателя остается неравномерным. Вследствие этого КПД и $\cos \varphi$ асинхронного двигателя снижаются против значений, соответствующих постоянной нагрузке. При этом КПД двигателя становится ниже номинального даже при условии равенства номинальной мощности P_n среднеквадратичной мощности нагрузки P_{Σ} .

При работе двигателя с периодически меняющейся нагрузкой его КПД и $\cos \varphi$ зависят от коэффициента формы нагрузочной кривой K_f и, соответственно, от КПД и $\cos \varphi$ при постоянной во времени нагрузке [12]. При ухудшении уравнивания увеличивается значение коэффициента формы нагрузочной кривой K_f , что приводит к дополнительному снижению КПД двигателя. Недогрузка двигателя по нагреву, то есть работа при $P_{\Sigma} < P_n$, еще больше снижает его КПД и $\cos \varphi$.

При переменной циклической нагрузке КПД двигателя привода СК за цикл качания определяется равенством [13]

$$\eta_{\Sigma} = \frac{P_{cp}}{P_{cp} + \Delta P}, \quad (1)$$

где P_{cp} – среднее значение мощности на валу двигателя за цикл; ΔP – среднее значение потерь мощности в двигателе за цикл.

Эквивалентная (среднеквадратичная) мощность двигателя P_{Σ} должна быть меньше номинальной мощности P_n , то есть удовлетворять условию $P_n \geq P_{\Sigma}$.

Соответствующий эквивалентной мощности КПД η_{Σ} определяется по рабочим характеристикам ЭД (**рис. 3**).

Выражение (3) показывает, что КПД двигателя за цикл качания η_{Σ} тем сильнее зависит от коэффициента формы нагрузочной кривой, чем меньше η_{Σ} .

Эксплуатационный коэффициент мощности при циклической нагрузке $\cos \varphi_{\Sigma}$ определяется из выражения

$$\cos \varphi_{\Sigma} = \frac{P_{1cp}}{\sqrt{3}U_1 I_{1\phi}}, \quad (4)$$

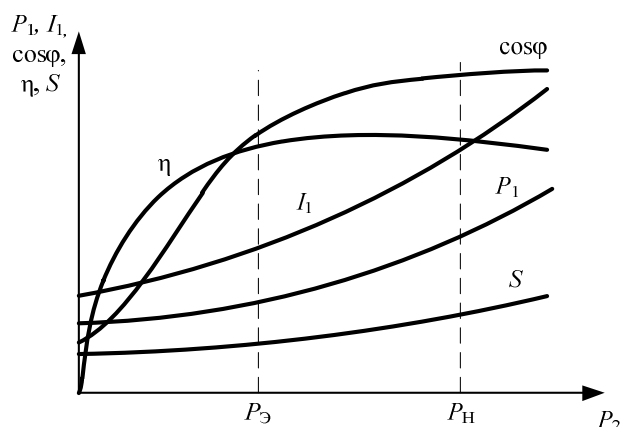


Рис. 3. Рабочие характеристики ЭД

где P_{1cp} – средняя активная мощность, потребляемая трехфазным двигателем из сети за цикл нагрузки, Вт; I_{13} – среднеквадратичное за цикл нагрузки значение тока статора двигателя, А; U_1 – линейное напряжение сети, В.

Учитывая равенство

$$P_{1cp} = \frac{P_{cp}}{\eta_{\Sigma}} = \frac{P_3}{K_{\Phi} \eta_{\Sigma}}, \quad (5)$$

получаем

$$\cos \varphi_{\Sigma} = \frac{P_3}{K_{\Phi} \eta_{\Sigma} \sqrt{3} U_1 I_{13}}. \quad (6)$$

Коэффициент мощности при постоянной нагрузке, равной среднеквадратичной, за цикл

$$\cos \varphi_3 = \frac{P_3}{\eta_3 \sqrt{3} U_1 I_{13}}. \quad (7)$$

Из выражений (6) и (7)

$$\cos \varphi_{\Sigma} = \cos \varphi_3 \eta_3 / (K_{\Phi} \eta_{\Sigma}). \quad (8)$$

При замене η_{Σ} его выражением из (2)

$$\cos \varphi_{\Sigma} = \cos \varphi_3 \left(\frac{\eta_3}{K_{\Phi}} - \eta_3 + 1 \right). \quad (9)$$

При помощи формул (3) и (9) можно вычислить значения η_{Σ} и $\cos \varphi_{\Sigma}$ в зависимости от коэффициента формы кривой нагрузки K_{Φ} для различной загрузки двигателя P_3 , определяемой коэффициентом загрузки:

$$K_3 = P_3 / P_{\Sigma}. \quad (10)$$

От величины коэффициента загрузки K_3 зависят η_3 и $\cos \varphi_3$ данного двигателя. Известно, что чем лучше уравновешен станок-качалка, тем меньше значение коэффициента формы K_{Φ} .

Мощность, потребляемая ЭД, а следовательно, и всей установкой СШН из сети, будет зависеть от КПД при циклической нагрузке:

$$P_{\Sigma} = P_3 / \eta_{\Sigma}. \quad (11)$$

ВЛИЯНИЕ СБАЛАНСИРОВАННОСТИ УСТАНОВКИ СШН НА ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЕ ПРИВОДА

Принцип действия приводов СШН таков, что при отсутствии уравновешивания первую половину периода качания, при ходе колонны штанг вверх, к ЭД прикладывается нагрузка, обеспечивающая подъем самой колонны и скважинной жидкости. Спуск колонны штанг же происходит под собственным весом, и ЭД переходит в генераторный режим. Такой неравномерный режим работы ЭД приводит к ухудшению энергетических характеристик самого двигателя, а также отрицательно влияет на сеть [14].

С целью минимизации такого эффекта на станках-качалках используют уравновешивающие грузы, располагаемые на кривошипе или на задней части балансира. Таким образом, когда колонна штанг опускается вниз, уравновешивающие грузы поднимаются вверх и наоборот. Этим догружают ЭД при спуске колонны и частично разгружают при подъеме.

Оценивают уравновешенность привода СШН при помощи коэффициента неуравновешенности:

$$K_H = \frac{(P_{\Sigma \text{ макс}} - P_{\Sigma \text{ мин}})}{(P_{\Sigma \text{ макс}} + P_{\Sigma \text{ мин}})} \cdot 100\%, \quad (12)$$

где $P_{\Sigma \text{ макс}}$, $P_{\Sigma \text{ мин}}$ – соответственно максимальные значения активной мощности при подъеме и спуске колонны штанг, определяемые по ваттметрограмме $P=f(t)$ (см. рис. 2).

Авторами были проведены исследования, позволившие выявить взаимосвязь между коэффициентом неуравновешенности и дополнительными потерями мощности [8]. График зависимости дополнительных потерь мощности представлен на рис. 4.

В соответствии с полученной зависимостью, если коэффициент неуравновешенности K_H лежит в пределах от минус 5 до 5%, то потери мощности от несбалансированности можно не учитывать. При больших значениях коэффициента неуравновешенности K_H потери мощности $\Delta\%$ определяются по графику (см. рис. 4) и учитываются в общей мощности, потребляемой установкой СШН [8]. Тогда суммарные потери мощности в электроприводе определяются по формуле

$$P_{\Sigma} = \frac{P_3}{\eta_{\Sigma}} \cdot \left(1 + \frac{\Delta\%}{100} \right). \quad (13)$$

Таким образом, чтобы учесть дополнительные потери от неуравновешенности установки, следует по ваттметрограмме (см. рис. 2) определить максимальные значения активной мощности при подъеме и спуске колонны штанг, найти по (12) коэффициент неуравновешенности K_H , затем по графической зависимости (см. рис. 4) определить дополнительные потери и по (13) вычислить суммарные потери мощности P_{Σ} .

ПРИМЕР ОЦЕНКИ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИВОДА УСТАНОВКИ СШН

В рамках проведения данного исследования был произведен анализ энергопотребления установки СШН для нефтедобывающей скважины одного из месторождений Западной Сибири, параметры которой приведены в таблице.

Исходные данные по скважине

Параметр	Значение
Глубина скважины, м	1300
Динамический уровень, м	440
Тип насоса	НН-44
Число качаний в минуту	5,95
Ход штока, м	1,2
Мощность ЭД, кВт	30
Средний cos φ	0,38
Небаланс, %	62,11
Объемный дебит по жидкости, м ³ /сут	23
Массовый дебит по нефти, т/сут	9,8

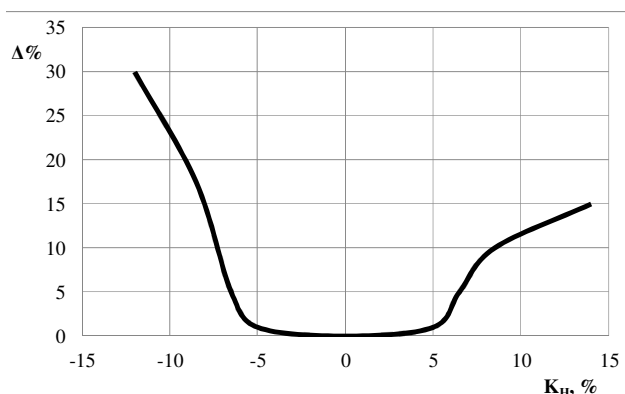


Рис. 4. Зависимость дополнительных удельных потерь электроэнергии от коэффициента неуравновешенности установки СШН

Удельное энергопотребление для данной скважины составляло 8,76 кВт·ч/м³ скважинной жидкости.

В результате анализа было установлено, что мощность, потребляемая СК от ЭД, составляет 3,94 кВт, и ЭД загружен на 13%. Значительные дополнительные потери (до 60%) обусловлены плохой балансировкой противовесов СК.

Скважина эксплуатируется в неэкономичном режиме: с высокой частотой качаний (6 качаний в минуту) и малым ходом штока (1,2 м). Такой же отбор жидкости может быть обеспечен при более экономичном режиме: с меньшей частотой качаний и большим ходом штока.

Для данной скважины был разработан ряд оптимизационных мероприятий:

- 1) замена ЭД мощностью 30 кВт на ЭД меньшей мощности – 22 кВт;
- 2) балансировка противовесов СК, после чего небаланс снизился до 5%;
- 3) корректировка режима эксплуатации скважины (3,6 качаний в минуту, ход штока 2,0 м).

В результате внедрения данных оптимизационных мероприятий дебит скважины остался на прежнем уровне – 23 м³/сут, в то время как удельное энергопотребление снизилось до 6,45 кВт·ч/м³, то есть на 27%. По имеющейся у авторов информации при эксплуатации до 95–98% скважин, оснащенных СШН, имеют место непродуктивные потери электроэнергии, в среднем их энергопотребление может быть сокращено на 15–20% без снижения объемов добываемой жидкости.

В современных экономических условиях проблемы обеспечения энергоэффективности скважинных насосов для добычи нефти приобретают особую актуальность, так как стоимость электроэнергии является одной из основных составляющих в себестоимости добываемого углеводородного сырья [15, 16].

В статье авторами предложена методика, позволяющая определить энергетические характеристики ЭД привода установки СШН в условиях циклически изменяющейся нагрузки и недостаточной уравнированности. Предложены аналитические зависимости, позволяющие определить эксплуатационные значения КПД и коэффициента мощности cosφ для ЭД при циклическом нагружении. Также рассмотрено влияние на потребляемую мощность сбалансированности установок СШН.

При помощи данных расчетов могут быть оптимизированы режимы работы электроприводов установок СШН, что позволит снизить удельное потребление электроэнергии при насосной добыче нефти и уменьшить затраты нефтедобывающих предприятий на приобретение электроэнергии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хакимьянов М.И. Повышение энергетической эффективности скважинных насосов механизированной добычи нефти // Энергетик. 2016. № 5. С. 36–38.
2. Семисынов Р.А., Киселев Е.С., Хакимьянов М.И. Анализ потерь энергии в технологических элементах установок скважинных нефтедобывающих насосов // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2015. №6. С. 179–198. URL: http://ogbus.ru/issues/6_2015/ogbus_6_2015_p179-198_SemisynovRA_ru_en.pdf (дата обращения: 13.12.2016).
3. Хакимьянов М.И. Современные станции управления скважинными штанговыми глубиннонасосными установками // Нефтегазовое дело. 2014. Т. 12. №1. С. 78–85.
4. Меньшов Б.Г., Ершов М.С., Яризов А.Д. Электротехнические установки и комплексы в нефтегазовой промышленности: учебник для вузов. М.: ОАО «Издательство «Недра», 2000. 487 с.
5. Мугалимов Р.Г., Закирова Р.А., Мугалимова А.Р. Энергоэффективные асинхронные двигатели, технико-экономические преимущества и оптимизация себестоимости их создания // Электротехнические системы и комплексы. 2016. № 2(31). С. 30–34.
6. Хакимьянов М.И., Хусаинов Ф.Ф., Шафиков И.Н. Зависимость энергопотребления штанговых глубинных насосов от технологических параметров скважин // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2015. №1. С. 533–563. URL: http://ogbus.ru/issues/1_2015/ogbus_1_2015_p533-563_KhakimyanovMI_ru_en.pdf (дата обращения: 13.12.2016).
7. Пачин М.Г., Хакимьянов М.И. Интеллектуальные решения для нефтедобычи – станции управления штанговыми насосами ОАО «ПНППК» // Бурение и нефть. 2014. №9. С. 58–62.
8. Хакимьянов М.И. Удельный расход электроэнергии при механизированной добыче нефти штанговыми глубиннонасосными установками // Вестник УГАТУ. 2014. Т. 18, № 1(62). С. 124–130.
9. Современные технологии добычи высоковязких нефтей / Конесев С.Г., Хакимьянов М.И., Хлюпин П.А., Кондратьев Э.Ю. // Электротехнические системы и комплексы. 2013. № 21. С. 301–307.
10. Хакимьянов М.И., Сираев Р.М., Крылов А.О. Исследование влияния на энергопотребление скважинных насосов технологических и эксплуатационных параметров //

- Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2015. Т. 11. №1. С. 15–20.
11. Исаченко И.Н., Гольдштейн Е.И., Налимов Г.П. Методы контроля сбалансированности станка-качалки на основе измерения электрических параметров // Нефтяное хозяйство. 2002. № 1. С. 60–61.
 12. Мищенко И.Т. Скважинная добыча нефти: учеб. пособие для вузов. М.: ФГУП Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2003. 816 с.
 13. Справочное руководство по проектированию и эксплуатации нефтяных месторождений. Добыча нефти / Р.С. Андриасов, И.Т. Мищенко, А.И. Петров и др.; под общ. ред. Ш.К. Гиматулинова М.: Недра, 1983. 455 с.
 14. Бубнов М. В., Зюзев А.М. Средства диагностирования оборудования установок штанговых глубинных насосов // Труды первой научно-технической конференции молодых ученых Уральского энергетического института. Екатеринбург, 2016. С. 175–178.
 15. Системы управления для интеллектуальных скважин, эксплуатируемых глубиннонасосным способом / Миловзоров Г.В., Хакимьянов М.И., Редькина Т.А., Миловзоров А.Г. // Интеллектуальные системы в производстве. 2015. №1. С. 55–58.
 16. Садов В. Б. Формирование ограничений при управлении приводом штангового глубинного насоса // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2014. Т. 14. №. 2. С. 47–51.

Поступила в редакцию 16 января 2017 г.

INFORMATION IN ENGLISH

PROBLEMS OF IMPROVING THE ENERGY CHARACTERISTICS OF DOWNHOLE SUCKER ROD PUMP ELECTRIC DRIVES

Marat I. Khakimyanov

Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Ufa State Petroleum Technological University.

Fanur F. Khusainov

Postgraduate Student, Ufa State Petroleum Technological University.

Igor N. Shafikov

Postgraduate Student, Ufa State Petroleum Technological University.

Mechanized oil production is associated with significant power consumption. The main consumers are well pump electric drives. Due to volatile oil prices, producing companies are forced to look for ways to reduce energy costs and increase energy efficiency of well pump drives. The authors carried out the analysis of downhole sucker rod pump unit from the point of view of energy efficiency and considered the dependence of motor characteristics on cyclic loading. A well pump motor remains underloaded most of the time. Low loading impairs the efficiency and power factor. Thanks to the design features of the downhole sucker rod pump units, the load on the motor shaft varies within each swing cycle. All the parameters also change. Therefore, to perform the calculations, we need to determine the average values of effective power, efficiency and power factor of the swing cycle. Losses of the downhole sucker rod pump units also depend on the degree of balance counterweights. If the unbalance ratio of a pump unit ranges from -5% to + 5%, the power loss of the imbalance can be ignored. For large values of the unbalance factor, the power losses are determined by the graph and taken into account in the overall power consumption of the pump unit. The authors proposed the method, which makes it possible to determine the energy characteristics of the downhole sucker rod pump unit electric drive in the cyclically varying load conditions and a lack of balance. The authors also proposed analytical dependences for determining the operational efficiencies and power factor under cyclic loading. Operation modes of pump unit drives can be optimized and it will reduce specific energy consumption for pumping oil production.

Keywords: Oil well, pump, electric drive, induction motor, sucker rod pump unit, power consumption, energy efficiency, effective power, cyclic load, unbalance factor, wattmeter card.

REFERENCES

1. Khakimyanov M.I. Increasing the energy efficiency of downhole pump of artificial lift. *Energetik*. 2016, no. 5, pp. 36–38. (In Russian)
2. Semisynov R.A., Kiselev Y.S., Khakimyanov M.I. Analysis of energy losses in the technological elements of well oil-extracting pump units. *Oil and Gas Business: electronic scientific journal*. 2015, no. 6, pp. 179–198. Available at: http://ogbus.ru/issues/6_2015/ogbus_6_2015_p179-198_SemisynovRA_ru_en.pdf (Accessed: 13.12.2016). (In Russian)
3. Khakimyanov M.I. Modern control stations of sucker rod pump units. *Oil and Gas Business*. 2014, vol. 12, no. 1, pp. 78–85. (In Russian)
4. Menshov B.G., Yershov M.S., Yarizov A.D. *Elektrotekhnicheskiye ustanovki i komplekсы v neftegazovoy promyshlennosti: Ucheb. dlya vuzov* [Electrical installations and facilities in the oil and gas industry: textbook for high schools]. Moscow: JSC Publishing House "Nedra", 2000. 487 p. (In Russian)
5. Mugalimov R.G., Zakirova R.A., Mugalimova A.R. Energy Efficient Asynchronous Motors, their Technical and Economic Advantages and Cost Optimization of their Development. *Electrotechnical systems and complexes*. 2016, no. 2(31), pp. 30–34.
6. Khakimyanov M.I., Khusainov F.F., Shafikov I.N. Technological parameters influence of oil wells on energy consumption of sucker rod pumps. *Oil and Gas Business: electronic scientific journal*. 2015, no. 1, pp. 533–563. Available at: http://ogbus.ru/issues/1_2015/ogbus_1_2015_p533-563_KhakimyanovMI_ru_en.pdf (Accessed: 13.12.2016).
7. Pachin M.G., Khakimyanov M.I. Intelligent solutions for oil production – sucker rod pump control station of "PNPPK". *Burenije i nefь*. 2014, no. 9, pp. 58–62. (In Russian)
8. Khakimyanov M.I. Energy intensity in artificial lift of sucker rod pumping units. *Vestnik UGATU*. 2014, vol. 18, no. 1(62), pp. 124–130.
9. Konesev S.G., Khakimyanov M.I., Khlyupin P.A., Kondratyev E.Yu. Modern technologies of hi-viscous oil production. *Electrotechnical systems and complexes*. 2013, no. 21, pp. 301–307. (In Russian)
10. Khakimyanov M.I., Siraev R.M., Krylov A.O. The influ-

- ence of well pump technological and operational parameters on energy consumption. *Jelektrotehnicheskie i informacionnye komplekсы i systemy*. 2015, vol. 11, no. 1, pp. 15–20. (In Russian)
11. Isachenko I.N., Goldshteyn Ye.I., Nalimov G.P. Methods of controlling the balance of pumping unit based on the measurement of electrical parameters. *Neftyanoye khozyaystvo*. 2002, no. 1, pp. 60–61.
 12. Mishchenko I.T. *Skvazhinnaya dobycha nefii: Uchebnoye posobiye dlya vuzov* [Downhole oil production: A manual for universities]. Moscow: "Oil and Gas", 2003. 816 p. (In Russian)
 13. Gimatudinova Sh.K., Andriasov R.S., Mishchenko I.T. *Spravochnoye rukovodstvo po proyektirovaniyu i ekspluatatsii neftyanykh mestorozhdeniy. Dobycha nefii* [Reference Manual for the design and operation of oil fields. Oil production: A manual for universities]. Moscow: "Nedra", 1983. 455 p. (In Russian)
 14. Bubnov M. V., Zyuzev A.M. Equipment diagnosis means for sucker rod pumps. *Proceedings of the first scientific and technical conference of young scientists of the Ural Energy Institute*. Ekaterinburg: Ural Federal University, 2016, pp. 175–178. (In Russian)
 15. Milovzorov G.V., Khakimyanov M.I., Redkina T.A., Milovzorov A.G. Control system for intelligent oil wells operated by downhole method. *Intellektualnyye systemy v proizvodstve*. 2015, no. 1, pp. 55–58. (In Russian)
 16. Sadv V.B. Setting constraints in the control process of a sucker-rod pumping unit drive. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Kompyuternyye tekhnologii, upravleniye, radioelektronika*. 2014, vol. 14, no. 2, pp. 47–51. (In Russian)

Хакимьянов М.И., Хусаинов Ф.Ф., Шафиков И.Н. Проблемы повышения энергетических характеристик электроприводов скважинных штанговых насосов // *Электротехнические системы и комплексы*. 2017. № 2 (35). С. 35–40. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-2\(35\)-35-40](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-2(35)-35-40)

Khakimyanov M.I., Khusainov F.F., Shafikov I.N. Problems of Improving the Energy Characteristics of Downhole Sucker Rod Pump Electric Drives. *Elektrotehnicheskie systemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2017, no. 2 (35), pp. 35–40. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-2\(35\)-35-40](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-2(35)-35-40)

Якимов И.А.

ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)»

ОБОСНОВАНИЕ ТИРИСТОРНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРА ДУГОВОЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ

Рассмотрена силовая схема соединения обмоток трансформатора дуговой сталеплавильной печи рабочим объемом 180 т (ДСП-180) ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (ОАО «ММК»). Показано, что печной трансформатор представляет собой сложный агрегат, состоящий из трех электромагнитных единиц, а именно: реактора с железным сердечником, главного и вольтодобавочного трансформаторов. В свою очередь, главный трансформатор является трехобмоточным с возможностью регулирования напряжения под нагрузкой в третичной обмотке. Дана краткая характеристика системы управления электротехнологическим режимом ArCOS. Система осуществляет воздействие на гидравлическую систему регулирования положения электродов и переключение ступеней устройств регулирования напряжения под нагрузкой (РПН) трансформатора и реактора. Показано, что ухудшение качества управления и снижение надежности ДСП связаны с низким быстродействием системы. Представлены осциллограммы тока дуги при переключениях ступеней напряжения трансформатора, подтвердившие наличие продолжительных пауз при каждой коммутации. Это приводит к потере контроля над режимом плавки. Вторым недостатком исполнительных элементов системы ArCOS является низкое быстродействие, связанное с инерционностью гидравлической системы перемещения электродов. Представлены осциллограммы переходных процессов при различной настройке регулятора импеданса, подтвердившие данный вывод. В качестве перспективного направления отмечена разработка силовых схем печных трансформаторов с бесконтактным регулированием напряжения. Рассмотрена предложенная силовая схема трансформатора с тиристорным регулированием напряжения в третичной обмотке, реализующая известную концепцию регулирования напряжения ДСП с высокой динамикой. Представлены результаты исследований, выполненных методом математического моделирования, подтвердившие реализуемость плавного регулирования напряжения в заданном диапазоне. Дана оценка возможностей предложенной схемы в отношении регулирования основных режимных координат при установленных соотношениях напряжений и мощностей главного и вольтодобавочного трансформаторов. Обозначены направления дальнейшего повышения быстродействия системы управления электрическим режимом ДСП.

Ключевые слова: дуговая сталеплавильная печь, электропечной трансформатор, силовая схема, устройство регулирования напряжения, гидравлическая система перемещения электродов, управление, быстродействие, исследования, бесконтактное регулирование, тиристорный регулятор напряжения, разработка.

ВВЕДЕНИЕ

Дуговая сталеплавильная печь является несимметричной, нелинейной нагрузкой с резкопеременным характером потребления электрической энергии. Существуют различные варианты регулирования напряжения печных трансформаторов. Для ДСП сверхвысокой мощности оптимальной является схема регулирования напряжения с использованием вольтодобавочного трансформатора [1]. На **рис. 1** представлены упрощенная силовая схема и схема соединения обмоток печного трансформатора ДСП-180. Печной трансформатор (ПТ) представляет собой трансформаторный агрегат номинальной мощностью 150 МВА, состоящий из трех активных единиц (**рис. 1, а**):

- главного трансформатора (ГТ) номинальной мощностью 123 МВА;
- вольтодобавочного трансформатора (ВДТ) номинальной мощностью 32 МВА;
- реактора (Р).

Главный трансформатор представляет собой трехобмоточный агрегат с возможностью регулирования напряжения под нагрузкой в третичной обмотке. Вольтодобавочный трансформатор – это двухобмоточный агрегат, который выполняет регулировочную функцию. Первичная обмотка высокого напряжения (ОВН) соединена по схеме «треугольник» с целью исключения попадания в питающую сеть гармоник, кратных трем (**рис. 1, б**). Вторичная обмотка низкого напряжения (НН) состоит из двух последовательно соединенных подобмоток: вторичной обмотки ГТ (НН_{ГТ}) и вторичной обмотки ВДТ (НН_{ВДТ}), которые образуют вторичную обмотку всего ПТ. Третичная обмотка выпол-

нена по схеме «звезда с заземленной нейтралью». Это обеспечивает более простое конструктивное исполнение контактного устройства РПН. Первичная обмотка ВДТ также соединена по схеме «звезда с заземленной нейтралью».

Регулирование напряжения и индуктивности реактора в современных ПТ осуществляют в третичной обмотке. Это является компромиссным решением между подключением к высоковольтной первичной либо силовоточной вторичной обмоткам. В данном варианте напряжение в третичной обмотке ниже первичного, а ток меньше вторичного. Такая схема регулирования представлена на **рис. 1, б**. Она была разработана фирмой SIEMENS в 1966 г. и впервые апробирована на ДСП металлургических заводов в Европе и Японии [2, 3].

Представленная схема нашла широкое применение на печах высокой и сверхвысокой мощностей. В ней устройство РПН установлено в промежуточном контуре между ГТ и ВДТ. Величина напряжения в этом контуре выбирается на среднем уровне по отношению к стороне высокого напряжения. С целью уменьшения габаритов и веса трансформатора, а также уменьшения разрывной мощности контактора, регулирование напряжения под нагрузкой осуществляется в двух диапазонах с использованием одной и той же регулировочной обмотки (РО). За счет этого осуществляется реверс вторичного напряжения ВДТ. В результате обеспечиваются широкий диапазон и глубина регулирования. Такой принцип регулирования используется в трансформаторе ДСП-180 электросталеплавильного цеха ОАО «ММК».

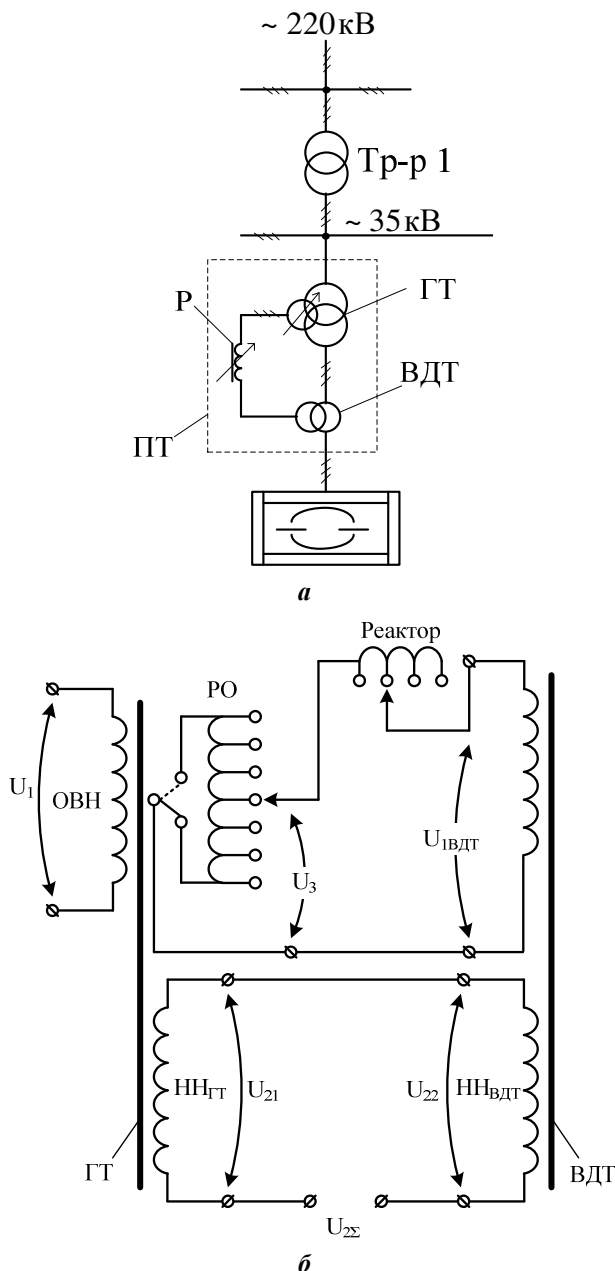


Рис. 1. Однолинейная схема (а) и схема подключения обмоток и РПН (б) печного трансформатора ДСП-180

Управление электрическим режимом ДСП-180 осуществляется интеллектуальной системой управления электродами ArCOS, функциональная схема и принцип работы которой рассмотрены в [4, 5]. Регулирование мощности ДСП осуществляется по двум каналам: воздействием на гидравлическую систему положения электродов и переключением ступеней устройств РПН трансформатора и реактора. Очевидно, что от быстродействия данных каналов зависит управляемость процесса и, в конечном счете, качество ведения плавки. Вместе с тем опыт эксплуатации ДСП позволяет сделать вывод о недостаточном быстродействии регулирования. Это приводит к появлению бестоковых пауз, продолжительность которых может составлять от 5 до 10% времени плавки. Такое положение не может считаться удовлетворительным, т.к. в течение этого времени технологический процесс неуправляем.

С целью повышения эффективности ДСП необходимо решить две взаимосвязанные задачи: сокращение вре-

мени переключения контактов РПН и обеспечение надежности работы печного трансформатора. Повышение быстродействия, а также необходимый диапазон регулирования вторичного напряжения могут быть обеспечены в схемах с бесконтактным регулированием в третичной обмотке на основе однооперационных тиристоров [6].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Сложная конструкция печного трансформатора приводит к нарушениям его работы и внеплановым остановкам технологического агрегата. Актуальность повышения надежности ПТ ДСП-180 исследована, результаты представлены в [7–10]. В [11, 12] показано, что частыми причинами аварийных отключений являются повреждения РПН. Кроме того, возникают неисправности, вызванные повышенными вибрациями, увеличением концентраций горючих газов, разрядными явлениями. Это повышает вероятность возникновения наиболее опасных повреждений – коротких замыканий в обмотках трансформатора.

Желание снизить аварийность ПТ и повысить быстродействие системы управления позволяет обоснованно ставить вопрос о целесообразности замены механических устройств РПН на бесконтактные, выполненные на основе тиристоров или полностью управляемых транзисторов. Решение данной проблемы связано с решением комплекса задач, включающих разработку силовых схем трансформаторов ДСП с бесконтактным регулированием напряжения и совершенствование двухканальной системы регулирования положения электродов.

В публикациях [13, 14] показано, что основным недостатком исполнительных элементов системы регулирования ArCOS является низкое быстродействие, т.к. постоянная времени системы гидропривода составляет 0,2–0,4 с, а время переключения ступени трансформатора – 3–5 с. Этот недостаток является характерным для всех систем автоматического управления электрическим режимом ДСП с контактными РПН. При 15–20 коммутациях в течение плавки средней продолжительности система управления фактически не действует в течение 50–100 с. Таким образом, при теоретически непрерывной работе печи процесс неуправляем в течение полутора часов за сутки. На основании изложенного следует вывод о необходимости поиска путей повышения быстродействия регулирования режимных параметров за счет сокращения продолжительности неуправляемых бестоковых пауз.

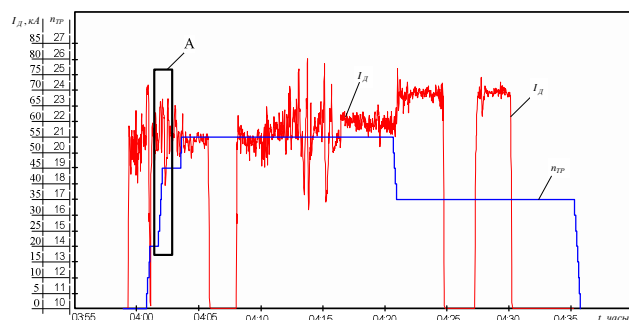
Во многих зарубежных публикациях, например [15–17], рассматриваются силовые схемы печных трансформаторов с тиристорным регулированием напряжения. Однако информация о промышленном внедрении таких разработок на сверхмощных ДСП отсутствует. Целью представленной публикации является анализ быстродействия РПН и гидравлического привода перемещения электродов. Поставлена задача оценки реализуемости тиристорного регулирования вторичного напряжения ПТ в разработанной автором силовой схеме [14, 18]. Вопросы повышения быстродействия системы и сокращения продолжительности неуправляемых интервалов рассматриваются с позиций исключения бестоковых пауз, вызванных коммутацией РПН. Поэтому данному вопросу уделено наибольшее внимание.

АНАЛИЗ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

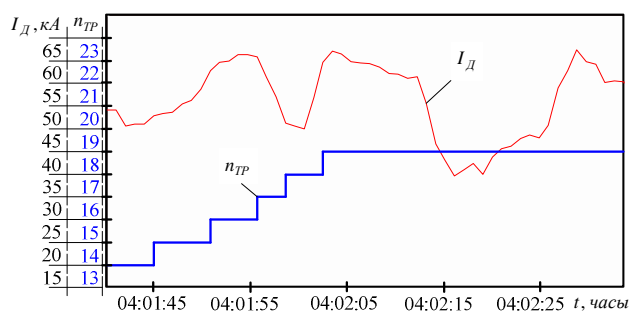
Анализ быстродействия РПН. На рис. 2, а представлены осциллограмма тока I_d фазы и профилограмма изменения номера $n_{ТР}$ ступени напряжения печного трансформатора ДСП-180 за цикл плавки. Для детального рассмотрения процесса изменения тока при переключении ступеней РПН на рис. 2, б представлен фрагмент, ограниченный областью «А», в увеличенном масштабе времени. Из осциллограмм следует, что среднее время переключения ступени составляет 3–5 с. При этом ток дуги успевает измениться от максимального значения 67 кА до минимального 54 кА.

Представленная осциллограмма тока демонстрирует работу дискретной системы управления мощностью ДСП, в которой имеются нерегулируемые интервалы времени. В соответствии с программой плавки в области «А» происходит переход с 14-й на 19-ю ступени трансформатора, совокупная задержка времени 12–15 с. За одну плавку, длительность которой составляет примерно 30–40 мин, происходит 15–20 переключений. Следовательно, в течение 45–100 с система управления находится в разомкнутом состоянии и не контролирует параметры электрического режима.

На рис. 3, а представлена характерная диаграмма переключения ступеней устройств РПН трансформатора $n_{СТ.ТР}$ и реактора $n_{СТ.Р}$ за цикл плавки в ДСП-180. Обобщенные результаты исследований времени переключения приведены в виде диаграмм на рис. 3, б. Из них следует, что более 5% времени работы под током не контролируется системой управления печи.

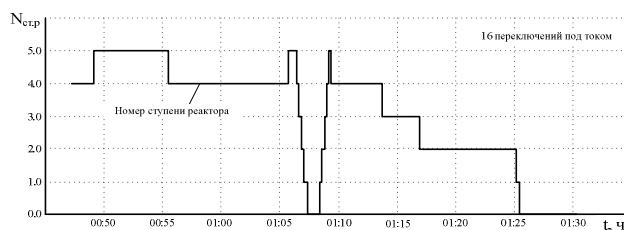
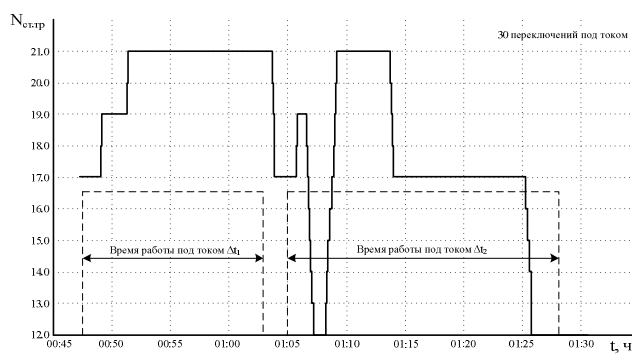


а

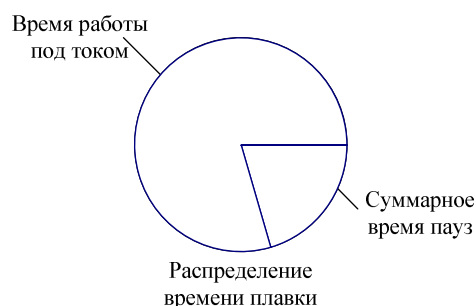


б

Рис. 2. Осциллограмма тока дуги и диаграмма переключения ступеней напряжения трансформатора ДСП-180: а – за цикл плавки; б – область «А» в увеличенном масштабе времени



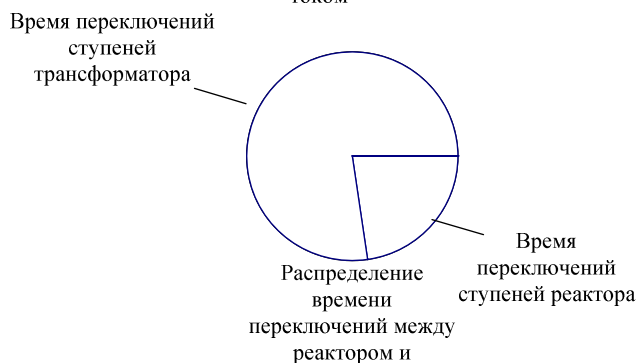
а



Распределение времени плавки



Распределение времени работы под током



Распределение времени переключений между реактором и

б

Рис. 3. Диаграммы переключения ступеней устройств РПН трансформатора и реактора (а) и распределения времени работы под током (б)

Быстродействие гидропривода перемещения электродов. Стабильность токов дуг во многом определяется быстродействием системы автоматического регулирования (САР) гидропривода перемещения электродов. Данный показатель определяется настройкой системы регулирования импеданса (тока дуг), исключаящей, с одной

стороны, рывки и динамические удары в системе с большими инерционными массами, а с другой – обеспечивающей достаточную динамику перемещения. Существует рациональный диапазон настройки пропорционально-интегрального регулятора (ПИ-регулятора) импеданса. На **рис. 4** показаны зависимости изменения полного сопротивления фазы от времени для различных настроек регулятора [19]. В первом случае (**рис. 4, а**) ПИ-регулятор не отвечает требуемым параметрам, поэтому время регулирования при отработке скачка задания $Z_{\text{зад}}$ значительно. Так, при набросе сигнала задания время переходного процесса T_{y1} составляет около 3,5 с, при сбросе время запаздывания $T_{y2}=0,8$ с. В связи с этим выход на заданное значение полного сопротивления фазы $Z_{\text{зад}}$ происходит со значительной задержкой.

Известно несколько способов повышения быстродействия САР импеданса. В частности, некоторыми авторами [3] предлагается применять адаптивный ПИ-регулятор. С учетом того, что объект регулирования является существенно нелинейным, пропорциональную часть регулятора выбирают переменной в зависимости от текущего значения импеданса $Z_{\text{факт}}$, а постоянную времени интегральной части подбирают индивидуально для каждой печи. В этом случае отработка скачка задания импеданса $Z_{\text{зад}}$ (**рис. 4, б**) происходит за меньшее время: $T_{y1}=0,6$ с, $T_{y2}=0,65$ с. Таким образом, сопоставление осциллограмм показывает, что применение адаптивного регулятора позволяет повысить эффективность работы электропечи.

В идеальном случае перемещение электродов можно существенно ограничить и сделать САР импеданса более динамичной. Для этого функцию поддержания заданного импеданса следует возложить на более быстродействующую систему регулирования напряжения, подводимого к электродам. Однако при применении механического устройства РПН использование данного потенциала САР практически неосуществимо. Это подтверждается следующими рассуждениями. Скорость протекания электрических процессов в печи на несколько порядков выше скорости перемещения электродов в гидравлической системе. Так, постоянная времени дуги находится в пределах $100\text{--}600 \cdot 10^{-6}$ с, а время перемещения электродов при коротких замыканиях и обрывах дуг составляет несколько секунд (постоянная времени системы гидропривода 0,2–0,4 с). Очевидно, что случайные и быстрые изменения токов не могут быть отработаны системой без запаздывания, вызванного инерционностью перемещаемых масс. При этом время переключения каждой ступени трансформатора еще выше и составляет 3–5 с. Таким образом, существующая система управления электротехнологическим режимом ДСП с применением инерционной системы гидропривода электродов и механического переключателя РПН не обеспечивает достаточной динамики регулирования тока.

Вопросы разработки новых способов и устройств управления электротехнологическим режимом ДСП, позволяющих повысить стабильность работы и производительность печи, являются актуальными и требуют детального рассмотрения с учетом многофакторности самого объекта управления – электрической дуги. Вместе с тем очевидно, что применение бесконтактного регулятора напряжения позволит полностью исключить процессы коммутации. В результате будет исключен неконтролируемый период плавки продолжительностью 2–3 мин за цикл. Кроме сокращения времени работы под током данное решение позволит удалить из схемы механическое устройство РПН, которое имеет ограниченный ресурс и требует периодического профилактического обслуживания.

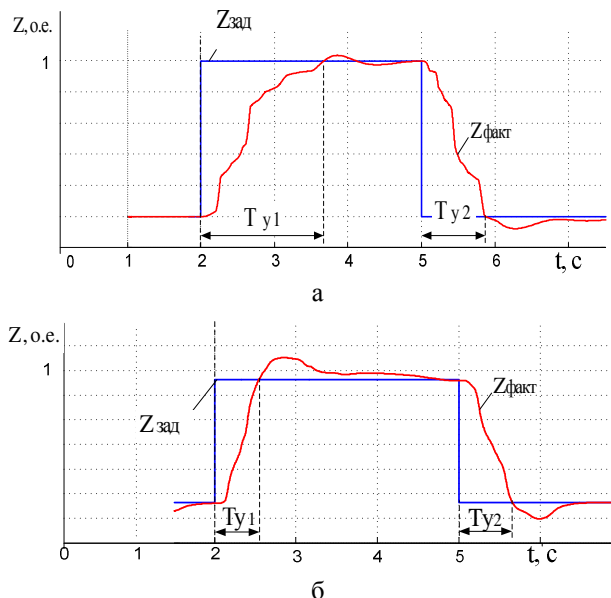


Рис. 4. Изменения полного сопротивления фазы при отработке скачка задания:
а – при оптимальной настройке ПИ-регулятора импеданса;
б – при адаптивном регуляторе

ТИРИСТОРНОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ ВТОРИЧНОГО НАПЯЖЕНИЯ

Однофазная силовая схема. С целью устранения рассмотренных выше недостатков автором ведется разработка силовых схем электропечного трансформатора с тиристорным регулированием напряжения. Перспективным техническим решением является подключение тиристорного регулятора в третичную обмотку ПТ (**рис. 5, а**) [4]. В основу разработки положена концепция тиристорного регулирования напряжения ДСП с высокой динамикой, изложенная в [20, 21]. Регулирование напряжения осуществляется в третичной обмотке ГТ с помощью тиристорного регулятора тока (ТРТ). Вторичное напряжение определяется в соответствии с выражением

$$U_2 = U_{2Г} \pm U_{2Б}. \quad (1)$$

Основная функция регулирования напряжения возложена на тиристорные ключи $T1$ и $T2$. Посредством фазового управления можно изменять напряжение на зажимах первичной обмотки ВДТ. Тиристоры $T3$ и $T4$ предназначены для обеспечения дроссельного режима работы ВДТ в моменты закрытого состояния основных тиристоров. Они выполняют функцию снижения реактанса ВДТ со стороны нагрузки при закрытых тиристорах $T1$ и $T2$. Это обеспечивает исключение режима короткого замыкания в момент перехода главных тиристоров в проводящее состояние. Обозначения дуги принято согласно уравнению Тельного С.И. [22]. Более подробно данная схема регулирования рассмотрена в [4].

На **рис. 5, б** представлена разработанная однофазная схема печного трансформатора с регулированием напряжения в третичной обмотке с помощью бесконтактных ключей. Такой вариант может быть относительно просто реализован в силовой схеме трансформатора, представленной на **рис. 3**, поскольку в ней также осуществляется регулирование напряжения в третичной обмотке. При наличии одной пары основных и одной пары шунтирующих тиристоров она позволяет плавно изменять напряжение вторичной обмотки от $0,5 U_{\text{ном}}$ до $U_{\text{ном}}$ и мощность, пропорциональную квадрату напряжения, – от 25 до 100% номинальной.

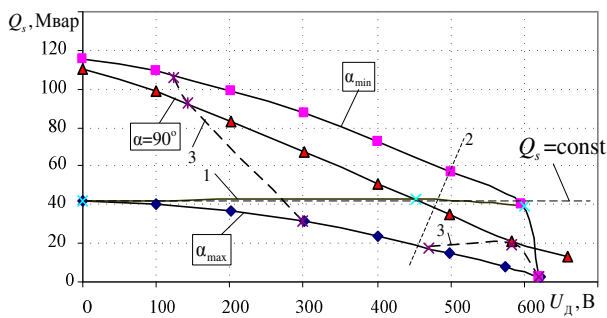


Рис. 8. Зависимость реактивной мощности, потребляемой из сети, от напряжения дуги при изменении угла управления в третичной обмотке:
1 – кривая мощности, соответствующая поддержанию тока дуги на постоянном уровне; 2 – линия, соответствующая границе прерывистого тока дуги;
3 – кривая реактивной мощности сети, соответствующая поддержанию активной мощности дуги на постоянном уровне

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

По результатам выполненных исследований сделан вывод, что регулирование напряжения с помощью тиристорных ключей, включенных по схеме на **рис. 5, 6**, принципиально возможно. Диапазон регулирования основных режимных координат будет определяться соотношением напряжений главного и вольтодобавочного трансформаторов, а также значением индуктивности ограничивающего реактора. Из **рис. 6** следует, для того чтобы иметь возможность поддерживать различные значения токов дуг, необходимо варьировать значения индуктивности ограничивающего реактора или уменьшать вторичное напряжение главного трансформатора. Увеличение вторичного напряжения вольтодобавочного трансформатора нецелесообразно, так как при этом увеличивается ток короткого замыкания. Это приведет к быстрому износу электродов и увеличенным электродинамическим нагрузкам. В случае если из схемы **рис. 5, 6** исключить реактор L_p , значительно снизится граничное значение напряжения дуги, при достижении которого ток начинает протекать с паузами. Соответственно резко уменьшится диапазон регулирования режимных координат, что не является допустимым. Таким образом, дополнительное включение в силовую схему печного трансформатора токоограничивающего реактора с индуктивностью L_p является существенным отличительным признаком, обеспечивающим повышение устойчивости работы схемы и расширение диапазона регулирования напряжения дуги.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение тиристорных регуляторов напряжения печного трансформатора обеспечит переход от одной стадии плавки к другой с минимальной задержкой. Это позволит исключить неконтролируемый процесс плавки продолжительностью 2–3 мин и в результате сократить время цикла плавки на 10–15%. Кроме сокращения времени работы под током предлагаемое решение позволяет исключить из схемы устройство РПН, которое имеет ограниченный ресурс и ухудшает показатели безаварийности агрегата. Наряду с этим введение бесконтактного регулирования напряжения снижает потери мощности в печи и улучшает динамические характеристики системы [19, 24].

В качестве способов, которые позволяют расширить диапазон регулирования основных режимных координат, рекомендуются:

1. Изменение величины индуктивности реактора.
2. Изменение соотношений напряжений главного и вольтодобавочного трансформаторов.

Для максимального использования регулировочных возможностей целесообразно комплексное применение этих методов. Для этого необходима разработка усовершенствованной системы управления электрическим режимом ДСП. При разработке системы следует принять за основу систему ArCOS, которая установлена на ДСП большинства отечественных металлургических предприятий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Корнилов Г.П., Николаев А.А., Якимов И.А. Основные способы регулирования напряжения печного трансформатора // Электротехнические системы и комплексы: межвуз. сб. науч. тр. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2008. Вып. 15. С. 247–252.
2. Кемпф П., Маркворт Э., Мюленбек И. Дуговая печь 110 кВ с регулированием нагрузки в промежуточном контуре // Черные металлы. 1974. № 9. С. 27–28.
3. Экспериментальное исследование гармонического состава токов дуг для дуговых сталеплавильных печей различной мощности / А.А. Николаев, Руссо Жан-Жак, Сцымански Винсент, П.Г. Тулупов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2016. Т.14. №3. С. 106–120.
4. Корнилов Г.П., Николаев А.А., Якимов И.А. Перспективы и средства повышения эффективности дуговых сталеплавильных печей за счет силового оборудования // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». 2009. Вып. 11. №15. С. 32–38.
5. Николаев А.А. Повышение эффективности работы статического тиристорного компенсатора сверхмощной дуговой сталеплавильной печи: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / Николаев Александр Аркадьевич. Магнитогорск, 2009.
6. Способы управления электрическим режимом электродуговых печей / Ю.П. Журавлев, Г.П. Корнилов, Т.Р. Храмшин, А.А. Николаев, Е.Б. Агапитов // Известия вузов. Электромеханика. 2006. №4. С. 76–81.
7. Карандаева О.И. Характеристика повреждаемости сетевых и блочных трансформаторов ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». 2011. № 34 (251). С. 15–20.
8. Information and Measuring System for Electric Arc Furnace Transformer Monitoring / A.S. Karandaev, S.A. Evdokimov, V.R. Khrumshin, O.I. Karandaeva // 12th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE-2014). Novosibirsk. 2014. Vol. 1. P. 273–279. doi: 10.1109/APEIE.2014.7040896
9. Диагностические функции системы непрерывного контроля технического состояния трансформаторов агрегатов дуговых сталеплавильных печей / А.С. Карандаев, С.А. Евдокимов, В.Р. Храмшин, Р.А. Леднов // Металлург, 2014. №8. С. 53–59.
10. Требования к системе мониторинга технического состояния трансформатора сверхмощной дуговой сталеплавильной печи / А.С. Карандаев, С.А. Евдокимов, А.А. Сарлыбаев, Р.А. Леднов // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2013. №2. С. 58–68.
11. Евдокимов С.А. Контроль технического состояния РПН трансформатора сверхмощной дуговой сталеплавильной печи // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2014. Т. 14. № 1. С. 22–30.

12. Система диагностического мониторинга технического состояния трансформатора дуговой сталеплавильной печи / А.С. Карандаев, С.А. Евдокимов, В.Р. Храмшин, А.А. Сарлыбаев // *Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность*. 2014. №4. С. 27–33.
13. Разработка усовершенствованной системы автоматического управления положением электродов дуговых сталеплавильных печей и агрегатов ковш-печь / А.А. Николаев, Г.П. Корнилов, П.Г. Тулупов, И.А. Якимов, Е.В. Повелица, А.В. Ануфриев // *Электротехника: сетевой электронный научный журнал*. 2014. Т.1. №1. С. 48–58.
14. Якимов И.А., Николаев А.А., Корнилов Г.П. Исследование сверхмощных дуговых сталеплавильных печей с тиристорным регулятором напряжения в промежуточном контуре печного трансформатора // *Электротехника: сетевой электронный научный журнал*. 2014. Т.1. №1. С. 41–47.
15. Пат. 2086076 Российской Федерация, МПК Н 05 В 7/148, G 05 F 1/02, F 27 D 19/00. Способ регулирования тока трехфазной дуговой электропечи и установка трехфазной электродуговой печи прямого нагрева / Дж. Дженсини, Л. Морелло, Дж. Коассин, Р. Фраджаккомо. Оpubл. 27.07.1997.
16. Patent 6603795 US, H05B 7/144, H05B 7/148. Power control system for arc electric arc furnace / Thomas Lai Wai Ma, Mohammad Sedighu, Brian Kenneth Perkins, Theodorus Anthonius Gerritsen, Janos Rajda. Aug. 5, 2003.
17. Patent 6226313 US, H0513 7/144. Power source circuit and its control for threephase electric arc furnace to reduce flicker / Manoharan Thamodharan, Albrecht Wolf. May 1, 2001.
18. Исследование работы тиристорного регулятора напряжения печного трансформатора в режиме стабилизации первичного тока дуговой сталеплавильной печи / И.А. Якимов, А.А. Николаев, Р.О. Барабаш, В.В. Анохин // *Электротехника: сетевой электронный научный журнал*. 2016. Т.3. №4. С. 3–10.
19. Основные резервы повышения производительности электродуговой печи как электротехнического комплекса / Г.П. Корнилов, А.А. Николаев, И.А. Якимов, Е.В. Повелица, А.В. Ануфриев, Т.Е. Пелагеин, Т.Р. Храмшин // *Электротехнические системы и комплексы*. 2011. № 1. С. 89–95.
20. Бек Г.-П., Вольф А. Новая концепция питаемой от выпрямителя трехфазной дуговой электропечи с высокой динамикой регулирования // *Черные металлы*. 1998. № 2. С. 16–21.
21. New Converter-Fed Power Source to Increase the Dynamic Performance of the Three-Phase Electric Arc Furnace / A. Wolf, M. Thamodharan. *ETEP* Vol. 10, No. 6, November/December 2000, pp. 347–352.
22. Тельный С.И. К теории трехфазной дуговой печи с непроводящей подиной // *Электричество*. 1954. №12. С. 38–42.
23. Особенности моделирования дуговой сталеплавильной печи как электротехнического комплекса / Г.П. Корнилов, А.А. Николаев, Т.Р. Храмшин, Т.Ю. Вахитов, И.А. Якимов // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2013. № 1 (41). С. 76–82.
24. Корнилов Г.П., Николаев А.А., Якимов И.А. Регулирование напряжения мощных дуговых сталеплавильных печей // *Электротехника. Электротехнология. Энергетика: сб. науч. трудов VII междунар. науч. конф. молодых ученых*. Новосибирск: Изд-во Новосибирского гос. техн. ун-та, 2015. С. 66–69.

Поступила в редакцию 27 апреля 2017 г.

INFORMATION IN ENGLISH

SUBSTANTIATION OF THYRISTOR REGULATION OF VOLTAGE OF ARC FURNACE TRANSFORMER

Ivan A. Yakimov

Senior Lecturer, Department of Mechatronics and Automation, South Ural State University (National Research University)

The power circuit of the connection of the transformer windings of a 180 t electric arc furnace (EAF-180) of OJSC "Magnitogorsk Iron and Steel Works" (OJSC "MMK") is considered. It is shown that the main transformer is a three-winding machine capable of regulating the voltage under load in the tertiary winding. The brief characteristic of the control system of the electro-technological regime ArCOS is given. The system acts on the hydraulic system to adjust the position of the electrodes and switch the stages of the voltage-controlled load-transfer devices (OLTP) of the transformer and the reactor. It is shown that the deterioration in the quality of control and the decrease in the reliability of the chipboard are associated with the low system speed. Oscillograms of the arc current are shown when switching the voltage stages of the transformer confirming the presence of long pauses with each switching. This leads to loss of control over the melting mode. The second drawback of the ArCOS system is low speed associated with the inertia of the hydraulic system of electrode movement. Oscillograms of transient processes are presented with different adjustment of the impedance controller, which confirmed this conclusion. As a promising direction, the development of power circuits for furnace transformers with non-contact voltage regulation was noted. The proposed power circuit of the transformer with thyristor voltage regulation in the tertiary winding is realized implementing the well-known concept of voltage control with high dynamics. The results of the studies performed by the

method of mathematical modeling are presented, which confirmed the feasibility of smooth regulation of voltage in the given range. The possibility of the proposed scheme for regulating the basic mode coordinates is determined at the established ratios of voltages and powers of the main and booster transformers. Directions for further improving the speed of the electrical control system are offered.

Keywords: Electric arc furnace, furnace transformer, power circuit, voltage regulation device, hydraulic electrode moving system, control, response speed, research, contactless regulation, thyristor voltage regulator, development, recommendations.

REFERENCES

1. Kornilov G.P., Nikolayev A.A., Yakimov I.A. Osnovnye sposoby regulirovaniya napryazheniya pechnogo transformatora [Main methods of regulating the voltage of the furnace transformer]. *Mezhvuzovskiy sbornik nauchnykh trudov "Elektrotekhnicheskiye sistemy i komplekсы"* [Interuniversity Collection of Scientific Papers "Electrical Systems and Complexes"]. Magnitogorsk, MGTU, 2008, vol. 15, pp. 247–252. (In Russian)
2. Kempf P., Markvort E., Myulenbek I. Arc furnace 110 kV with load regulation in the intermediate circuit. *Ferrous metals* [Stahl and Eisen]. 1974, no. 9, pp. 27–28. (In Russian)
3. Nikolaev A.A., Jean-Jacques Rousseau, Vincent Szymanski, Tulupov P.G. Experimental study of electric arc currents harmonic composition for electric arc furnaces of various

- powers. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2016, vol. 14, no. 3, pp. 106–120. (In Russian)
4. Kornilov G.P., Nikolaev A.A., Yakimov I.A. Methods to increase the effectiveness of the electric arc furnaces by means of power electrical equipments. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo Gosudarstvennogo Universiteta* [Journal SUSU], 2009, no. 15, pp. 32–38. (In Russian)
 5. Nikolaev A.A. *Povysheniye effektivnosti raboty staticheskogo tiristornogo kompensatora sverkhmoshchnoy dugovoy staleplavil'noy pechi. Kand. Diss.* [Increase of efficiency of operation of a static var compensator of a ultra-high power electric arc furnace. Ph.D. Diss.]. Magnitogorsk, 2009. (In Russian)
 6. Zhuravlev YU.P., Kornilov G.P., Khrumshin T.R., Nikolaev A.A., Agapitov Ye.B. Methods for controlling the electric mode of electric arc furnaces. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika* [Russian Electromechanics], 2006, no. 4, pp. 76–81. (In Russian)
 7. Karandayeva O.I. Characteristic of damages of network and block transformers of OJSC "Magnitogorsk Iron and Steel Works". *Vestnik Yuzhno-Uralskogo Gosudarstvennogo Universiteta* [Journal SUSU], 2011, no. 34, pp. 15–20. (In Russian)
 8. Karandaev A.S., Evdokimov S.A., Khrumshin V.R., Karandayeva O.I. Information and Measuring System for Electric Arc Furnace Transformer Monitoring. 12th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE-2014). Novosibirsk, 2014, vol. 1, pp. 273–279. doi: 10.1109/APEIE.2014.7040896
 9. Karandaev A.S., Evdokimov S.A., Khrumshin V.R., Lednov R.A. Diagnostic functions of the system of continuous monitoring of technical condition of transformers of aggregates of arc steel furnaces. *Metallurg* [Metallurgist], 2014, no. 8, pp. 53–59. (In Russian)
 10. Karandaev A.S., Evdokimov S.A., Sarlybaev A.A., Lednov R.A. Requirements for the monitoring system for the technical condition of the transformer of a super-power arc steel-smelting furnace. *Mashinostroyeniye: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal* [Russian Internet Journal of Industrial Engineering], 2013, no. 2, pp. 58–68. (In Russian)
 11. Evdokimov S.A. Kontrol tekhnicheskogo sostoyaniya RPN transformatora sverkhmoshchnoy dugovoy staleplavil'noy pechi [Monitoring of the technical state of the RPN transformer of a super-power arc steel melting furnace]. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo Gosudarstvennogo Universiteta* [Journal SUSU], 2014, no. 1, pp. 22–30. (In Russian)
 12. Karandaev A.S., Evdokimov S.A., Khrumshin V.R., Sarlybaev A.A. Diagnostic monitoring system for the technical condition of the transformer of an arc steel smelting furnace. *Elektro. Elektrotehnika, elektroenergetika, elektrotekhnicheskaya promyshlennost* [ELEKTRO. Power engineering. Power industry], 2014, no. 4, pp. 27–33. (In Russian)
 13. Nikolaev A.A., Kornilov G.P., Tulupov P.G., Yakimov I.A., Povelitsa E.V., Anufriev A.V. Design of the improved electric arc and ladle furnaces electrodes position automatic control system. *Elektrotehnika: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal* [Russian Internet Journal of Electrical Engineering], 2014, no. 1, pp. 48–58. (In Russian)
 14. Yakimov I.A., Nikolayev A.A., Kornilov G.P. Investigation of ultra-high power furnaces with thyristor voltage regulator in the intermediate circuit of the furnace transformer. *Elektrotehnika: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal* [Russian Internet Journal of Electrical Engineering], 2014, no. 1, pp. 41–57. (In Russian)
 15. Dzhensini, Dzh., Morello, L., Koassin, Dzh., Fradzhakomo, R. *Sposob regulirovaniya toka trekhfaznoy dugovoy elektropechi i ustanovka trekhfaznoy elektrodugovoy pechi pryamogo nagreva* [A method for regulating the current of a three-phase electric arc furnace and installing a three-phase electric arc furnace for direct heating]. Patent RF, no. 2086076, 1997.
 16. Thomas Lai Wai Ma, Mohammad Sedighu, Brian Kenneth Perkins, Theodorus Anthonius Gerritsen, Janos Rajda. Patent US 6603795, H05B 7/144, H05B 7/148. Power control system for arc electric arc furnace. Aug. 5, 2003.
 17. Manoharan Thamodharan, Albrecht Wolf. Patent US 6226313, H0513 7/144. Power source circuit and its control for threephase electric arc furnace to reduce flicker. May 1, 2001.
 18. Yakimov I.A., Nikolaev A.A., Barabash R.O., Anohin V.V. Research of furnace transformer secondary voltage thyristor regulator working for electric arc furnace primary current stabilization. *Elektrotehnika: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal* [Russian Internet Journal of Electrical Engineering], 2016, no. 4, pp. 3–10. (In Russian)
 19. Kornilov G.P., Nikolayev A.A., Yakimov I.A., Povelitsa Ye.V., Anufriyev A.V., Pelagein T.E., Ivanov V.A., Khrumshin T.R. Main reserves of improving the productivity of an electric arc furnace as of the electrical complex. *Mezhvuzovskiy sbornik nauchnykh trudov "Elektrotekhnicheskiye sistemy i komplekсы"* [Interuniversity Collection of Scientific Papers "Electrical Systems and Complexes"]. Magnitogorsk, MGTU, 2011, vol. 1, pp. 89–95.
 20. Bek G. –P., Volf A. A new concept of a three-phase rectifier supplied from an electric arc furnace with high dynamics control. *Chernyye metally* [Ferrous materials], 1998, no. 2, pp. 16–24.
 21. New Converter-Fed Power Source to Increase the Dynamic Performance of the Three-Phase Electric Arc Furnace / A. Wolf, M. Thamodharan. *ETEP*, vol. 10, no. 6, November/December 2000, pp. 347–352.
 22. Telnny S.I. About the theory of a three-phase arc furnace with a non-conducting bottom. *Elektrichestvo* [Electricity], 1954, no. 12, pp. 38–42. (In Russian)
 23. Kornilov G.P., Nikolayev A.A., Khrumshin T.R., Vakhitov T.Yu., Yakimov I.A. Details of modeling the electric arc furnace as a complex electrical. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2013, no. 1, pp. 76–82.
 24. Kornilov G.P., Nikolayev A.A., Yakimov I.A. Regulation of voltage of ultra-high power electric arc furnaces. *Electrical engineering. Energetika: sb. nauch. trudov VII mezhdunar. nauch. konf. molodykh uchenykh* [Electrical engineering. Electrotechnology. Power engineering: Papers of VII International. Sci. Conf. Young scientists]. Novosibirsk, Novosibirsk State Technical University, 2015, pp. 66–69.

Якимов И.А. Обоснование тиристорного регулирования напряжения трансформатора дуговой сталеплавильной печи // Электротехнические системы и комплексы. 2017. № 2 (35). С. 41–48. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-2\(35\)-41-48](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-2(35)-41-48)

Yakimov I.A. Substantiation of Thyristor Regulation of Voltage of Arc Furnace Transformer. *Elektrotekhnicheskiye sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2017, no. 2 (35), pp. 41–48. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-2\(35\)-41-48](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-2(35)-41-48)

ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА, АВТОМАТИКА И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

УДК 620.317.179.14

[https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-2\(35\)-49-54](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-2(35)-49-54)Брякин И.В.¹, Бочкарев И.В.²¹Институт автоматики и информационных технологий Национальной Академии Наук Кыргызской Республики²Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ДАТЧИК ДЛЯ СИСТЕМ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ СТАЛЬНЫХ КАНАТОВ

Приводятся результаты аналитического обзора известных методов и технических средств неразрушающего контроля (НК) стальных проволочных канатов. Анализ эксплуатационных возможностей и особенностей функционирования этих технических средств НК показал необходимость разработки новых подходов в области создания измерительных датчиков для систем технического контроля и диагностики состояния стальных канатов. Обоснована возможность создания на базе феррозонда нового типа «гибридного» метода НК с расширенными функциональными возможностями. В отличие от традиционного феррозондового метода, использующего модулирующее воздействия переменного магнитного поля, источником которого является многовитковая катушка (магнитный диполь), разработанный «гибридный» метод основан на применении в качестве модулятора вибраторной антенны (электрический диполь), которая инициирует в ферромагнитной среде магнитоэлектрические процессы. В предложенном методе НК и его схемотехнической реализации используется одновременно несколько физических эффектов: влияние дефекта на характер пространственного распределения магнитного потока в среде; влияние дефекта на величину трансформаторной ЭДС; влияние дефекта на величину магнитомодуляционной ЭДС. Фактически предлагаемый метод НК объединяет в себе потенциальные возможности трех магнитных методов НК: постоянного магнитного поля, переменного магнитного поля и феррозондового метода. Применение предложенной алгоритмической обработки результатов измерения выходного сигнала индукционного датчика позволяет идентифицировать тип дефекта и определять его геометрические и физико-химические характеристики.

Ключевые слова: стальной канат, неразрушающий контроль, дефект, дефектоскоп, измерительный датчик, магниточувствительный элемент, магнитное поле, феррозонд, модулятор, вибрационная антенна.

ВВЕДЕНИЕ

Стальные канаты (СК) широко используются как основной грузонесущий элемент или элемент растяжек и крепления во многих отраслях производства на различных технических объектах, таких как шахты, канатные дороги, подвесные мосты, строительные конструкции, различные подъемно-транспортные машины и грузоподъемные механизмы и т.п. Кроме того, СК относятся к неремонтируемым элементам машин и сооружений, которые в процессе эксплуатации испытывают большие механические нагрузки, часто в условиях воздействия агрессивных сред, что неизбежно приводит их к различным видам износа. Снижение запаса их прочности из-за износа или повреждения повышает опасность аварий и часто требует замены СК. Поэтому надежность и безопасность эксплуатации перечисленных выше механизмов и сооружений, в первую очередь, определяется техническим состоянием используемых канатов [1–3].

Следует отметить, что существующие нормы безопасности для СК нередко устанавливаются на основе допустимого срока их эксплуатации, а не по фактическому состоянию. Подобная ситуация может приводить либо к значительным экономическим потерям в случае преждевременной замены дорогого и вполне годного к дальнейшей эксплуатации СК или же в пределах допустимого срока может продолжаться использование СК, фактическое состояние которого находится хуже установленного предела, что представляет собой особую опасность. Исходя из этого, очевидно, что именно оценка фактического состояния позволит обеспечить необходимый уровень безопасности при минимизации экономических затрат.

Известно, что фактическое состояние СК в экс-

плуатации оценивают как разрушающими, так и неразрушающими методами [4]. Первые используют для оценки прочности образцов при различных видах нагружения, а вторые – для определения потери прочности из-за абразивного износа, коррозии и повреждений.

АНАЛИЗ МАГНИТНЫХ МЕТОДОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ СТАЛЬНЫХ КАНАТОВ

Основу оперативной технической диагностики, определяющей фактическое состояние СК, составляют методы неразрушающего контроля (НК) [5, 6]. Связь между НК дефектов (дефектоскопией) и надежностью конструктивных элементов обусловлена тем, что в подавляющем большинстве случаев разрушение этих элементов начинается с зарождения и развития в нем трещины, а также с развития уже имеющихся технологических несплошностей. Широкое применение методов НК, не требующих вырезки образцов или разрушения готовых изделий, позволяет избежать больших потерь времени и материальных затрат, обеспечить частичную или полную автоматизацию операций контроля при одновременном значительном повышении качества и надежности изделий. Именно НК позволяет своевременно диагностировать стадию начала разрушения и предотвратить его развитие и катастрофические последствия.

Из всего комплекса известных методов НК для задач диагностики состояния СК можно выделить визуально-измерительные методы НК, которые позволяют оценить износ, коррозию и повреждения проволок на поверхности каната, так называемые локальные дефекты (ЛД), и магнитный метод НК, основанный на анализе взаимодействия магнитного поля и объекта контроля (ОК) и ориентированный на решение не только этих задач, но и диагностику состояния проволок внутри СК [7, 8]. Отметим, что потеря сечения (ПС) измеряется только приборами маг-

нитного НК (магнитными дефектоскопами), так как требует оценки не только поверхностного износа и/или коррозии каната, но и внутреннего, не доступного визуальным средствам контроля.

Поэтому именно посредством магнитных дефектоскопов измеряют такой важный интегральный параметр потери прочности каната, как потерю его металлического сечения.

Наиболее широкое применение в магнитной дефектоскопии СК нашли методы постоянного магнитного поля и переменного магнитного поля. Первый из названных методов основан на том, что при намагничивании объекта контроля (ОК) до технического насыщения электромагнитами постоянного тока или постоянными магнитами вблизи поверхности ОК, имеющей несплошность (дефект), в области дефекта происходит резкое пространственное изменение напряженности магнитного поля, что в свою очередь приводит к возникновению поля рассеяния (рис. 1).

В данном случае первичным информативным параметром является конкретный параметр магнитного поля рассеяния (амплитуда поля, его конфигурация в пространстве, время его распространения и т. д.), изменение которого используют для характеристики ОК. Поэтому изменение градиента напряженности магнитного поля рассеяния используется как первичный информативный параметр для выявления дефектов.

Для индирования полей рассеяния на дефектах (получения первичной информации) и измерения магнитных характеристик материалов используют измерительные датчики (ИД) типа катушки индуктивности (индукционный метод), феррозондов (феррозондовый метод), преобразователей Холла и магниторезисторов. Данные типы ИД служат для преобразования параметров магнитного поля в электрический сигнал или в сигнал промежуточного вида.

Особенностью ИД в виде катушки индуктивности является необходимость их пространственного перемещения относительно намагниченного участка детали. В зависимости от расположения вектора напряженности магнитного поля катушка индуктивности может иметь расположение вдоль оси детали или перпендикулярно ей.

Контроль СК с помощью датчиков Холла или магниторезисторов осуществляется путем расположения их на окружности, соосной к СК.

О наличии дефекта судят по увеличению интенсивности поля рассеяния, а следовательно, по изменению соответственно электрического напряжения на датчиках Холла или меняющемуся электросопротивлению магниторезисторов.

Наиболее чувствительным из перечисленных ИД является феррозонд, имеющий два сердечника, на каждом из которых намотаны по две катушки (рис. 2). Одна из катушек w_1 каждого сердечника (возбуждающая) питается от переменного тока, другая w_2 является измерительной.

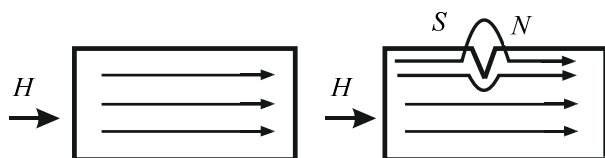


Рис. 1. Магнитное поле в ферромагнитном материале при отсутствии (а) и наличии (б) трещины: N и S – магнитные полюса вблизи трещины

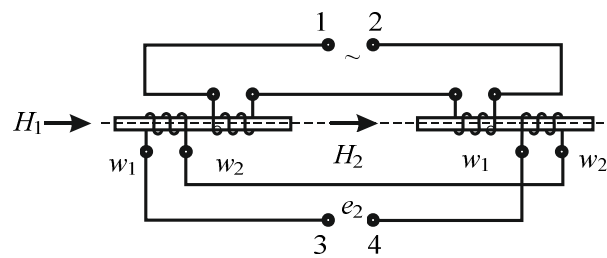


Рис. 2. Двухэлементный феррозонд с двумя катушками сема

Поскольку возбуждающие катушки включены навстречу друг другу, то при отсутствии внешнего магнитного поля ЭДС индукции катушек компенсируют друг друга, и на выходе формируется нулевой сигнал. При действии внешнего магнитного поля рассеяния равновесие нарушается, и по изменению выходного сигнала судят о дефекте.

Второй из рассматриваемых методов магнитного НК, т.е. метод переменного магнитного поля [5], основан на зависимости индуктивности или взаимной индуктивности обмоток катушек на магнитопроводе от геометрических размеров и магнитного состояния элементов их магнитной цепи (рис. 3). В данном случае первичная информация регистрируется посредством трансформаторного датчика, элементом магнитной цепи которого является СК.

Значительная часть рассмотренных магнитных методов НК требует проведения предварительного намагничивания или подмагничивания зоны контроля металла до технического насыщения с использованием специальных намагничивающих систем. В этом случае трудность намагничивания повышается с увеличением габаритов ОК, а также с увеличением количества труднодоступных и трудноконтролируемых участков ОК.

Кроме того, на результаты измерений большое влияние оказывает зазор между поверхностью контроля и ИД, что существенно снижает возможности магнитных методов неразрушающего контроля во время оперативной диагностики состояния СК.

Результаты проведенного анализа функциональных возможностей рассмотренных выше методов и средств неразрушающего контроля свидетельствуют о необходимости разработки новых подходов в области создания ИД для систем технического контроля и диагностики состояния стальных канатов.

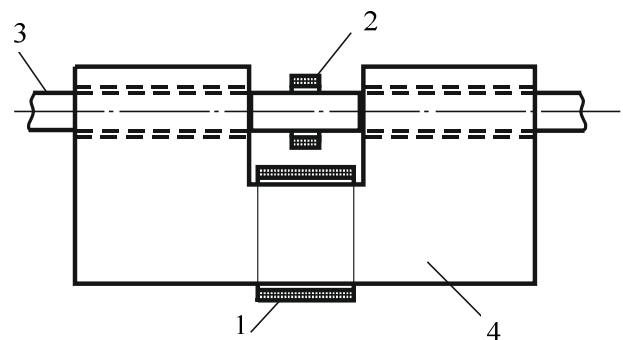


Рис. 3. ИД для метода НК переменным магнитным полем: 1 – катушка возбуждения (первичная обмотка); 2 – катушка сема (вторичная обмотка); 3 – стальной канат (ОК); 4 – ферромагнитный магнитопровод

ПРИНЦИП ПОСТРОЕНИЯ «ГИБРИДНОГО» ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ДАТЧИКА

Обобщая особенности рассмотренных магнитных методов НК, можно отметить, что каждый из этих известных методов основан на каком-то одном физическом эффекте, который фактически и определяет как возможности самого метода, так и особенности его реализации.

Предлагается новый метод НК, который можно отнести к одной из возможных модификаций диагностирования по эффектам нелинейности, которые являются информативными из-за принципиально нелинейной функциональной связи между испытательным электромагнитным полем и откликом активной физической среды (ОК) [9]. Эта связь однозначно определяется функцией восприимчивости, отображающей физическое состояние активной физической среды по связям динамической и диссипативных подсистем и обеспечивает чувствительность эффектов нелинейности к дефектам ОК. В данном случае ОК представляется в виде концептуальной модели с двумя подсистемами: динамической и диссипативной. Динамическая подсистема моделирует воздействие внешнего испытательного электромагнитного поля и подачу энергии активации, а диссипативная – преобразовательные возможности активной физической среды. Такое представление ОК позволяет учесть все возможные пути получения информации о физическом состоянии системы за счет проявления ее электрических, магнитных, упругих и других свойств.

Применение подобного феноменологического подхода позволило выделить наиболее общие физические эффекты, дающие информацию о видах физического состояния ОК, и разработать новый метод и его схемотехническую реализацию, в которой используется одновременно несколько физических эффектов: 1 – влияние дефекта на характер пространственного распределения магнитного потока в среде; 2 – влияние дефекта на величину трансформаторной ЭДС; 3 – влияние дефекта на величину магнитомодуляционной ЭДС, обусловленную эффектом нелинейности. Фактически предлагаемый метод НК объединяет в себе потенциальные возможности трех магнитных методов НК: постоянного магнитного поля, переменного магнитного поля и феррозондового метода. Иными словами, новый тип «гибридного» ИД для НК СК фактически является магнитомодуляционным элементом и основан на базе феррозонда, использующего постоянное магнитное поле, переменные электрическое и магнитные поля [10, 11].

Магнитомодуляционные элементы характеризуются тем, что в их сердечниках всегда действуют, по крайней мере, два отличающихся по частоте магнитных поля, одно из которых обычно обусловлено источником питания переменного тока, а другое – входными (управляющими) сигналами. В отдельных случаях частота управляющих сигналов может быть равна нулю, что соответствует входным сигналам постоянного тока. Магнитомодуляционные элементы являются управляемыми ферромагнитными устройствами, действие которых основано на том, что одно из магнитных полей изменяет (модулирует) магнитное состояние сердечника для другого поля.

Следует подчеркнуть, что вследствие именно нелинейного характера кривой намагничивания ферромагнитных материалов (рис. 4) при наличии переменного поля либо магнитная индукция, либо напряженность поля, а часто и то и другое, имеют высшие гармоники, которые и содержат необходимую диагностическую информацию.

При отсутствии постоянного поля имеются лишь нечетные высшие гармоники (3-я, 5-я и т.д.). При наличии постоянного поля наряду с нечетными непременно появляются и четные гармоники (2-я, 4-я и т.д.). Например, форма несимметричной кривой b' на рис. 4 показывает, что при изменении по синусоидальному закону и наличии постоянного поля напряженность переменного поля и, следовательно, переменный ток содержат четные гармоники.

В отличие от традиционного феррозондового метода НК, использующего модулирующее воздействия переменного магнитного поля, источником которого является многovitковая катушка (магнитный диполь), «гибридный» метод НК основан на применении в качестве модулятора вибраторной антенны (электрический диполь), которая инициирует в ферромагнитной среде магнитоэлектрические процессы.

Конструктивно «гибридный» ИД для НК проволочных канатов представляет собой Ш-образную многоэлементную ферромагнитную систему (МФС) 1, дополненную длинномерным ферромагнитным элементом в виде стального каната, являющегося ОК 2 (рис. 5).

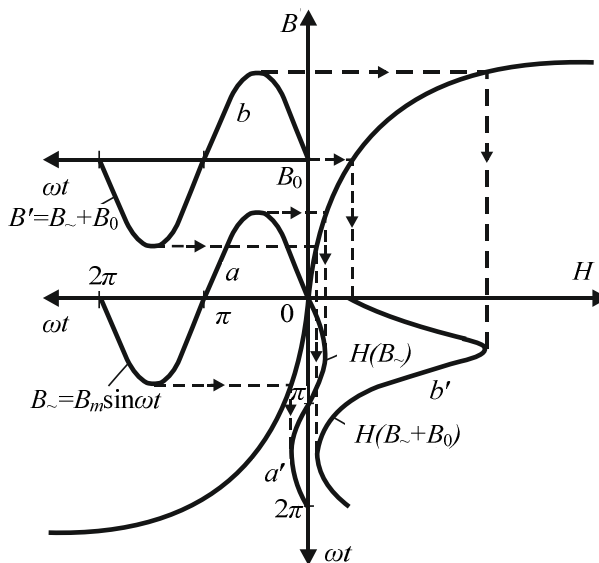


Рис. 4. Влияние постоянной составляющей индукции B_0 на величину переменного тока в обмотке сердечника

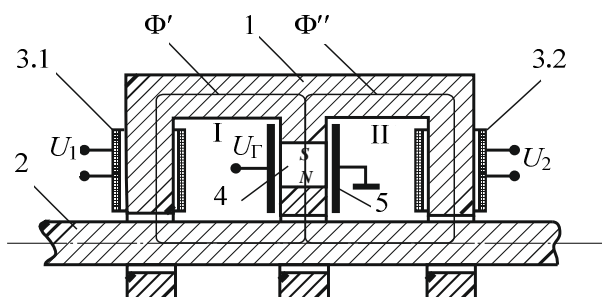


Рис. 5. Конструкция «гибридного» ИД

МФС включает в свой состав приемные катушки (ПК) 3.1 и 3.2.; подмагничивающий элемент (ПЭ) в виде постоянного магнита 4 и элемент «накачки» – модулятор 5. Элемент «накачки» является фактически вибраторной антенной, т.е. излучающей резонансной антенной конденсаторного типа с сосредоточенной емкостью C , возбуждаемой с помощью длинной линии источником синусоидального напряжения U_{Γ} [11]. Ш-образная МФС образует вместе с ОК два взаимосвязанных ферромагнитных контура (ФК) I и II, через которые определенным образом конфигурируются «гибридные» магнитные потоки Φ' и Φ'' , возбуждаемые вибраторной антенной и ПЭ.

Исследуем взаимное влияние совмещенных магнитных полей (постоянных и переменных) в заданной МФС ИД, используя в качестве ОК эталонный образец стального каната (отсутствуют дефекты). В этом случае кривую намагниченности магнитопровода МФС можно представить в виде простой зависимости, учитывающей только нелинейность данной кривой намагниченности:

$$B = f(H_{\Sigma}) = f[H(t) + H_0], \quad (1)$$

где H_{Σ} – суперпозиция напряженностей постоянного магнитного поля H_0 (подмагничивающее поле) магнита и переменного магнитного поля $H(t)$ (поле возбуждения), создаваемого вибраторной антенной.

Конструктивные особенности вибраторной антенны позволяют реализовать режим заданного напряжения возбуждения, т.е. режим заданной индукции поля возбуждения. При этих условиях для электрического напряжения, подаваемого на вибраторную антенну, можем записать

$$u(t) = \frac{1}{f(C_A)} \times s \times \frac{dB}{dt}, \quad (2)$$

где s – эквивалентная площадь условного поперечного сечения центрального элемента магнитопровода МФС; B – магнитная индукция в центральном элементе магнитопровода МФС; $f(C_A)$ – конструктивная функция, характеризующая зависимость амплитуды возбуждаемого магнитного поля в магнитопроводе МФС от конструктивных особенностей вибраторной антенны.

Интегрируя выражение (2), получим

$$B(t) = \frac{1}{s} \times f(C_A) \times \int u(t) \times dt \quad (3)$$

При питании вибраторной антенны заданным электрическим напряжением вида

$$u(t) = Um \cdot \cos \omega t$$

в соответствии с (3) получим

$$B'(t) = B'_m \sin \omega t \text{ и } B''(t) = B''_m \sin \omega t, \quad (4)$$

где $B'_m = f(C_k) \cdot U_m / [\omega s_1]$ и $B''_m = f(C_k) \cdot U_m / [\omega s_2]$; s_1 и s_2 – средние сечения соответственно ФК-I и ФК-II; $f(C_k)$ – конструктивная функция, определяемая параметрами вибраторной антенны.

Магнитные индукции $B'(t)$ и $B''(t)$ в ФК-I и ФК-II фактически определяют изменяющиеся во времени

магнитные потоки соответственно через сечения s_1 ФК-I и s_2 ФК-II, которые, в свою очередь, наводят в каждой из ПК соответствующие ЭДС индукции:

$$\begin{aligned} e'(t) &= -w_1 \cdot \frac{d\Phi'}{dt} = w_1 \cdot s_1 \cdot \frac{dB'}{dt}; \\ e''(t) &= -w_2 \cdot \frac{d\Phi''}{dt} = w_2 \cdot s_2 \cdot \frac{dB''}{dt}, \end{aligned} \quad (5)$$

где w_1 и w_2 – количество витков соответственно ПК-3.1 и ПК-3.2.

Рассмотрим более подробно особенности электродинамических процессов, возникающих в ФК-I и ФК-II. Воспользуемся аппроксимацией зависимости $B=f(H_{\Sigma})$ укороченным полиномом третьей степени

$$B = f(H_{\Sigma}) = aH_{\Sigma} - bH_{\Sigma}^3,$$

где a и b – положительные коэффициенты аппроксимации, характеризующие соответственно конструктивные особенности и магнитные свойства магнитопровода МФС.

С учетом выражений (1) и (4) можем записать: для ФК-I:

$$\begin{aligned} B'(H_{\Sigma}) &= a_1 \cdot H_m \cdot \sin \omega t + a_1 \cdot H_0 - \\ &- b_1 [H_m^3 \cdot \sin^3 \omega t + 3 \cdot H_0 \cdot H_m^2 \cdot \sin^2 \omega t + \\ &+ 3 \cdot H_0^2 \cdot H_m \cdot \sin \omega t + H_0^3]; \end{aligned} \quad (6)$$

для ФК-II:

$$\begin{aligned} B''(H_{\Sigma}) &= a_2 \cdot H_m \cdot \sin \omega t + a_2 \cdot H_0 - \\ &- b_2 [H_m^3 \cdot \sin^3 \omega t + 3 \cdot H_0 \cdot H_m^2 \cdot \sin^2 \omega t + \\ &+ 3 \cdot H_0^2 \cdot H_m \cdot \sin \omega t + H_0^3]. \end{aligned} \quad (7)$$

После несложных математических преобразований выражений (6) и (7) для ФК-I и ФК-II соответственно получим:

$$\begin{aligned} \frac{dB'}{dt} &= a_1 \cdot \omega \cdot H_m \cdot \cos \omega t - 3 \cdot b_1 \cdot \omega \cdot H_0^2 \times \\ &\times H_m \cdot \cos \omega t - 6 \cdot b_1 \cdot \omega \cdot H_0 \cdot H_m^2 \cdot \sin 2\omega t; \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \frac{dB''}{dt} &= a_2 \cdot \omega \cdot H_m \cdot \cos \omega t - 3 \cdot b_2 \cdot \omega \cdot H_0^2 \times \\ &\times H_m \cdot \cos \omega t - 6 \cdot b_2 \cdot \omega \cdot H_0 \cdot H_m^2 \cdot \sin 2\omega t. \end{aligned} \quad (9)$$

Из анализа выражений (8) и (9) следует, что ЭДС индукции каждой из ПК будет содержать две составляющие, одна из которых является трансформаторной ЭДС, а другая – магнитомодуляционной ЭДС.

Для ПК-3.1 будет справедливо выражением вида

$$e'(t) = e'_T(t) + e'_M(t),$$

где $e'_T(t) = a_1 \cdot w_1 \cdot s_1 \cdot \omega \cdot H_m \cdot \cos \omega t$ – трансформаторная ЭДС; $e'_M(t) = 3 \cdot w_1 \cdot s_1 \cdot b_1 \cdot \omega \cdot H_0^2 \cdot H_m \cdot \cos \omega t - 6 \cdot w_1 \cdot s_1 \cdot b_1 \cdot \omega \cdot H_0 \cdot H_m^2 \cdot \sin 2\omega t$ – магнитомодуляционная ЭДС.

Для ФК-II имеем

$$e''(t) = e''T(t) + e''M(t),$$

где $e''_T(t) = a_2 \cdot w_2 \cdot s_2 \cdot \omega \cdot H_m \cdot \cos \omega t$ – трансформаторная ЭДС; $e''_M(t) = 3 \cdot w_2 \cdot s_2 \cdot b_2 \cdot \omega \cdot H_0^2 \cdot H_m \cdot \cos \omega t - 6 \cdot w_2 \cdot s_2 \cdot b_2 \cdot \omega \cdot H_0 \cdot H_m^2 \cdot \sin 2\omega t$ – магнитомодуляционная ЭДС.

Поскольку обмотки ПК-3.1 и ПК-3.2 включены последовательно-встречно, то, в общем случае величина напряжения небаланса (электрический сигнал с выхода ИД) при условии $w_1=w_2=w_0$; $s_1=s_2=s_0$ и $l_1=l_2=l_0$, т.е. в отсутствии дефектов (при эталонном ОК), будет определяться выражением

$$e_\Sigma(t) = e_{\Sigma T}(t) + e_{\Sigma M}(t), \quad (10)$$

где $e_{\Sigma T}(t) = e'_T(t) - e''_T(t) = 0$ – разность двух трансформаторных ЭДС, наводимых соответствующими магнитными потоками в обмотках ПК-3.1 и ПК-3.2 от переменных полей возбуждения; $e_{\Sigma M}(t) = e'_M(t) - e''_M(t) = 0$ – разность двух магнитомодуляционных ЭДС, наводимых модулированным магнитным полем соответственно в обмотках ПК-3.1 и ПК-3.2.

Иными словами, при использовании эталонного ОК и последовательно-встречном включении обмоток ПК-3.1 и ПК-3.2 обеспечивается отсутствие сигнала на выходе ИД, что означает градиентометрический режим функционирования ИД.

При рассмотрении варианта с рабочим ОК, имеющим дефекты типа ЛД и ПС, и с учетом того, что в общем случае $H_0 \ll H_m$, для ЭДС ИД имеем:

$$e_\Sigma(t) = \omega \cdot w_0 \cdot a_D \cdot s_D \cdot H_m \cdot \cos \omega t - 6 \cdot \omega \cdot w_0 \cdot b_D \cdot s_D \cdot H_0 \cdot H_m^2 \cdot \sin 2\omega t, \quad (11)$$

где $a_D = (a_1 - a_2) = f(l_D)$ – условный параметр (УП), отражающий длину дефекта l_D ; $s_D = (s_1 - s_2) = f(h_D)$ – УП, отражающий высоту дефекта h_D ; $b_D = (b_1 - b_2) = f(\mu_D)$ – УП, отражающий магнитную проницаемость дефекта μ_D .

В соответствии с полученным аналитическим выражением (11) выбирается необходимый алгоритм преобразования выходного сигнала ИД и соответствующая структура его аппаратной реализации, которые в своей совокупности позволяют без особых сложностей идентифицировать тип дефекта и определять его геометрические и физико-химические характеристики.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённые натурные исследования нового метода НК подтвердили эффективность использованного феноменологического подхода при его разработке и высокую информативность самого метода НК.

Дефектоскоп, использующий «гибридный» тип ИД, обладает малыми габаритами, малым весом и автономным питанием. При этом ОК не потребует дополнительного намагничивания до технического насыщения. Все это позволяет производить оперативную техническую диагностику на работающем оборудовании, что в свою очередь имеет огромное значение для нужд промышленной безопасности.

Широкое использование нового метода НК и «гибридного» типа ИД при дефектоскопическом контроле СК в составе уже существующих компьютеризированных диагностических систем обеспечит соответствующее повышение достоверности обнаружения ЛД и снижение погрешности измерения ПС СК за счет информационной избыточности и алгоритмизации обработки измерительной информации, что, в конечном счете, позволит реализовать детальный анализ результатов дефектоскопии и организовать соответствующий мониторинг за динамикой износа и повреждения СК.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Малиновский В.А. Стальные канаты. Одесса: Астропринт, 2001. 190 с.
2. Бережинский В.И., Шатило А.Н. Канаты шахтных подъемных установок. М.: Университетская книга, 2015. 232 с.
3. Хальфин М.Н. и др. Безопасная эксплуатация, контроль и браковка стальных канатов. Новочеркасск: НГТУ, 1995. 184 с.
4. Пузин В.С. Устройства контроля состояния стальных канатов. М.: LAP Lambert Academic Publishing, 2012. 152 с.
5. Неразрушающий контроль: справочник: в 8 т. / под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 6: в 3 кн. Кн. 1: Клюев В.В., Мужикский В.Ф., Горкунов Э.С., Щербинин В.Е. Магнитные методы контроля. Кн. 2: Филинов В.Н., Кеткович А.А., Филинов М.В. Оптический контроль. Кн. 3: Матвеев В.И. Радиоволновой контроль. 2-е изд., испр. М.: Машиностроение, 2006. 832 с.
6. Tian J., Zhou J., Wang H., Meng G. Literature review of research on the technology of wire rope nondestructive inspection in China and abroad. International Conference on Engineering Technology and Application (ICETA 2015). Volume 22, 2015. doi: org/ 10.1051/mateconf/20152203025.
7. Клюев В. В. Неразрушающий контроль и диагностика. Справочник. – М.: Машиностроение, 2003. 656 с.
8. Jomdecha C., Prateepasen A. Design of modified electromagnetic main-flux for steel wire rope inspection. NDT E Int. 2009;42:77–83. doi: 10.1016/j.ndteint.2007.10.006.
9. Брякин И.В. Феррозонд с парафазным возбуждением // Проблемы автоматизации и управления. Бишкек: Илим, 2012. №1. С. 105–116.
10. Брякин И.В. Магнитодинамический магнитометр для задач дефектоскопии // Мехатроника, автоматизация, управление. М: Новые технологии, 2013. №3. С. 35–41.
11. Брякин И.В. Электродинамический модулятор на базе С-антенны // Проблемы автоматизации и управления. Бишкек: Илим, 2012. №1. С. 117–127.

Поступила в редакцию 20 марта 2017 г.

INFORMATION IN ENGLISH

MEASURING SENSOR FOR SYSTEMS OF NON-DESTRUCTIVE TESTING OF STEEL ROPES

Ivan V. Bryakin

D.Sc. (Eng.), Senior Researcher, Institute of Automation and Information Technology, National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic, Bishkek, Kyrgyz Republic. E-mail: bivas2006@yandex.ru

Igor V. Bochkarev

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

The results of the analytical review of well-known methods and technical means of nondestructive testing (NDT) of steel wire ropes are given. The operational capabilities and features of the functioning of this NDT equipment are considered. The results of the analysis showed that it is necessary to develop new approaches in the field of creating measuring sensors for the systems of technical control and diagnostics of steel ropes. The possibility of creating a new type of "hybrid" NDT method with extended functionality is substantiated on the basis of the ferrosonde. Unlike the traditional ferroprobe method, which uses the modulating action of an alternating magnetic field, the source of which is a multi-turn coil (magnetic dipole), the developed "hybrid" method is based on the use of a vibrator antenna (electric dipole) as a modulator, which initiates magnetoelectric processes in a ferromagnetic medium. In the proposed new method of NDT and its schematic implementation, several physical effects are used simultaneously: the effect of the defect on the character of the spatial distribution of the magnetic flux in the medium; the influence of the defect on the value of the transformer electromotive force; the influence of the defect on the magnitude of the magnetomodulation electromotive force. In fact, the proposed NDT method combines the features of three magnetic NDT methods: a constant magnetic field, an alternating magnetic field, and a ferro-probe method. Application of the proposed algorithmic processing of the measurement results of the output signal of the induction sensor makes it possible to identify the type of defect and to determine its geometric and physicochemical characteristics.

Keywords: Steel rope, non-destructive testing, defect, flaw detector, measuring sensor, magnetosensitive element, magnetic field, ferrosonde, modulator, vibrator antenna.

REFERENCES

1. Malinovskiy V.A. Steel ropes. Odessa, Astroprint, 2001. 190 p.
2. Berezzhinsky V.I., Shatilo A.N. Ropes of mine hoisting installations. Moscow: University Book, 2015. 232 p.
3. Khalfin M.N., et al. Safe operation, control and rejection of steel ropes. Novocherkassk: NSTU, 1995. 184 p.
4. Puzin V.S. Control devices for the state of steel ropes. Moscow: LAP Lambert Academic Publishing, 2012. 152 p.
5. Non-destructive testing: Handbook: in 8 volumes / Under the general editorship of V.V. Klyuev. Vol. 6: in 3 books. Book. 1: Klyuev V.V., Muzhitskiy V.F., Gorkunov E.S., Shcherbinin V.E. Magnetic methods of control. Book. 2: Filinov V.N., Ketkovich A.A., Filinov M.V. Optical control. Book. 3: Matveyev V.I. Radiowave control. 2 nd ed., Rev. Moscow: Mechanical Engineering, 2006. 832 p.
6. Tian J., Zhou J., Wang H., Meng G. Literature review of research on the technology of wire rope nondestructive inspection in China and abroad. International Conference on Engineering Technology and Application (ICETA 2015). Volume 22, 2015. doi.org/ 10.1051/mateconf/20152203025.
7. Klyuev V.V. Non-destructive testing and diagnostics. Reference book. Moscow: Machine-building, 2003. 656 p.
8. Jomdecha C., Prateepasen A. Design of modified electromagnetic main-flux for steel wire rope inspection. NDT E Int. 2009;42:77–83. doi: 10.1016/j.ndteint.2007.10.006.
9. Bryakin I.V. *Ferrozond s parafaznym vozvuzhdeniem* [Ferrozond with paraphase excitation]. Problems of automatics and control. Bishkek: Ilim, 2012, no. 1, pp. 105–116.
10. Bryakin I.V. *Magnitodinamicheskiy magnitometr dlya zadach defektoskopii* [Magnetodynamic magnetometer for flaw detection problems]. Mechatronics, automation, control. M: New technologies, 2013. no. 3, pp. 35–41.
11. Bryakin I.V. *Elektrodinamicheskiy modulyator na baze C-antenny* [Electrodynamic modulator based on the C-antenna]. Problems of automation and control. Bishkek: Ilim, 2012. no. 1, pp. 117–127.

Брякин И.В., Бочкарев И. В. Измерительный датчик для систем неразрушающего контроля стальных канатов // Электротехнические системы и комплексы. 2017. № 2 (35). С. 49–54. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-2\(35\)-49-54](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-2(35)-49-54)

Bryakin I.V., Bochkarev I.V. Measuring Sensor for Systems of Non-destructive Testing of Steel Ropes. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2017, no. 2 (35), pp. 49–54. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-2\(35\)-49-54](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-2(35)-49-54)

Парсункин Б.Н., Самарина И.Г.

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

СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕГО УПРАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО РЕЖИМА НАГРЕВАТЕЛЬНОЙ МЕТОДИЧЕСКОЙ ПЕЧИ

В работе рассматривается синтез автоматической системы управления на основе экспериментально-статистической модели газодинамического режима работы методической печи в условиях практической реализации энергосберегающего способа распределения тепловых нагрузок по зонам нагрева, когда в томильную зону подается до 40% общей тепловой нагрузки печи. Рассмотрено планирование и организация реализации полного факторного активного эксперимента ПФЭ 2^5 в реальных промышленных условиях в четырехзонной методической печи. Приведены результаты реализации плана и статистической оценки полученных результатов для синтеза адекватных моделей распределения давления по длине рабочего пространства с целью выбора наиболее представительного отбора давления для системы автоматического управления газодинамическим режимом рабочего пространства. Реализация предлагаемого в работе метода выбора отбора давления позволила реально, практически без затрат, уменьшить величину удельного расхода условного топлива на 1,7 кг/т при автоматическом управлении газодинамическим режимом методической печи.

Ключевые слова: газодинамический режим, давление, активный полный факторный эксперимент, статистические оценки, математические модели, эффективность, место отбора давления

ВВЕДЕНИЕ

При производстве широкополосного горячекатаного проката из качественных марок стали для оборонной, судостроительной, трубной и других отраслей промышленности затрачивается примерно 20% потребляемого металлургией дорогостоящего природного газа.

Поэтому решение задачи энергосбережения при нагреве металла перед прокаткой является перспективной и актуальной проблемой.

Теоретически обоснованно: если есть резерв печи по производительности, то для минимизации затрат топлива необходимо интенсифицировать нагрев на заключительном интервале общего времени нагрева [1]. Реально при нестационарных режимах работы прокатного стана, когда часовая производительность изменяется от 100 до 1000 т/ч, интенсивный нагрев начинается сразу при входе металла в зоны нагрева. Такой затратный типовой режим сохраняется и при работе печи при малой производительности.

Единственным известным примером реального практического применения энергосберегающего режима нагрева являются печи листопрокатного стана 2800 металлургического комбината г. Новотроицка (бывший ОХМК). На этих печах в томильные зоны подается более 40% от общего расхода топлива на печь, а температура продуктов сгорания на выходе из печи на 200–250°C ниже, чем у печей равной производительности, работающих по типовым затратным режимам, когда в томильные зоны подается 12–15% топлива от общего на печь.

Газодинамический режим работы методической печи, определяющий распределение давления в рабочем пространстве, оказывает заметное влияние на величину тепловых потерь с выбиваниями горячих продуктов горения и с подсосами холодного атмосферного воздуха. Для минимизации тепловых потерь необходима математическая модель газодинамического режима.

В работе рассмотрены результаты практической реализации системы автоматического управления давлением в рабочем пространстве печи на основе экспе-

риментально-статистической модели газодинамического режима четырехзонной методической печи, работающей в режиме энергосберегающего распределения топлива по зонам нагрева.

ОРГАНИЗАЦИЯ И ПРОВЕДЕНИЕ АКТИВНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО РЕЖИМА МЕТОДИЧЕСКОЙ ПЕЧИ

Необходимая исходная информация для создания экспериментально-статистической модели газодинамического режима четырехзонной методической печи получена в результате проведения активного эксперимента на печи №3 стана 2800 листопрокатного цеха.

Перед разработкой плана активного эксперимента на основе априорной информации были выявлены факторы, влияющие на величину давления по длине рабочего пространства печи. Этими факторами являются: расходы топлива в каждую зону нагрева и угол поворота дымового клапана. Расходы воздуха на каждую зону не учитывались, поскольку инжекционные горелки и схемы индивидуального регулирования соотношения топливо-воздух автоматически изменяют расходы воздуха при изменении расходов топлива [2].

Переменными состояниями (выходными величинами модели) являются величины давления Y_j , одновременно измеряемые с использованием микроманометров с наклонной трубкой типа ММН, в шести точках по длине $j = 1, 2, \dots, 6$ рабочего пространства печи. На уровне нагреваемого металла [3].

Варьируемыми факторами являются: X_1 – расход газа в томильную зону, м³/ч; X_2 – расход газа во вторую сварочную зону, м³/ч; X_3 – расход газа в первую сварочную зону, м³/ч; X_4 – расход газа в нижнюю зону, м³/ч; X_5 – угол поворота дымового клапана, % хода.

Расположение точек измерения давления Y_j и факторов X_i при проведении активного эксперимента представлены на **рис. 1**.

Таблица 1

Матрица планирования и реализация ПФЭ 2⁵

Но- мер опы- та	Факторы						Опыт 1					
	X ₀	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y ₄	Y ₅	Y ₆
1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	-0,6	-0,8	-0,4	-1,0	-1,6	-0,2
2	+1	-1	+1	+1	+1	+1	-0,2	-0,8	-0,5	0,4	-1,4	-0,2
3	+1	+1	-1	+1	+1	+1	0,4	-0,6	-0,2	-0,2	-1,2	-0,1
4	+1	-1	-1	+1	+1	+1	-0,1	-0,4	-0,6	-0,1	-1,0	-0,2
5	+1	+1	+1	-1	+1	+1	-0,1	-0,3	-0,1	-0,1	-1,4	-2,8
6	+1	-1	+1	-1	+1	+1	0,0	-0,5	-0,6	-0,4	-0,8	-2,2
7	+1	+1	-1	-1	+1	+1	-0,1	-0,4	-0,2	-0,4	-1,4	-0,5
8	+1	-1	-1	-1	+1	+1	-0,2	-0,6	-0,5	-0,8	-1,4	-0,6
9	+1	+1	+1	+1	-1	+1	-0,1	-0,2	-0,2	-0,3	-1,2	-2,4
10	+1	-1	+1	+1	-1	+1	-0,2	-0,5	-0,6	-0,5	-1,8	-2,8
11	+1	+1	-1	+1	-1	+1	0,2	-0,1	-0,3	-0,2	-1,6	-2,2
12	+1	-1	-1	+1	-1	+1	-0,1	-0,5	-0,6	-0,8	-2,0	-1,2
13	+1	+1	+1	-1	-1	+1	-0,1	-0,2	-0,1	-0,4	-1,4	-2,2
14	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-0,2	-0,8	-0,6	-0,8	-0,8	-2,8
15	+1	+1	-1	-1	-1	+1	0,1	-0,1	-0,2	-0,6	-1,2	-2,4
16	+1	-1	-1	-1	-1	+1	0,0	-0,4	-0,6	-0,8	-1,4	-2,8
17	+1	+1	+1	+1	+1	-1	0,4	0,5	0,6	0,6	-0,6	-1,8
18	+1	-1	+1	+1	+1	-1	0,0	-0,2	0,4	0,1	-0,8	-2,2
19	+1	+1	-1	+1	+1	-1	0,5	0,4	0,4	0,5	-0,8	-2,8
20	+1	-1	-1	+1	+1	-1	0,2	0,1	0,6	0,2	-1,0	-0,3
21	+1	+1	+1	-1	+1	-1	0,6	0,4	0,8	0,4	-0,6	-1,8
22	+1	-1	+1	-1	+1	-1	0,4	-0,1	0,2	0,1	-0,6	-2,4
23	+1	+1	-1	-1	+1	-1	1,0	0,4	-0,6	0,3	-0,5	-2,0
24	+1	-1	-1	-1	+1	-1	0,3	0,2	0,2	0,0	-0,7	-2,2
25	+1	+1	+1	+1	-1	-1	0,8	0,4	0,4	0,4	-0,8	-1,8
26	+1	-1	+1	+1	-1	-1	0,1	-0,1	0,2	0,2	-1,2	-2,2
27	+1	+1	-1	+1	-1	-1	0,6	-0,2	0,2	0,6	-0,8	-1,8
28	+1	-1	-1	+1	-1	-1	0,4	-0,2	-0,1	-0,3	-1,0	-1,2
29	+1	+1	+1	-1	-1	-1	0,0	-1,2	-0,2	0,30	0,6	-1,6
30	+1	-1	+1	-1	-1	-1	0,0	-0,1	0,1	0,2	-0,9	-2,2
31	+1	+1	-1	-1	-1	-1	0,8	0,3	0,5	0,0	-0,5	-1,8
32	+1	-1	-1	-1	-1	-1	0,0	0,0	-1,8	-0,1	-0,6	-2,2

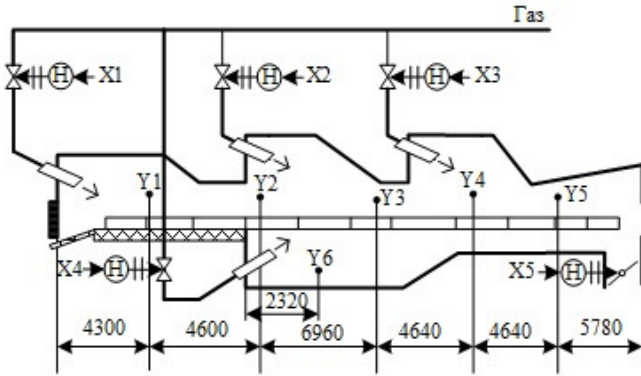


Рис. 1. Расположение точек отбора давления по длине печи и выбранных факторов

Выбраны нулевые уровни факторов X_{i0} и осуществлено их кодирование в соответствии с данными для верхних и нижних уровней при проведении эксперимента $X_{10}=5250 \text{ м}^3/\text{ч}$; $X_{20}=3900 \text{ м}^3/\text{ч}$; $X_{30}=2650 \text{ м}^3/\text{ч}$; $X_{40}=1100 \text{ м}^3/\text{ч}$; $X_{50}=74 \text{ м}^3/\text{ч}$.

$$X_{1B} = \frac{6500 - 5250}{1250} = +1; \quad X_{1H} = \frac{4000 - 5250}{1250} = -1;$$

$$X_{2B} = \frac{4700 - 3900}{800} = +1; \quad X_{2H} = \frac{3100 - 3900}{800} = -1;$$

$$X_{3B} = \frac{3500 - 2650}{900} = +1; \quad X_{3H} = \frac{1750 - 2650}{900} = -1;$$

$$X_{4B} = \frac{1500 - 1100}{400} = +1; \quad X_{4H} = \frac{700 - 1100}{400} = -1;$$

$$X_{5B} = \frac{98 - 74}{24} = +1; \quad X_{5H} = \frac{50 - 74}{24} = -1.$$

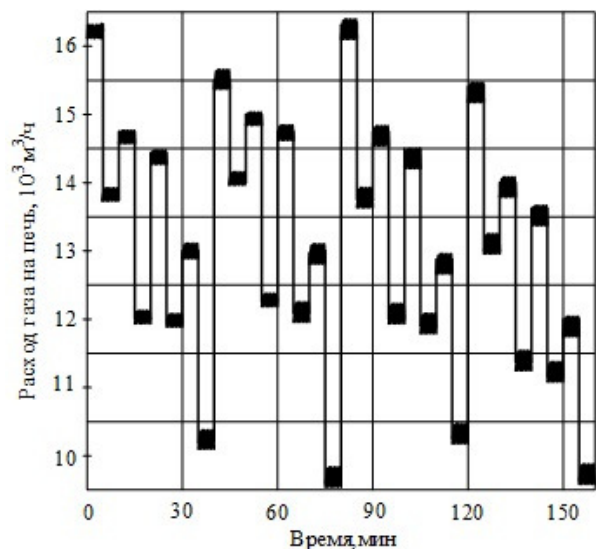
Для реализации полного факторного эксперимента (ПФЭ) в факторном пространстве выбираем область проведения эксперимента со следующими интервалами варьирования относительно нулевого уровня $\Delta X_1=1250 \text{ м}^3/\text{ч}$; $\Delta X_2=800 \text{ м}^3/\text{ч}$; $\Delta X_3=900 \text{ м}^3/\text{ч}$; $\Delta X_4=400 \text{ м}^3/\text{ч}$; $\Delta X_5=25 \text{ м}^3/\text{ч}$.

На печи №3 реализован ПФЭ 2⁵ при отсутствии выдачи металла из печи во время ремонта стана [4, 5] при точном соблюдении плана реализации эксперимента без рандомизации опытов.

Матрица планирования и реализация ПФЭ 2⁵ представлена в табл. 1 [6].

Изменение во времени общего расхода газа на печь в период проведения одного ПФЭ 2⁵ представлено на рис. 2.

Для исключения оплавления находящегося в печи металла при проведении эксперимента ПФЭ 2⁵ изменение расхода топлива по зонам осуществлялось в направлении от максимального до минимального при продолжительности каждого опыта 5 мин. Продолжительность каждого эксперимента составила 160 мин. Общая продолжительность дублированного ПФЭ 2⁵ – 320 мин.

Рис. 2. Изменение во времени общего расхода газа на печь в период реализации одного из дублированных ПФЭ 2⁵

СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА И ОБРАБОТКА
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

В качестве экспериментально-статистической модели исследуемого процесса использованы линейные полиномы, определяющие зависимость давления в выбранной точке рабочего пространства $\hat{Y}_j$ от величины различных изменений учитываемых факторов X_i [5].

$$\hat{Y}_j = b_0 + b_1 X_1 + \dots + b_i X_i, \quad (1)$$

где b_i – коэффициенты уравнения; i – индекс влияющего фактора, равен 0, 1, 2... 5; j – индекс переменной состояния (давления), равен 1, 2... 6.

Прежде чем осуществлять расчеты коэффициентов уравнения (1), необходимо оценить воспроизводимость экспериментальных данных (репрезентативность).

Эта операция осуществляется с использованием критерия Кохрена-Г следующим образом [4, 8].

Рассчитываются построчные средние значения выходной переменной $\bar{Y}_j$.

$$\bar{Y}_j = \frac{1}{n} \sum_{q=1}^n Y_{jq}, \quad (2)$$

где $\bar{Y}_j$ – среднее арифметическое переменной состояния в i -м опыте ($i = 1, 2, \dots$); N – количество опытов при ПФЭ 2^5 ; n – количество дублированных экспериментов.

Осуществляется расчет ошибки опыта или дисперсии воспроизводимости по формуле

$$S_i^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (Y_{jq} - \bar{Y}_j)^2. \quad (3)$$

Расчетное значение критерия Кохрена G_p определяется по выражению

$$G_p = \frac{(S_i^2)_{\max}}{\sum_{i=1}^N S_i^2}, \quad (4)$$

где $(S_i^2)_{\max}$ – максимальное значение дисперсии в опытах для определенной точки рабочего пространства печи.

Расчетное значение G_p сравнивается с табличным G_T , определяется по таблице [2] для степеней свободы $f_1 = n-1$, $f_2 = N$ и при уровне значимости 0,05.

Условие воспроизводимости экспериментальных данных проверяем для каждой точки:

$$G_p \leq G_T, \quad (5)$$

Если условие (5) выполняется, то результаты эксперимента воспроизводимы. В противном случае статистические методы обработки результатов применять нельзя. Нужно выяснить источник ошибки и повторить эксперимент. Очень часто эта необходимая процедура оценки воспроизводимости экспериментального материала не осуществляется, и это причина ошибок в оценке результатов, полученных с использованием

различных компьютерных программ [8].

После определения коэффициентов уравнения (1) осуществляются статистические стандартные оценки: их значимости по критерию Стьюдента t_i ; проверка математической модели на адекватность по критерию Фишера F . Этот критерий позволяет проверить гипотезу об однородности двух выборочных дисперсий:

$$F_p = \frac{S_{ad}}{S_i^2}. \quad (6)$$

Полученные результаты представлены в табл. 2 для каждой точки рабочего пространства печи.

Полученные модели позволяют оценить влияние каждого фактора на давление в исследуемой точке по длине рабочего пространства печи.

$$\hat{Y}_1 = 0,144 + 0,128 X_1 - 0,072 X_2 + 0,001 X_3 - 0,022 X_4 - 0,175 X_5;$$

$$\hat{Y}_2 = -0,108 + 0,092 X_1 - 0,008 X_2 + 0,045 X_3 + 0,011 X_4 - 0,193 X_5;$$

$$\hat{Y}_3 = -0,061 + 0,133 X_1 + 0,083 X_2 + 0,092 X_3 + 0,123 X_4 - 0,233 X_5;$$

$$\hat{Y}_4 = 0,078 + 0,128 X_1 + 0,109 X_2 + 0,109 X_3 + 0,119 X_4 - 0,222 X_5;$$

$$\hat{Y}_5 = -0,660 + 0,049 X_1 - 0,045 X_2 - 0,171 X_3 - 0,074 X_4 - 0,343 X_5;$$

$$\hat{Y}_6 = -1,986 + 0,086 X_1 - 0,095 X_2 + 0,186 X_3 + 0,139 X_4 - 0,203 X_5.$$

Представленные модели по критерию Фишера, кроме Y_3 , несмотря на значительные изменения этих критериев, адекватны, и полученные уравнения можно использовать для решения производственных задач.

Наиболее значимыми для всех точек по длине печи оказались: угол поворота дымового клапана (фактор X_5) и расход топлива в зону с максимальным расходом (фактор X_1) [2, 7].

Таблица 2
Результаты статистической оценки эксперимента

j	$G_p, f = n-1$	$t_i, f = N(n-1)$	$F_p, f_1 = N-d$ $f_2 = N(n-1)$
	$G_T = 0,2929$	$t_T = 2,040$	$F_T = 1,840$
1	0,2645	4,182; 3,737; 2,091; 0,000; 0,636; 5,091	1,706
2	0,3353	1,884; 1,611; 0,137; 0,792; 0,191; 3,412	1,136
3	0,3195	1,559; 3,397; 2,118; 2,358; 3,317; 5,955	5,500
4	0,4433	1,385; 2,271; 1,939; 1,939; 2,105; 3,932	1,705
5	0,2880	5,341; 0,400; 0,384; 1,386; 0,602; 2,777	0,650
6	0,1370	13,856; 0,600; 0,665; 1,297; 0,970; 0,142	0,627

КРИТЕРИЙ И ВЫБОР ПРЕДСТАВИТЕЛЬНОГО МЕСТА ОТБОРА ИМПУЛЬСА ДАВЛЕНИЯ ДЛЯ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИМ РЕЖИМОМ МЕТОДИЧЕСКОЙ ПЕЧИ

В качестве критерия при выборе представительного (наилучшего) места отбора импульса давления для системы автоматического управления газодинамическим режимом методической печи была принята максимальная чувствительность отбора давления на изменение расходов топлива по зонам и на изменение положения дымового клапана с учетом количества продуктов горения через j -е сечение рабочего пространства.

Определение количественной оценки принятого критерия I_j осуществляется в соответствии с выражением

$$I_j = \frac{\sum_{i=0}^{L-1} \Delta \hat{Y}_j / \Delta X_i}{(\Delta Y_j / \Delta X_s) \cdot Q_j}, \quad (7)$$

где i – номер значимого варьируемого фактора, кроме X_s ; L – количество значимых факторов уравнения регрессии для j -й переменной состояния; $\Delta \hat{Y}_j / \Delta X_i$ – изменение переменной (давления в рабочем пространстве) в j -й точке, вызванное изменением расхода газа (X_i – факторы) на соответствующую зону $\text{кг/м}^2/\text{м}^3/\text{ч}$; $\Delta Y_j / \Delta X_s$ – изменение давления в j -й точке по длине печи, вызванное изменением положения дымового клапана (X_s – фактор); $Q_j = \frac{V_{j\max}}{V_{\max}}$ – доля максимально возможного расхода продуктов сгорания через j -е сечение рабочего пространства по отношению к максимально возможному расходу продуктов сгорания, общему на печь.

$$V_{\max} = (X_{1B} + X_{2B} + X_{3B} + X_{4B}) \cdot W_T, \quad (8)$$

где W – количество продуктов сгорания, образующихся при сжигании единицы (1 м^3) топлива с определенным коэффициентом расхода воздуха.

Например, расчет принятого критерия оптимальности для томильной зоны [7, 9] будет таким:

$$\begin{aligned} \hat{Y}_1 &= 0,144 + 0,128X_1 - 0,072X_2 + \\ &+ 0,001X_3 - 0,022X_4 - 0,175X_5, \\ Q_j &= \frac{V_{1\max}}{V_{\max}} = \frac{6500 \text{ м}^2/\text{ч}}{162000 \text{ м}^2/\text{ч}} = 0,4, \\ I_1 &= \frac{0,144 + 0,128 - 0,072 + 0,001}{-0,175 \cdot 0,4} = -2,838. \end{aligned}$$

Критерием оптимальности выбрано условие

$$|I_j| \rightarrow \max, \quad (9)$$

По физическому смыслу коэффициент b_{0j} при факторе X_0 соответствует эксперименту с поддержанием всех варьируемых факторов на средних (опорных) уровнях [5, 10–13]. Поэтому (при выполнении

условия значимости) он учитывается при расчете I_j .

С учетом соблюдения правил статистической оценки достоверности уравнений регрессии величины оценок критерия имеют вид: $I_1=2,838$; $I_2=0$; $I_3=-1,256$ (при неадекватной модели); $I_4=-2,125$; $I_5=2,173$; I_6 – не рассчитывается.

В соответствии с принятым условием (9) наиболее представительным местом отбора импульса давления для условий методических печей стана 2800 ЛПЦ является участок томильной зоны между вторым и третьим смотровыми окнами, считая от окна выдачи.

Поскольку наиболее чувствительным к изменению расходов газа и степени открытия дымового клапана является отбор в точке Y_1 , то проверка соответствия расчетного значения $\hat{Y}_1$ и действительного давления $Y_1(\tau)$ проведена для данной точки рабочего пространства.

На рис. 3 показаны изменения расчетного (прогнозируемого) $P_{\text{прогн}}$ и измеренного давления $P_{\text{измер}}$ во времени.

Прогнозируемое (расчетное) и измеренное значения давления удовлетворительно совпадают.

Величина максимального абсолютного отклонения модели и реального процесса в пределах опыта не превышает $0,125 \text{ кг/м}^2$ ($1,226 \text{ Н/м}^2$).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты ПФЭ позволяют сделать обоснованный вывод: отбор импульса давления для системы автоматического управления газодинамическим режимом методической печи следует осуществлять на 200–300 мм ниже уровня, нагреваемого металла в зоне, куда подается максимальное количество топлива.

Эта рекомендация была реализована на печах с типовым распределением тепловых нагрузок широкополосного стана ОАО «ММК».

Перенос типового отбора давления со свода томильной зоны (12–15% тепловой нагрузки печи) на уровень нагреваемого металла во вторую сварочную зону (35–45% тепловой нагрузки печи) и автоматическое управление газодинамическим режимом печей широкополосного стана горячей прокатки ОАО «ММК» позволило практически без затрат уменьшить на 1,7 кг/т удельный расход условного топлива, получив значительный экономический эффект, при существенном улучшении условий обслуживания отбора давления по сравнению с расположением на своде печи.

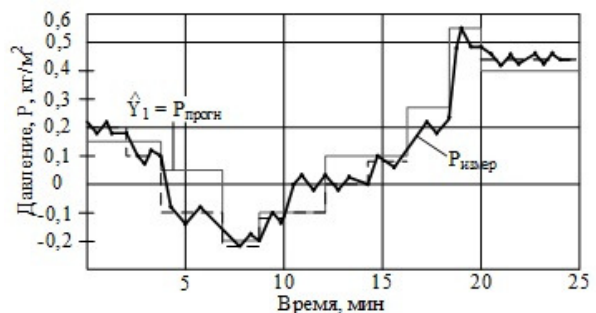


Рис. 3. Изменение прогнозируемого $P_{\text{прогн}}$ и измеренного $P_{\text{измер}}$ давления в томильной зоне печи стана 2800

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреев С.М., Парсункин Б.Н. Оптимизация режимов управления нагревом в печах проходного типа: монография. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2013. 375 с.
2. Статистическое исследование и моделирование экономических и технологических процессов металлургического производства: учеб. пособие / Парсункин Б.Н., Бушманова М.В., Андреев С.М. и др. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2007. 315 с.
3. Yan A. Hybrid intelligent control of combustion process for ore-roasting furnace / A. Yan, T. Chai, F. Wu, P. Wang // *Journal of Control Theory and Applications*. 2008. Vol. 6, no. 1. P. 80–85.
4. Paul D. Berger, Samuel C. Hanna, Robert E. Maurer 101 Special Practice Problems in Probability and Statistics. Marsh Publications, 2005. 288 p.
5. Цимбал В.П. Математическое моделирование металлургических процессов: учеб. пособие. М.: Металлургия, 1986. 240 с.
6. Самарина И.Г., Мухина Е.Ю., Бондарева А.Р. Статистическая модель газодинамического режима методической печи // *Современные проблемы науки и пути их решения: сборник научных статей*. 2016. №28. С. 56–59.
7. Парсункин Б.Н., Дегтярев В.В. Определение места отбора импульса для управления давлением в рабочем пространстве методической печи // *Известия вузов. Черная металлургия*. 1992. №11. С. 63–65.
8. Налимов В.В. Теория эксперимента. М.: Наука, 1971. 208 с.
9. Парсункин Б.Н., Бондарева А.Р., Полухина Е.И. Выбор температурного параметра для оперативного управления нагревом металла в методических печах // *Автоматизированные технологии и производства*. 2015. № 1 (7). С. 9–12.
10. Васильев М.И., Парсункин Б.Н., Андреев С.М. Способ энергосберегающего нечёткого управления процессом горения в тепловых установках // *Автоматизированные технологии и производства*. 2016. № 1 (11). С. 66–73.
11. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1976. 202 с.
12. William P. Gardiner, G. Gettinby *Experimental Design Techniques in Statistical Practice: A Practical Software-Based Approach*. Philadelphia: Woodhead Published Limited, 1998. 392 p.
13. E.L. Lehmann, J.P. Romano. Chapter 9: Multiple testing and simultaneous inference // *Testing statistical hypotheses*. 3rd ed. New York: Springer, 2005. 786 p.

Поступила в редакцию 09 марта 2017 г.

INFORMATION IN ENGLISH

AUTOMATIC ENERGY-SAVING CONTROL SYSTEM BASED ON A MATHEMATICAL MODEL OF THE GAS-DYNAMIC MODE OF A CONTINUOUS FURNACE

Boris N. Parsunkin

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

Irina G. Samarina

Assistant Professor, Automated Control Systems Department, Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: ig_samarina@inbox.ru

The paper is concerned with the synthesis of the automatic control system based on the experimental statistical model of the gas-dynamic operating mode of a continuous furnace in the process of practical implementation of the energy-saving method of heat load distribution by the heating zones, when up to 40% of the total heat load of the furnace is supplied to the soaking zone.

Planning and implementation of the complete active 2^5 factorials were considered for a four-zone continuous furnace under actual operating conditions. The paper describes the results of the plan implementation and the statistical appraisal of obtaining the results to develop adequate models of pressure distribution along the furnace working chamber in order to choose the most representative pressure take-off for the automatic control system of the gas-dynamic mode in the working zone.

Implementation of the suggested method of pressure take-off made it possible, without any significant costs, to decrease the specific consumption of the fuel equivalent value by 1.7 kg/t when the automatic control of gas-dynamic mode of a continuous furnace is applied.

Keywords: Gas-dynamic mode, pressure, active complete factorial, statistical appraisal, mathematical models, efficiency, pressure take-off point.

REFERENCES

1. Andreev S.M., Parsunkin B.N. *Optimizatsiya rezhimov upravleniya nagrevom v pechakh prokhodnogo tipa: monografiya* [Optimization of Control Modes of Heating Through-type Furnaces. Monograph]. Magnitogorsk, Nosov Magnitogorsk State Technical University Publ., 2013, 375 p. (In Russian)
2. Parsunkin B.N., Bushmanova M.V., Andreev S.M. *Statisticheskoe issledovanie i modelirovanie ekonomicheskikh i tekhnologicheskikh protsessov metallurgicheskogo proizvodstva* [Statistical research and modeling of economic and technological processes of metallurgical production. Tutorial]. Magnitogorsk, Nosov Magnitogorsk State Technical University Publ., 2007, 315 p. (In Russian)
3. Yan A. Chai T., Wu F., Wang P. Hybrid intelligent control of combustion process for ore-roasting furnace. *Journal of Control Theory and Applications*. 2008. Vol. 6, no. 1. pp. 80–85.
4. Paul D. Berger, Samuel C. Hanna, Robert E. Maurer 101 Special Practice Problems in Probability and Statistics. Marsh Publications, 2005. 288 p.
5. Tsimbal V.P. *Matematicheskoe modelirovanie metallurgicheskikh protsessov* [Mathematical modeling of metallurgical processes. Tutorial]. Moscow, Metallurgizdat Publ., 1986. 240 p.
6. Parsunkin B.N., Degtyarev V.V. Determination of pulse selection space to control the pressure in the working space continuous furnace. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya*

- [Steel in Translation], 1992, no.11, pp. 63–65. (In Russian)
7. Nalimov V.V. *Teoriya eksperimenta* [The theory of the experiment]. Moscow, Nauka Publ., 1971. 208 p. (In Russian)
8. Samarina I.G., Mukhina E.Yu., Bondareva A.R. Statistical model of gas-dynamic mode of a continuous furnace. *Sovremennye problemy nauki i puti ikh resheniya* [Modern problems of science and their solutions], 2016, no. 28, pp. 56–59. (In Russian)
9. Parsunkin B.N., Bondareva A.R., Polukhina E.I. Selecting the temperature setting for the operational control of metal heating in continuous furnaces. *Automation of technological and production processes in metallurgy*, 2015, no. 1(7), pp. 9–12. (In Russian)
10. Vasilyev M.I., Parsunkin B.N., Andreev S.M. Energy-saving method of fuzzy control of combustion process in thermal plants. *Automation of technological and production processes in metallurgy*, 2016, no. 1(11), pp. 66–73. (In Russian)
11. Adler Yu.P., Markova E.V., Granovskiy Yu.V. *Planirovanie eksperimenta pri poiske optimalnykh usloviy* [Planning experiment in the search for optimal conditions]. Moscow, Nauka Publ., 1976. 202 p.
12. William P Gardiner, G Gettinby *Experimental Design Techniques in Statistical Practice: A Practical Software-Based Approach*. USA, Philadelphia: Woodhead Published Limited, 1998. 392 p.
13. E. L. Lehmann, J. P. Romano. Chapter 9: Multiple testing and simultaneous inference. *Testing statistical hypotheses*. 3rd edition: New York: Springer, 2005. 786 p.

Парсункин Б.Н., Самарина И.Г. Система автоматического энергосберегающего управления на основе математической модели газодинамического режима нагревательной методической печи // *Электротехнические системы и комплексы*. 2017. № 2 (35). С. 55–60. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-2\(35\)-55-60](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-2(35)-55-60)

Parsunkin B.N., Samarina I.G. Automatic Energy-saving Control System based on a Mathematical Model of the Gas-dynamic Mode of a Continuous Furnace. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2017, no. 2 (35), pp. 55–60. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-2\(35\)-55-60](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-2(35)-55-60)

Ишметьев Е.Н.¹, Чистяков Д.В.¹, Панов А.Н.¹, Бодров Е.Э.²¹ЗАО «КонсОМ СКС»²ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЯ ЗАЗОРОВ В ПОДШИПНИКАХ КАЧЕНИЯ

В работе предложена автоматизированная система измерения величины рабочего радиального зазора подшипника качения в процессе его эксплуатации. При эксплуатации узлов, подверженных воздействию трения, на их рабочих поверхностях протекают процессы изнашивания материала. В зависимости от величины прикладываемой к подшипнику нагрузки, скорости вращения внутреннего кольца, наличия смазки и абразивных частиц в ней, на поверхностях беговых дорожек и тел качения могут развиваться окислительное и абразивное изнашивание, усталостное выкрашивание, что приводит к ускоренному увеличению рабочего радиального зазора. Повышенное значение рабочего радиального зазора в процессе эксплуатации подшипника говорит об его износе. Пониженное значение рабочего радиального зазора также недопустимо, так как в этом случае может произойти заклинивание подшипника, что, в свою очередь, может привести к аварии и выходу дорогостоящего оборудования из строя. Из сказанного можно сделать вывод о том, что в ответственных узлах оборудования необходим постоянный мониторинг состояния подшипника, в том числе и величины его рабочего радиального зазора. В работе показана возможность автоматического измерения величины рабочего радиального зазора в подшипнике качения с помощью датчика вибрации, регистрирующего значения виброускорения, возникающего при вибрации внутреннего кольца подшипника, установленного на вращающийся вал. Расчет величины зазора производится программным путем после чтения по интерфейсу Ethernet значений измеренного виброускорения с устройств для анализа сигналов вибрации. Разработанная система при внедрении её в существующую систему вибродиагностики и мониторинга состояния промышленного объекта позволит повысить информативность диагностирования неисправностей подшипников качения как наиболее ответственного узла многих механизмов, используемых в промышленности.

Ключевые слова: радиальный зазор, измерение, автоматизированная система, мониторинг, вибродиагностика, рабочий зазор, подшипник качения, узел трения, поверхность качения, подшипниковая опора, виброускорение, виброперемещение.

ВВЕДЕНИЕ

При изготовлении подшипники качения имеют заданную величину осевого и радиального зазора, необходимую для его нормального функционирования. В зависимости от внешних условий, в которых находится подшипник, различают следующие три вида радиального зазора: начальный, посадочный и рабочий [1].

Начальным называется радиальный зазор в подшипнике до его установки на рабочее место. То есть это величина зазора, задаваемая при производстве подшипника и измеряемая при отсутствии нагрузки на него.

Посадочный зазор образуется после установки подшипника на его рабочее место. Отличие посадочного радиального зазора от начального связано с тем, что при установке подшипника на рабочее место, например в подшипниковую опору, внутренний диаметр наружного кольца уменьшается под действием внешних сжимающих сил со стороны опоры. А наружный диаметр внутреннего кольца увеличивается после его установки на вал под действием растягивающих сил со стороны вала. Действие описанных сил называется посадочным натягом. Под его воздействием в подшипнике либо остается некоторое значение радиального зазора, либо образуется натяг. Величина посадочного радиального зазора всегда меньше начального зазора.

Рабочий радиальный зазор возникает во время работы механизма, на который установлен подшипник, при установившемся температурном режиме, то есть когда все части механизма нагреются до своей рабочей температуры. Величина рабочего зазора может изме-

няться в процессе работы механизма как в большую, так и в меньшую сторону в связи с изменением температуры подшипникового узла. Кроме того, она может увеличиваться под действием приложенной к узлу нагрузки со стороны механизма.

При работе любых узлов трения на их рабочих поверхностях неизбежно протекают процессы изнашивания. В зависимости от нагрузки, скорости вращения, наличия смазочного материала и абразивных частиц в нём, на поверхностях беговых дорожек и тел качения могут развиваться окислительное и абразивное изнашивание, усталостное выкрашивание, приводящее к ускоренному увеличению зазоров.

Повышенное значение рабочего радиального зазора говорит об износе подшипника, что требует его замены. Пониженное значение радиального зазора также недопустимо, так как в этом случае может произойти заклинивание подшипника, что, в свою очередь, может привести к аварии и выходу дорогостоящего оборудования из строя.

Из сказанного можно сделать вывод о том, что в ответственных узлах оборудования необходим постоянный мониторинг состояния подшипника, в том числе и его радиального зазора. Исследованию вопросов динамики роторных машин с подшипниками качения посвящено множество работ [2–10].

МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ РАБОЧЕГО РАДИАЛЬНОГО ЗАЗОРА

Для определения эксплуатационных качеств подшипников качения, используемых в опорах двигателей и механизмов металлургической промышленности, необходимо периодическое измерение их радиального зазора. Для этой цели чаще всего применяют специальные шупы известной толщины, ко-

торые помещают в область образования зазора. Осуществление данного измерения требует остановки оборудования, на котором установлен подшипник, поэтому измерение радиального зазора производится в процессе разборки при ремонте или плановом техническом обслуживании [1, 11, 12].

При использовании данного метода, как правило, измеряются значения зазора в двух взаимно перпендикулярных радиальных направлениях при условии постоянства углового положения внутреннего и внешнего колец в пространстве. После этого значение зазора рассчитывается как среднее арифметическое двух измеренных значений. Использование данного метода основано на допущении о том, что наружный диаметр внутреннего кольца подшипника одинаков во всех радиальных направлениях. То же самое должно выполняться и для внутреннего диаметра наружного подшипника.

Каждое из измерений представляет собой расстояние, на которое одно из колец может быть смещено относительно другого в радиальной плоскости подшипника от эксцентрически крайнего в диаметрально противоположное эксцентрически крайнее положение. На рис. 1 показан случай равномерного зазора во всех радиальных направлениях.

На рис. 1 серым цветом выделена область возможного перемещения внутреннего кольца подшипника в радиальной плоскости. Для наглядности эта область изображена преувеличенной в размере.

На рис. 2 приведены три варианта радиального смещения внутреннего кольца относительно внешнего. Черными прямоугольниками обозначены места установки пьезоэлектрических датчиков виброускорения (датчики вибрации). На рис. 2, а показан посадочный радиальный зазор, который соответствует случаю, когда подшипник установлен на посадочное место и находится в состоянии покоя (частота вращения механизма равна нулю). Смещение внутреннего кольца в нижнее положение при этом возникает от действия силы тяжести на вал механизма, на который установлено это кольцо.

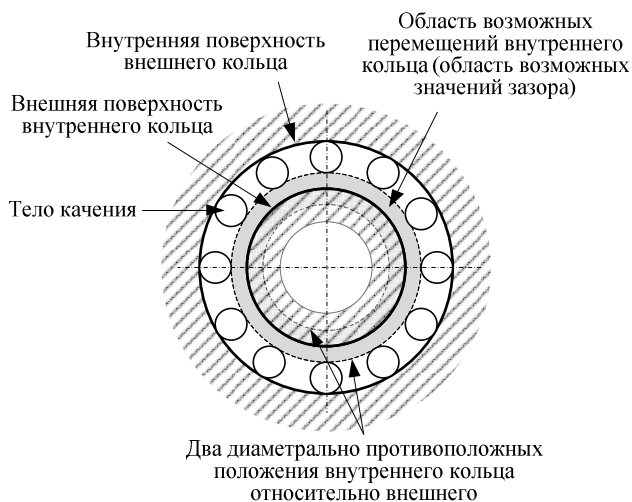


Рис. 1. Область смещений внутреннего кольца подшипника относительно внешнего в радиальной плоскости

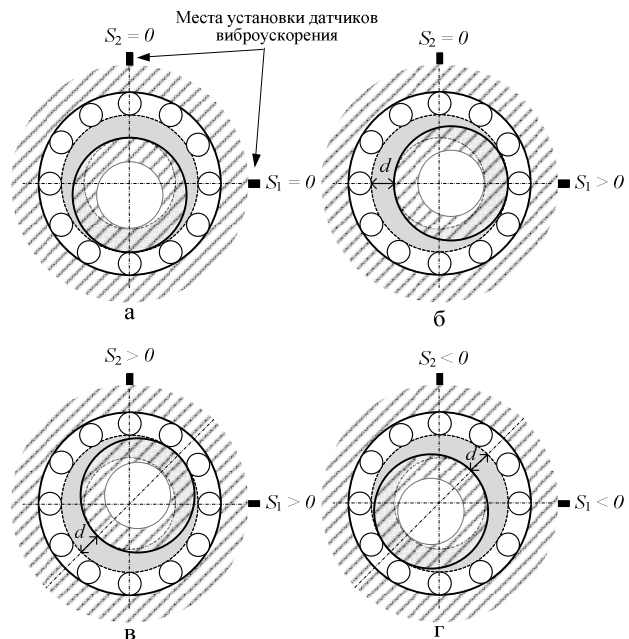


Рис. 2. Различные варианты смещения кольца

На рис. 2, б показан один из частных случаев возможного максимального смещения внутреннего кольца подшипника качения относительно внешнего. При этом значение виброперемещения, соответствующее величине виброускорения, измеренного первым датчиком вибрации, установленным горизонтально на подшипниковой опоре, будет иметь положительный знак и максимально возможное значение $S_1 = S_{1,max}$. Вследствие того, что величины смещения очень малы по сравнению с диаметром внутреннего кольца, показания второго датчика вибрации, установленного вертикально на подшипниковой опоре, можно принять равными нулю. При этом величина зазора d будет равна величине виброперемещения $S_{1,max}$, измеренного первым датчиком вибрации:

$$d = |S_{1,max}|. \quad (1)$$

Модуль в выражении (1) означает, что для вычисления радиального зазора знак виброперемещения не имеет значения.

На рис. 2, в, г показаны два других возможных частных случая максимального смещения внутреннего кольца, при которых датчиками вибрации будут зарегистрированы значения виброперемещения одинаковых знаков. Для обоих этих случаев зазор будет одинаков и не будет зависеть от знака виброперемещения. Из этого наблюдения можно сделать вывод о том, что знак виброперемещения не имеет значения и при расчетах необходимо брать по модулю величину смещения, зафиксированную датчиком вибрации. В рассматриваемых двух случаях, так же как и в предыдущем варианте, величина зазора будет равна $|S_{1,max}|$. Кроме того, из геометрии известно, что она будет равна модулю вектора, имеющего координаты S_1 по оси абсцисс и S_2 по оси ординат:

$$d = \sqrt{S_1^2 + S_2^2}. \quad (2)$$

Уравнение (1) является частным случаем уравнения (2). Выше были рассмотрены крайние варианты измерения виброперемещения, при которых значение величины зазора будет максимальным. Во всех остальных промежуточных случаях зазор также может быть рассчитан по выражению (2).

Учитывая тот факт, что за один полный оборот вала внешняя поверхность внутреннего кольца полностью проходит под каждым датчиком вибрации, можно сделать вывод о том, что любые значения виброперемещения сначала измеряются одним датчиком вибрации, а через четверть оборота те же самые значения измеряются вторым датчиком вибрации. Отсюда следует, что для измерения величины зазора достаточно одного датчика вибрации. В этом случае расчет величины радиального зазора следует производить по выражению (1).

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Для проверки приведенных выше математических выкладок были проведены экспериментальные замеры величины виброускорения на подшипнике 3532, установленном на опоре электродвигателя скиповой лебедки доменной печи № 8 доменного цеха ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (ОАО «ММК»).

Этот подшипник является двухрядным роликовым сферическим радиальным самоустанавливающимся подшипником. Его технические характеристики приведены в табл. 1.

Подшипники данного типа предназначены для восприятия тяжелой радиальной нагрузки и устанавливаются в особо ответственных узлах. Поэтому мониторинг величины радиального зазора для таких подшипников является важной задачей.

На оборудовании скиповой лебедки установлена стационарная система вибромониторинга и диагностики, которая в режиме реального времени контролирует состояние всех подшипников системы, а также редукторов, валов и электродвигателей. Система была разработана и внедрена при непосредственном участии авторов.

Система реализована на оборудовании фирмы ifm electronics с использованием датчиков вибрации VSA001 вместе с устройствами для анализа сигналов вибрации (контроллеров) VSE002.

Таблица 1

Технические характеристики подшипника 3532

Параметр	Значение
Внутренний диаметр, мм	160
Наружный диаметр, мм	290
Ширина, мм	80
Масса, кг	23,1
Количество роликов в подшипнике, шт.	36
Размеры ролика	34×29,198
Грузоподъемность динамическая, кН	863
Грузоподъемность статическая, кН	1270
Максимальная номинальная частота вращения, об/мин	1400

Аналізу был подвергнут сигнал с датчика вибрации, установленного на опоре правого электрического двигателя скиповой лебедки. Используемый датчик производит измерения виброускорения с разрешением 20 кило-семплов в секунду. Во время установившегося режима работы скиповой лебедки было произведено считывание показаний датчика в течение 10 с. Таким образом, было получено около 200 тыс значений виброускорения.

Электродвигатель, на котором установлен исследуемый подшипник, вращается с постоянной угловой частотой вращения, равной 525 об/мин, что составляет 8,75 Гц. При этом время, за которое вал двигателя совершает один полный оборот, – примерно 0,114 с. За это время датчик измеряет 2285 значений виброускорения.

На рис. 3 приведен график временного сигнала виброускорения, полученный с датчика вибрации за время одного полного оборота вала двигателя.

Значения виброускорения, полученные с датчика вибрации, находятся в диапазоне от $-21,04$ до $+23,38$ мм/с².

Имея временной сигнал виброускорения, для того чтобы получить из него временной сигнал виброперемещения, необходимо его два раза проинтегрировать [1, 13–15]. Однако ввиду того, что при интегрировании неизвестна постоянная составляющая сигнала, невозможно получить величину зазора (представляющего собой постоянное смещение) путем интегрирования сигнала виброускорения.

Исходя из сказанного, значение зазора следует рассчитывать другим способом. Известны формулы пересчета виброускорения в виброскорость и виброперемещение при упрощающем предположении о том, что в сигнале присутствует гармоника только одной частоты [1]. В данном случае можно воспользоваться этими формулами, а в качестве частоты при расчетах использовать частоту вращения вала.

Таким образом, величину зазора d можно рассчитать по следующей зависимости:

$$d = \frac{a(\text{мм} / \text{с}^2) \cdot 1000(\text{мкм} / \text{мм})}{(f_0(1/\text{с}))^2}, \quad (3)$$

где a – виброускорение (мм/с²), f_0 – угловая частота вращения вала (Гц).

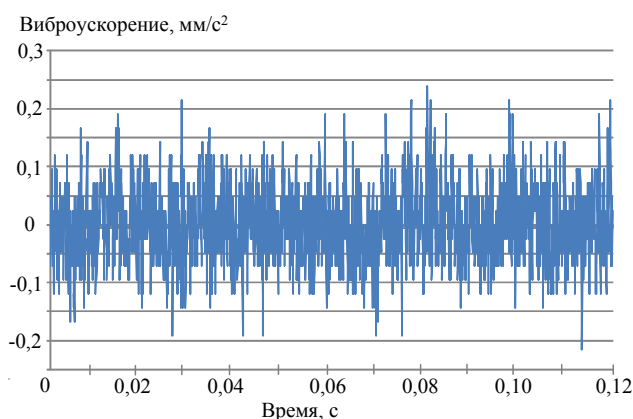


Рис. 3. График временного сигнала виброускорения за один оборот вала двигателя

Коэффициент 1000 в формуле (3) необходим для перевода единиц измерения из миллиметров в микрометры для удобства восприятия величины зазора из-за ее малости.

При пересчете по формуле (3) величин виброускорения, полученных с датчика вибрации в соответствующие им значения виброперемещения, которые характеризуют зазор в подшипнике, получили значения от $-274,8$ до $+305,4$ мкм.

Для того чтобы оценить величину рабочего радиального зазора, необходимо выбрать из полученных значений большее по модулю. Таким образом, измеренный с помощью датчика вибрации радиальный зазор подшипника 3532 составил $305,4$ мкм.

Из справочных данных можно найти, что для роликового подшипника, имеющего внутренний диаметр 160 мм, допустимое значение радиального зазора должно находиться в пределах от 45 до 350 мкм [16, 17]. Измеренное значение рабочего радиального зазора находится в пределах данного диапазона.

Для увеличения точности измерения радиального зазора в автоматическом режиме необходимо измерить его величину за несколько оборотов вала двигателя и найти среднееарифметическое значение. В табл. 2 представлены результаты расчета радиального зазора для 10 оборотов вала электродвигателя.

Среднее значение рабочего радиального зазора составило 287 мкм. Это говорит о нормальной работе подшипника. По полученному значению радиального зазора в подшипнике качения наряду с регистрацией других дефектов подшипника, таких как трещины и сколы на внутреннем и наружном кольцах, телах качения, повреждение сепаратора и других, можно судить о состоянии подшипникового узла.

Заключение

В работе была доказана возможность измерения рабочего радиального зазора подшипника качения в автоматическом режиме с помощью стационарной системы вибродиагностики и мониторинга. На многих агрегатах металлургического производства устанавливают стационарные системы мониторинга, которые

позволяют определить кроме общего вибрационного состояния оборудования конкретные дефекты подшипников качения, скольжения, дефекты электрохимической системы электродвигателей, дисбаланс и несоосность валов и другие дефекты. Результаты исследования показывают возможность дополнения стационарной системы мониторинга автоматической системой измерения рабочего радиального зазора в подшипнике качения без существенных материальных и технических вложений. Предполагается внедрение результатов проведенных исследований в систему автоматического вибромониторинга и диагностики основного оборудования скиповой лебедки доменной печи № 8 доменного цеха ОАО «ММК».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Неразрушающий контроль: справочник. В 7 т. / под ред. В.В. Клюева. Т. 7, кн. 2. М.: Машиностроение, 2005. 829 с.
2. M. Byrtus, J. Sobra, M. Krizek, T. Kavalir, V. Kindl, K. Hruska. Dynamic load of induction machine due to rotor's eccentricity and bearing clearance. 18th European Conference on Power Electronics and Applications, 2016, doi: 10.1109/EPE.2016.7695684.
3. R. Mistry ; B. Finley ; S. Kreitzer ; R. Queen. Influencing factors on motor vibration & rotor critical speed in design, test and field applications. Petroleum and Chemical Industry Technical Conference, 2014, doi: 10.1109/PCIcon.2014.6961887.
4. Санинский В.А., Худяков К.В., Смирнова Е.Н. Способ сборки подшипников качения // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2016. № 8 (187). С. 49–52.
5. Бойназаров Г.Г. Влияние эксплуатационных параметров на долговечность подшипниковых опор буровых станков // Science Time. 2016. № 8 (32). С. 33–38.
6. Копытов С.М., Космынин А.В., Ульянов А.В. Способ измерения рабочего зазора бесконтактных подшипников // Современные наукометрические технологии. 2013. № 3. С. 40–42.
7. Юркевич В.В. Изменение траектории оси вала от натяга в подшипниках качения // СТИН. 2014. № 6. С. 11–13.
8. Орлов А.В. Вибрация в радиальном роликовом подшипнике, вызываемая износом // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2013. № 4. С. 63–69.
9. Леонтьев М.К., Снеткова Е.И., Дегтярев С.А. Динамика неуравновешенного ротора на роликовом подшипнике // Вестник Московского авиационного института. 2013. Т. 20. № 1. С. 95–105.
10. Ishmetyev E.N., Logunova O.S., Panov A.N., Cistyakov D.V., Bodrov E.E. Stationary automatic vibration control and analysis systems: application experience. Journal of Computational and Engineering Mathematics, 2017, vol.4, no. 1, pp. 3–15.
11. Пат. 2432560 Российская Федерация, МПК G01M 13/04. Способ диагностики радиального зазора в шарикоподшипниках / Красев В.А., Ножницкий Ю.А., Петров Н.И.; заявитель Феде-

Таблица 2
Вычисление среднего арифметического значения
рабочего радиального зазора
для 10 оборотов вала электродвигателя

Номер оборота вала	Максимальное отрицательное виброперемещение, мкм	Максимальное положительное виброперемещение, мкм	Радиальный зазор, мкм
1	-274,82	305,41	305,41
2	-244,35	274,82	274,82
3	-274,82	274,82	274,82
4	-305,41	274,82	305,41
5	-244,35	244,35	244,35
6	-213,76	244,35	244,35
7	-244,35	274,82	274,82
8	-336	244,35	336
9	-274,82	274,82	274,82
10	-244,35	336	336
Среднее значение радиального зазора, мкм			287,08

- ральное государственное унитарное предприятие «Центральный институт авиационного моторостроения им П.И. Баронова». № 2010128329/28; заявл. 09.07.2010; опублик. 27.10.2011.
12. Пат. 1723479 СССР, МПК G01M 13/04. Способ определения радиального зазора в подшипнике качения / Фельдман В.Д.; заявитель Научно-производственное объединение «Индикатор». № 4680685/27; заявл. 16.01.89; опублик. 30.03.92.
 13. Барков А.В., Баркова Н.А. Вибрационная диагностика машин и оборудования. Анализ вибрации: учеб. пособие. СПб.: СПбГМТУ, 2004. 156 с.
 14. Волков В.М. Метрология, стандартизация и сертификация. Ч. 3: конспект лекций. Омск: Омский гос. ун-т путей сообщения, 2009. 69 с.
 15. Adams M.L. Rotating Machinery Vibration: From Analysis to Troubleshooting. 2nd edition. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2010. 476 p.
 16. ГОСТ 24810-81 (СТ СЭВ 775-77). Подшипники качения. Зазоры. М.: Изд-во стандартов, 1993. 23 с.
 17. ГОСТ 24810-2013. Подшипники качения. Внутренние зазоры. М.: Стандартинформ, 2014. 20 с.

Поступила в редакцию 24 апреля 2017 г.

INFORMATION IN ENGLISH

AUTOMATED SYSTEM FOR ROLLING CONTACT BEARINGS CLEARANCE MEASUREMENT

Evgeniy N. Ishmetyev

D.Sc. (Eng.), Director of Strategic Development, CJSC "KonsOM SKS", Magnitogorsk, Russia.

Dmitry V. Chistyakov

Ph.D. in Social Sciences, Executive Director, CJSC "KonsOM SKS", Magnitogorsk, Russia.

Alexander N. Panov

Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of Innovation, CJSC "KonsOM SKS", Magnitogorsk, Russia.

Evgeny E. Bodrov

Ph.D. (Eng.), Associate Professor of the Electronics and Microelectronics Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

This paper offers an automated system for measuring the operating radial clearance in a rolling contact bearing under load. During exploitation of units working under friction, erosion processes take place on the working surfaces of those units. Depending on values of the load applied to the bearing, inner race rotation velocity, presence of lubricant and abrasive particles in it, oxidative, abrasive or fatigue erosion can develop on the surfaces of rolling tracks and rolls themselves that can lead to rapid increase in the operating radial clearance. High value of the operating radial clearance during bearing exploitation means that erosion process is taking place. On the other hand, small value of the operating radial clearance is also not permissible because it can lead to wedging of the bearing, and that in turn can lead to an accident and damage of expensive equipment. Thus, one can draw a conclusion that in critical units of industrial equipment there is a need in constant monitoring of the bearing condition including their operating radial clearances. The paper shows that an automated system for measuring the operating radial clearance in a rolling contact bearing can be developed using a vibration sensor that registers vibration acceleration caused by vibration in the inner race of the bearing installed on the rotating shaft. Calculation of the operating radial clearance value is done by the program after it read the values of measured vibration acceleration from vibration signal analysis devices via Ethernet. The developed system can be integrated into the existing vibration analysis and condition monitoring systems for industrial objects thus increasing the quantity of diagnostic information about condition of rolling contact bearing as the most critical unit in many industrial mechanisms.

Keywords: Radial clearance, measurement, automated system, monitoring, vibration analysis, working clearance, rolling

contact bearing, friction unit, rolling surface, bearing support, vibration acceleration, vibration displacement.

REFERENCES

1. *Nerazrushajushij kontrol* [Nondestructive Inspection]. Ed. V.V. Kluev, vol. 7, book 2. Moscow, Mechanical Engineering Publ., 2005. 829 p. (In Russian)
2. M. Byrtus, J. Sobra, M. Krizek, T. Kavalir, V. Kindl, K. Hruska. Dynamic load of induction machine due to rotor's eccentricity and bearing clearance. 18th European Conference on Power Electronics and Applications, 2016, doi: 10.1109/EPE.2016.7695684.
3. R. Mistry ; B. Finley ; S. Kreitzer ; R. Queen. Influencing factors on motor vibration & rotor critical speed in design, test and field applications. Petroleum and Chemical Industry Technical Conference, 2014, doi: 10.1109/PCICon.2014.6961887.
4. Saninskij V.A., Hudjakov K.V., Smirnova E.N. Method of assembling a rolling bearing. *Izvestija Volgogradskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta* [Proceedings of VSTU], 2016. no. 8 (187), pp. 49–52. (In Russian)
5. Bojnazarov G.G. The influence of operational parameters on the durability of bearings of drilling rigs. *Science Time*, 2016, no. 8(32), pp. 33–38. (In Russian)
6. Kopytov S.M., Kosmynin A.V., Ulyanov A.V. The method of measuring the working clearance of contactless bearings. *Sovremennye naukoimeticheskie tehnologii* [Modern Scientific Technology], 2013, no. 3, pp. 40–42. (In Russian)
7. Jurkevich V.V. The change in the trajectory of the shaft axis due to preload in rolling contact bearings. *STIN* [Russian Engineering Research], 2014, no. 6, pp. 11–13. (In Russian)
8. Orlov A.V. Vibration in the radial roller bearing due to wear out]. *Problemy mashinostroenija i nadezhnosti mashin* [Journal of Machinery Manufacture and Reliability], 2013, no. 4, pp. 63–69. (In Russian)

9. Leontyev M.K., Snetkova E.I., Degtjarev S.A. Dinamika neuravnovesennogo rotora na rolikovom podshipnike [Dynamics of unbalanced rotor on a roller bearing]. *Vestnik Moskovskogo aviacionnogo instituta* [Vestnik of Moscow aeronautic institute], 2013. vol. 20. no. 1. pp. 95–105. (In Russian)
10. Ishmetyev E.N., Logunova O.S., Panov A.N., Cistyakov D.V., Bodrov E.E. Stationary automatic vibration control and analysis systems: application experience. *Journal of Computational and Engineering Mathematics*, 2017, vol.4, no. 1, pp. 3–15.
11. Krasev V.A., Nozhnickij Ju.A., Petrov N.I. *Sposob diagnostiki radialnogo zavora v sharikopodshipnikah* [A method of diagnosing radial clearance in ball bearings]. Patent RF, no. 2432560, 2011.
12. Feldman V.D. *Sposob opredelenija radialnogo zavora v podshipnike kachenija* [A method of determining radial clearance in a bearing]. Patent USSR, no. 1723479, 1992.
13. Barkov A.V., Barkova N.A. *Vibracionnaja diagnostika mashin i oborudovanija. Analiz vibracii* [Vibration diagnostics of machines and equipment. Vibration analysis]. St. Petersburg, Spbgmtu Publ., 2004. 156 p. (In Russian)
14. Volkov V.M. *Metrologija, standartizacija i sertifikacija. Chast 3: konspekt lekcij* [Metrology, standardization and certification. Part 3: lecture notes]. Omsk, Omsk State Transport University Publ., 2009. 69 p. (In Russian)
15. Adams M.L. *Rotating Machinery Vibration: From Analysis to Troubleshooting*. 2nd edition. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2010. 476 p.
16. GOST 24810-81. The rolling bearings. Clearances. Moscow, Izdatelstvo Standartov Publ., 1993. 23 p. (In Russian)
17. GOST 24810-2013. Rolling bearings. Internal Clearances. Moscow, Standartinform Publ., 2014. 20 c. (In Russian)

Автоматизированная система измерения зазоров в подшипниках качения / Ишметьев Е.Н., Чистяков Д.В., Панов А.Н., Бодров Е.Э. // *Электротехнические системы и комплексы*. 2017. № 2 (35). С. 61–66. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-2\(35\)-61-66](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-2(35)-61-66)

Ishmetyev E.N., Chistyakov D.V., Panov A.N., Bodrov E.E. Automated System for Rolling Contact Bearings Clearance Measurement. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2017, no. 2 (35), pp. 61–66. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-2\(35\)-61-66](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-2(35)-61-66)

ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ

УДК 621.365

[https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-2\(35\)-67-73](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-2(35)-67-73)Мещеряков В.Н.¹, Титов С.С.², Безденежных Д.В.²¹ФГБОУ ВПО «Липецкий государственный технический университет»²ООО «НПП Система48»**АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СИЛ НА КИНЕМАТИКУ ДВИЖЕНИЯ ШАРА В ПРОЦЕССЕ ОСЕСИММЕТРИЧНОГО ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА**

В настоящей публикации проведен анализ сил, действующих на заготовку (шар) со стороны электромагнитного поля индуктора, в процессе его движения при осесимметричном индукционном нагреве под термообработку. При помощи метода конечных элементов (МКЭ) и пакета программ FEMM была смоделирована динамика магнитного поля индуктора, а также разработана совместная математическая модель индуктора и заготовки. Это позволило определить влияние различных факторов, таких как частота тока индуктора, его величина, геометрические параметры индуктора, физические параметры материала индуктора и шара, а также положение шара в процессе нагрева на величину электромагнитной силы, действующей на заготовку. Полученное выражение является фундаментальным с точки зрения анализа влияния сил электромагнитного характера на кинематику движения шара в процессе осесимметричного индукционного нагрева под термообработку. Результаты данного исследования особенно актуальны при разработке установок индукционного нагрева (УИН) для осесимметричного индукционного нагрева металлоизделий шарообразной формы в массовом производстве мелющих тел для горно-обогатительных фабрик и цементных заводов, шариков подшипников качения, клапанов в гидравлических системах, в том числе высокоизносостойких шариков в обратных клапанах глубинных насосов для нефтедобычи и др.

Ключевые слова: индуктор, анализ, кинематика, шар, индукционный нагрев, электромагнитные силы.

ВВЕДЕНИЕ

В последние несколько лет вышел ряд публикаций, затрагивающих вопросы симметричного индукционного нагрева под термообработку металлоизделий шарообразной формы на заданную глубину токами повышенной частоты. В связи с преимущественно сырьевой направленностью российской экономики результаты данных исследований особенно актуальны при массовом производстве мелющих тел для горно-обогатительных фабрик и цементных заводов, шариков подшипников качения, клапанов в гидравлических системах, в том числе высокоизносостойких шариков в обратных клапанах глубинных насосов для нефтедобычи и др.

В качестве идеи технического решения задачи симметричного индукционного нагрева металлоизделий шарообразной формы в публикациях [1–3] указывается новая конфигурация индуктора, направляющий желоб которого (он же транспортирующий профиль) изогнут в пространственную спираль с вертикальной осью симметрии. Кинематика движения шара по спиральному желобу в индукторе (свободное скатывание) характеризуется двухмерным, а в другом случае при переменной кривизне витков спирали (или траектории движения центра массы шара) – трёхмерным побуждением к изменению направления его оси собственного вращения от входа в индуктор до выхода из него. Указанный факт предопределяет возможность создания установок индукционного нагрева (УИН) непрерывного действия, обеспечивающих равномерное по плотности взаимодействие всей поверхности скатывающегося шара с электромагнитным полем в индукторе. Таким образом, появляется возможность достижения искомого симметричного нагрева на заданную глубину – прямого скоростного и потому высокоэнергоэффективно-

го, практически без окисления и обезуглероживания.

Следует отметить высокий уровень сложности реализации заявленных УИН по ряду параметров как механико-математического, так и электромагнитного характера. К последним относится анализ электромагнитных сил, действующих на шар со стороны электромагнитного поля индуктора в процессе движения по спиральному желобу. В конечном итоге данный анализ позволит в полной мере оценить кинематику движения шара в процессе его нагрева под термообработку. Уровень проработки указанного аспекта в профильной литературе [2–3] не является достаточным для успешной реализации заявленной выше идеи.

Таким образом, видится актуальной постановка задачи о поиске аналитического выражения электромагнитной силы, действующей на заготовку в зависимости от конкретной конструкции и материала индуктора, лежащего в основе УИН, а также от конкретных размеров и материала нагреваемой заготовки (шара).

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

При рассмотрении УИН математическим описанием процессов, вызванных электромагнитным полем в индукторе, являются дифференциальные уравнения в частных производных. Данные уравнения для электромагнитных полей являются следствием преобразования уравнений Максвелла [4].

В качестве заготовок, нагреваемых в индукторе, выступают мелющие шары и шарикоподшипники, выполненные из высокоуглеродистых сталей типа ШХ15 (зарубежный аналог 100Cr6). Вследствие неравномерного нагрева по глубине (объясняемого поверхностным эффектом [5, 7]) при приближении к температуре Кюри магнитная проницаемость заготовок становится непостоянной по объему, поэтому в общем случае среда является неоднородной.

В дальнейшем будем считать, что магнитное поле проникает в заготовку только на глубину скин-слоя, величина которого определяется частотой магнитного поля. Это допущение позволяет считать температуру заготовки, а следовательно, и магнитную проницаемость по всей глубине скин-слоя постоянной, а среду – однородной.

Рассматриваемые заготовки выполнены из ферромагнитных материалов. Для ферромагнитных материалов связь между напряженностью поля и магнитной индукцией нелинейная. В этом случае напряженность поля и магнитная проницаемость являются функциями магнитной индукции.

В общем виде для магнитоизотропной среды с нелинейной зависимостью между напряженностью поля и магнитной индукцией справедливо следующее уравнение [6]:

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu(B)} \cdot \nabla \times \bar{A} \right) = \bar{J}, \quad (1)$$

где $\bar{A}$ – векторный потенциал магнитного поля; $\bar{J}$ – вектор плотности тока; B – магнитная индукция; μ – магнитная проницаемость среды; $\nabla \times$ – оператор rot для векторного поля.

Так как по рассматриваемому индуктору протекает переменный синусоидальный ток, то и магнитное поле, создаваемое им, также является переменным синусоидальным. Для синусоидального магнитного поля выражение (1) примет вид

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu(B)} \cdot \nabla \times \bar{A} \right) = -\sigma \frac{\partial \bar{A}}{\partial t}, \quad (2)$$

где σ – проводимость материала.

Выражение (2) также можно представить в виде

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu(B_m)} \cdot \nabla \times \bar{A}_m \right) = -\sigma j \omega \bar{A}_m, \quad (3)$$

где A_m – амплитудное значение синусоидального векторного потенциала магнитного поля; B_m – амплитудное значение синусоидальной магнитной индукции; ω – частота магнитного поля.

Существующие аналитические методы не могут обеспечить решение уравнения (3). В электромагнитной системе рассматриваемого индуктора это связано с его сложной трехмерной геометрией, многообразием границ раздела сред с различными магнитными свойствами, нелинейностью характеристик намагничивания ферромагнитного материала заготовки. Для получения возможности решения необходимо использовать численные методы. Наиболее целесообразным в данном случае является применение метода конечных элементов (МКЭ) [7].

Существует достаточно большое количество программных продуктов, использующих вышеуказанный метод для расчета электромагнитных полей различной степени сложности. В задаче моделирования электромагнитного поля индуктора будем считать, что заготовка (в данном случае стальной шар) находится по поперечной оси ровно по центру индуктора. Это позволяет свести задачу к двумерной осесимметричной,

что значительно упрощает проведение расчетов.

В дальнейшем, при рассмотрении электромагнитных процессов, протекающих в индукторе, мы будем использовать пакет программ FEMM. FEMM представляет собой набор программ для решения низкочастотных электромагнитных, токовых и тепловых задач в двумерной плоской и осесимметричной областях [9]. Программа используется для решения:

- линейных и нелинейных магнитоэлектростатических задач;
- гармонических линейных и нелинейных квазистатических магнитных задач;
- линейных электростатических задач;
- тепловых задач в установившемся тепловом состоянии;
- задач по исследованию протекания тока в проводнике.

С помощью FEMM была разработана математическая модель индуктора с заготовкой (шаром) со следующими характеристиками:

- материал проводника индуктора – медь;
- конфигурация проводников индуктора – полая трубка, внешний диаметр 8 мм, внутренний диаметр 6 мм;
- число витков – 5, расстояние между витками 2 мм;
- конфигурация индуктора – внешний диаметр 28 мм, внутренний диаметр 12 мм;
- длина индуктора – 48 мм;
- материал шара – углеродистая сталь 100Cr6 с нелинейной В-Н характеристикой, удельная электрическая проводимость 4,55 МСм/м;
- диаметр шара – 10 мм.

На **рис. 1** изображена конфигурация разработанной осесимметричной модели индуктора в программе FEMM.

В МКЭ расчетная область разбивается на элементы конечного размера. При расчете двумерных полей наибольшее распространение получили треугольные и прямоугольные элементы с прямолинейными сторонами. Выбранный пакет программ FEMM использует треугольные элементы. На **рис. 2** показан фрагмент индуктора при разбиении области на элементы в процессе моделирования.

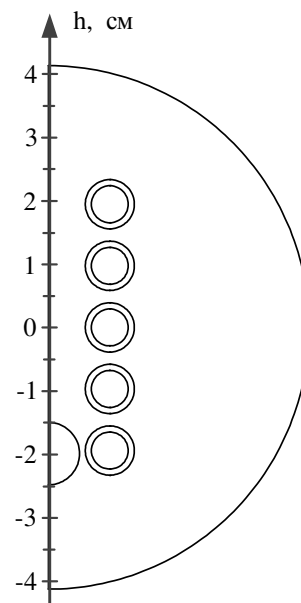


Рис. 1. Осесимметричная модель индуктора со стальным шаром

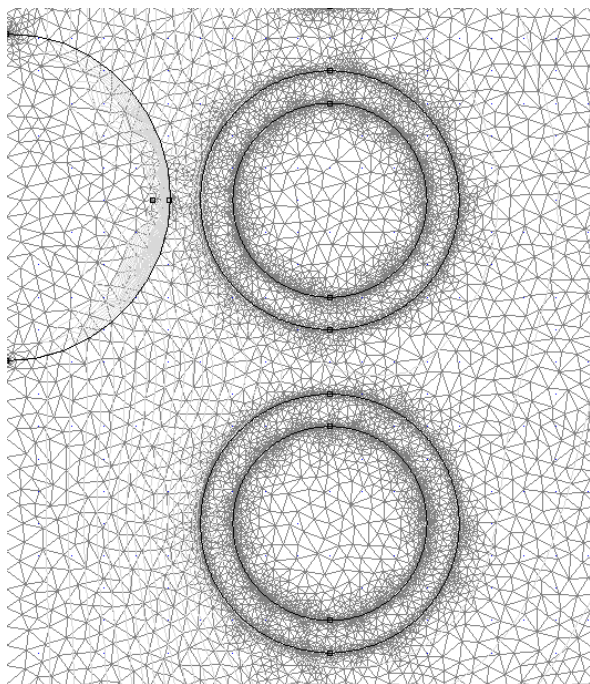


Рис. 2. Разбиение области индуктора на конечные элементы

Материалом заготовки (шара) является углеродистая сталь 100Cr6. На рис. 3 показана кривая намагничивания для данной стали при температуре 25°C, на рис. 4 эта же кривая в логарифмических координатах.

Следующим шагом было моделирование магнитного поля индуктора. Пакет программ FEMM позволяет строить картину магнитных полей в виде силовых линий. На рис. 5 показана смоделированная картина магнитного поля при частоте тока индуктора 1 кГц, на рис. 6 – при частоте тока 10 кГц. Сила тока индуктора в обоих случаях составляла около 500 А. Из рисунков видно влияние поверхностного эффекта, заключающегося в меньшей глубине проникновения магнитного поля в шар с ростом частоты электромагнитного поля.

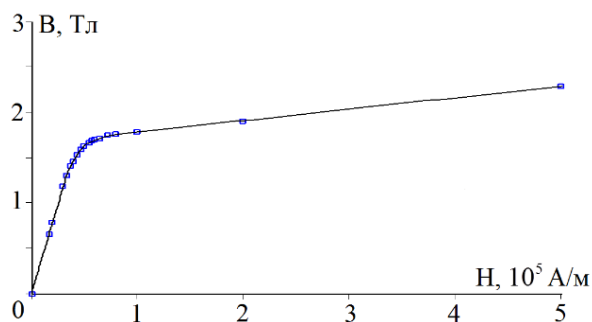


Рис. 3. Кривая намагничивания стали 100Cr6

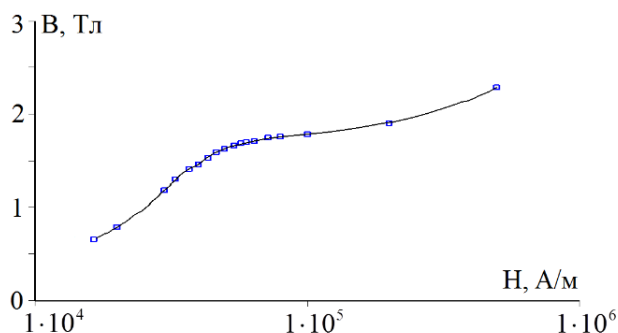


Рис. 4. Кривая намагничивания стали 100Cr6 в логарифмических координатах

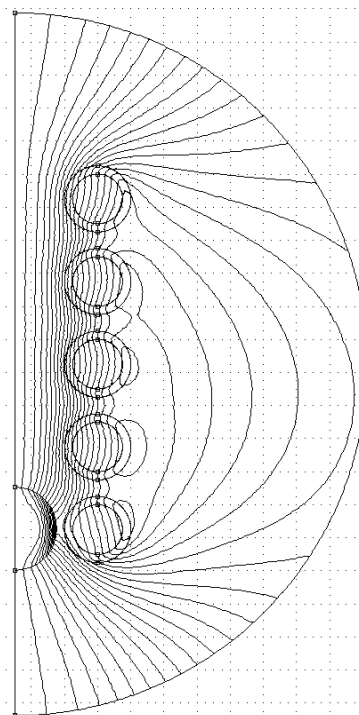


Рис. 5. Картина магнитного поля индуктора при частоте тока 1 кГц

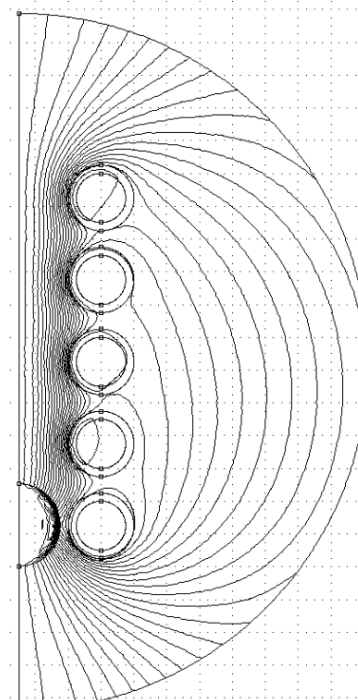


Рис. 6. Картина магнитного поля индуктора при частоте тока 10 кГц

Одним из важных пунктов при моделировании является определение электромагнитных сил, действующих на шар при его движении через индуктор. Пакет программ FEMM позволяет оценить эти силы путем использования тензора натяжений Максвелла.

Тензор Максвелла описывает давление на единицу поверхности тела по формуле [8]

$$d\vec{F} = \frac{1}{2} \left[\vec{H} \cdot (\vec{B} \cdot \vec{n}) + (\vec{H} \cdot \vec{n}) \cdot \vec{B} - (\vec{H} \cdot \vec{B}) \cdot \vec{n} \right], \quad (4)$$

где $\vec{n}$ – вектор внешней нормали к поверхности в интересующей нас точке.

Полная сила, действующая на шар, вычисляется как интеграл по поверхности шара:

$$F = \int_S dF. \quad (5)$$

Численное решение интеграла (5) позволило определить электромагнитную силу, действующую на шар, направленную по продольной оси индуктора. При численном решении моделировалось различное положение шара внутри индуктора в 100 точках. Во всех случаях температура шара считалась постоянной и равной 25°C.

На **рис. 7** показана величина электромагнитной силы в зависимости от положения шара h в индукторе, действующей по продольной оси, координата $h=0$ соответствует положению шара по центру индуктора (в соответствии с **рис. 1**). Графики сняты при разных токах индуктора. Анализ графиков показывает квадратичную зависимость электромагнитной силы от величины тока. На графиках отмечается наличие максимальных значений силы, соответствующих моментам входа и выхода шара в индуктор. При положении шара внутри индуктора наблюдаются колебания величины электромагнитной силы (5 периодов), объясняющиеся движением шара вдоль 5 витков индуктора, имеющие расстояние между собой, равное 2 мм. Относительно большая амплитуда колебаний объясняется близкими размерами шара и проводника индуктора – медной трубки.

Следующим шагом было определение влияния частоты тока индуктора на величину электромагнитной силы, действующей на шар. На **рис. 8, 9** показаны графики силы в зависимости от положения шара h в индукторе, снятые при разных частотах. Из них видно, что величина силы убывает с возрастанием частоты. Для более точной оценки были построены графики электромагнитной силы в зависимости от частоты тока индуктора при постоянной силе тока 1000 А и различных положениях шара в индукторе, они показаны на **рис. 10**. Из графика видно, что с ростом частоты график асимптотически приближается к нулю и зависимость явно нелинейная.

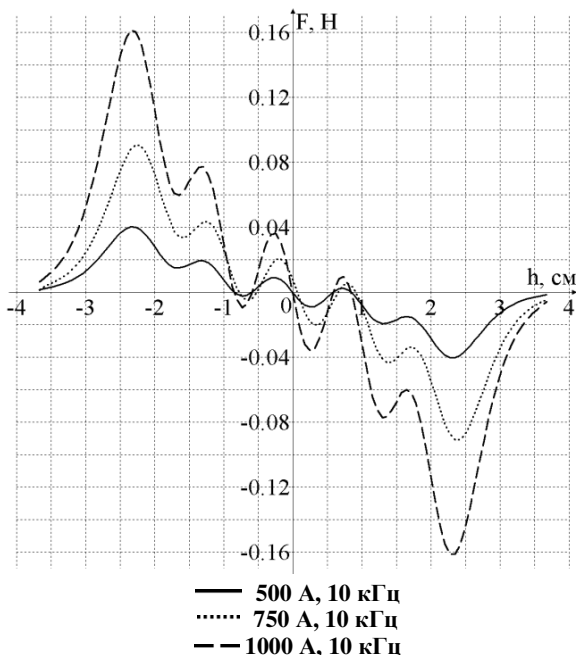


Рис. 7. Графики электромагнитной силы, действующей на шар по продольной оси индуктора при разной величине тока

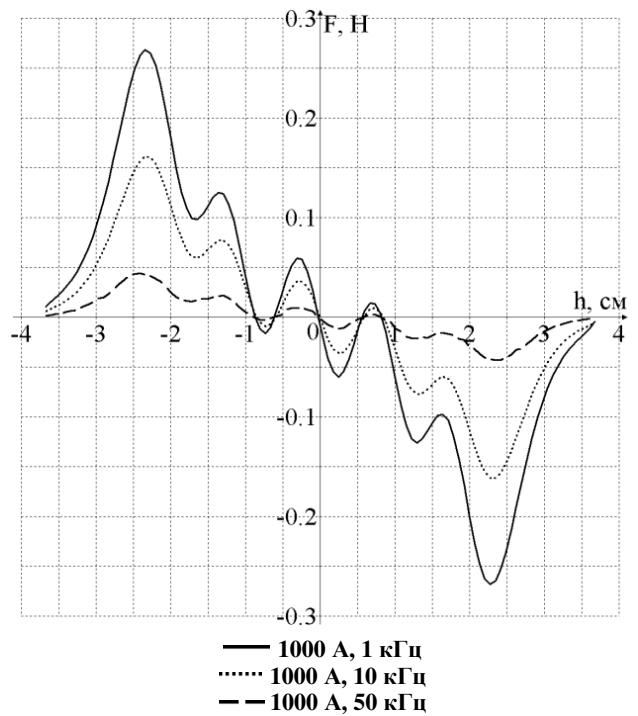


Рис. 8. Графики электромагнитной силы, действующей на шар по продольной оси индуктора при разной частоте тока

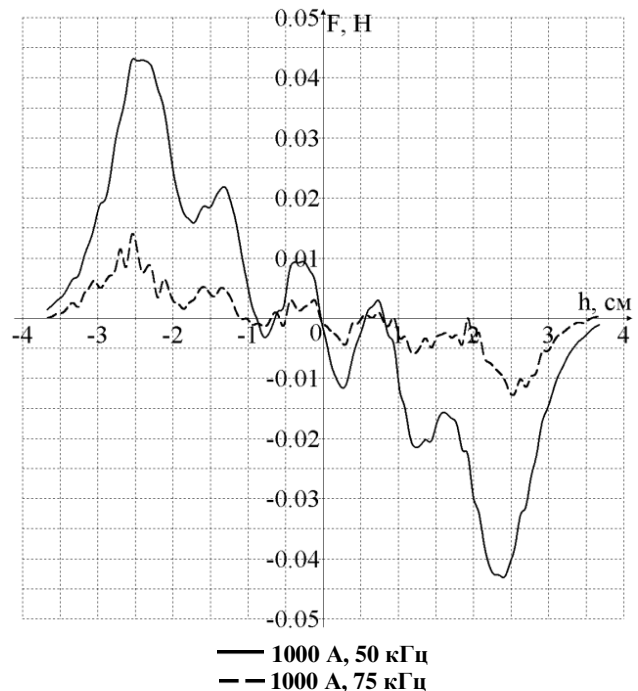


Рис. 9. Графики электромагнитной силы, действующей на шар по продольной оси индуктора при разной частоте тока

Для дальнейшего анализа работы индуктора с движущимся шаром необходимо определить аналитическое выражение электромагнитной силы, действующей на шар в зависимости от основных параметров работы. Для этого будем использовать аппроксимацию зависимостей, изображённых на **рис. 7–10**.

Зависимость электромагнитной силы от частоты для рассматриваемого индуктора в рабочем диапазоне частот аппроксимируется выражением вида

$$F(f) = \frac{F_0}{A_1 \cdot f^4 + B_1 \cdot f^2 + C_1 \cdot f + 1}, \quad (6)$$

где f – частота тока индуктора; F_0 – значение электромагнитной силы при нулевой частоте тока индуктора; A_1, B_1, C_1 – коэффициенты аппроксимации.

На **рис. 11** показаны графики аппроксимирующих функций при различных положениях шара в индукторе. Коэффициенты аппроксимации постоянны и не зависят от положения шара в индукторе (A_1, B_1, C_1 зависят от геометрических параметров индуктора, а также параметров материала индуктора и заготовки соответственно).

Зависимость электромагнитной силы F от положения шара в индукторе h аппроксимируется несколькими выражениями следующим образом:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{F_m}{C_2(|h| - h_m)^3 + D_2(|h| - h_m) + 1}, \text{ при } h \leq -h_m \\ A_2|h|^\alpha + B_2 \sin(\beta|h|), \text{ при } 0 > h > -h_m \\ -A_2|h|^\alpha - B_2 \sin(\beta|h|), \text{ при } 0 < h < h_m \\ \frac{-F_m}{C_2(|h| - h_m)^3 + D_2(|h| - h_m) + 1}, \text{ при } h \geq h_m \end{array} \right. \quad (7)$$

где F_m – максимальное (по модулю) значение электромагнитной силы при положении шара в точке h_m ; $A_2, B_2, C_2, D_2, \alpha, \beta$ – коэффициенты аппроксимации, зависят от указанных выше параметров по аналогии с A_1, B_1, C_1 .

На **рис. 12** показан график аппроксимирующей функции при величине тока индуктора 1 кА.

Окончательное аппроксимированное выражение для величины электромагнитной силы F , действующей на шар, принимает вид

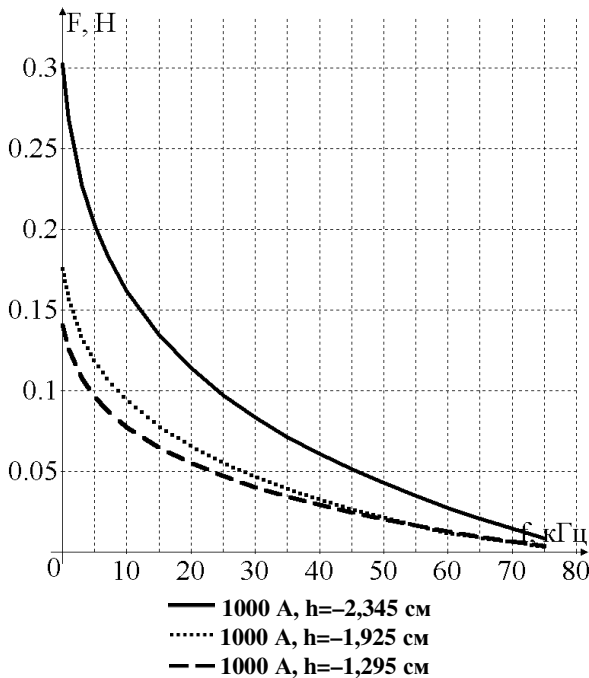


Рис. 10. Графики зависимости электромагнитной силы от частоты тока при положении шара в разных точках индуктора

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{kF_0 F_m I^2 (1/Q)}{C_2(|h| - h_m)^3 + D_2(|h| - h_m) + 1}, \text{ при } h \leq -h_m \\ \frac{kF_0 I^2 [A_2|h|^\alpha + B_2 \sin(\beta|h|)]}{Q}, \text{ при } 0 > h > -h_m \\ \frac{kF_0 I^2 [-A_2|h|^\alpha - B_2 \sin(\beta|h|)]}{Q}, \text{ при } 0 < h < h_m \\ \frac{-kF_0 F_m I^2 (1/Q)}{C_2(|h| - h_m)^3 + D_2(|h| - h_m) + 1}, \text{ при } h \geq h_m \end{array} \right. \quad (8)$$

где I – величина тока индуктора; k – коэффициент пропорциональности (H/A^2);

$$Q = A_1 f^4 + B_1 f^2 + C_1 f + 1.$$

Это выражение справедливо для конкретной конструкции и материала индуктора, а также конкретных размеров и материала стального шара. Выражение не учитывает изменение температуры шара при нагреве. Указанный факт возможно учесть в дальнейшем путем корректировки кривой намагничивания в зависимости от температуры шара.

Для оценки качества аппроксимации в ПО SciDAVis [10] вычислялся коэффициент достоверности аппроксимации (коэффициент детерминации) R^2 для графика на **рис. 12**. На участке $0 < h < h_m$ значение R^2 составило 0,9955, на участке $h \geq h_m$ значение R^2 равно 0,9992. Близость коэффициента R^2 к единице говорит о высокой достоверности выбранной аппроксимации.

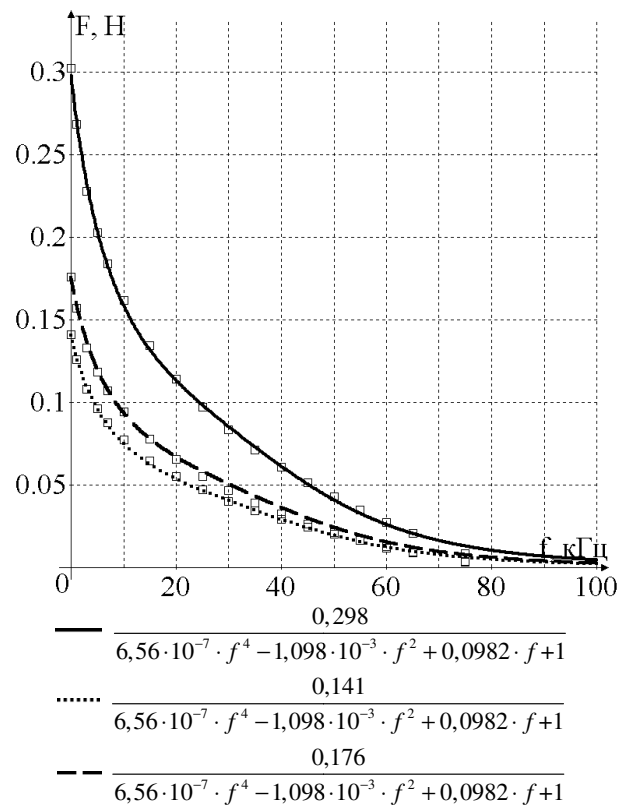
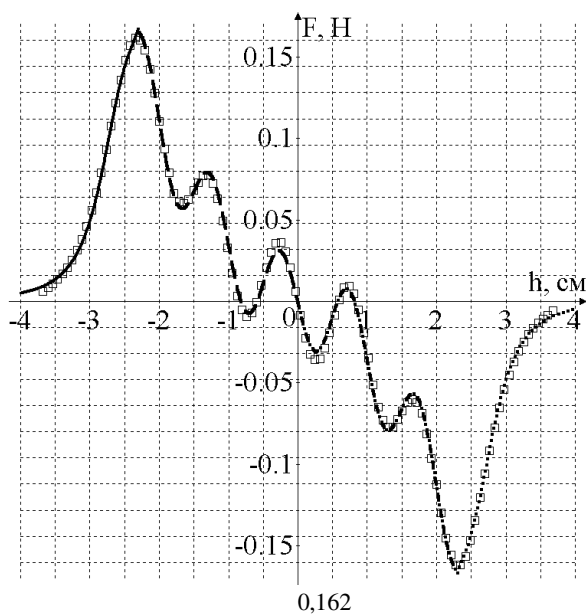


Рис. 11. Аппроксимация зависимости электромагнитной силы от частоты тока



$$\begin{aligned} & \text{—} \frac{0,162}{6,56(-h-2,345)^3 + 0,676(-h-2,345) + 1} \\ & \text{---} 0,0274 \cdot \sin(-6,32h) + 0,0343(-h)^{1,69} \\ & \text{- · - · -} 0,0274 \cdot \sin(6,32h) + 0,0343 \cdot h^{1,69} \\ & \text{.....} \frac{0,162}{6,56(h-2,345)^3 + 0,676(h-2,345) + 1} \end{aligned}$$

Рис. 12. Аппроксимация зависимости электромагнитной силы от положения шара в индукторе

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, при помощи метода конечных элементов (МКЭ) и пакета программ FEMM было смоделировано поведение магнитного поля индуктора, а также разработана совместная математическая модель индуктора и заготовки. Это позволило определить влияние различных факторов, таких как частота тока индуктора и положение шара в индук-

торе на величину электромагнитной силы, действующей на заготовку. Полученное аналитическое выражение (8) является фундаментальным с точки зрения анализа влияния сил электромагнитного характера на кинематику движения шара в процессе осесимметричного индукционного нагрева и может быть использовано при разработке УИН для симметричного индукционного нагрева металлоизделий шарообразной формы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пат. 2453612 РФ, МПК C21D1/42, H05B6/36. Индуктор непрерывного действия для симметричного нагрева изделий шарообразной формы / Мещеряков В.Н., Кузьменко В.И., Титов С.С. Оpubл. 20.06.2012. Бюл. №17. 4 с.
2. Мещеряков В.Н., Титов С.С. Установка индукционного нагрева под термообработку металлоизделий шарообразной формы // Электрометаллургия. 2015. № 8. С. 14–22.
3. Мещеряков В.Н., Кузьменко В.И., Титов С.С. Разработка метода и устройства для транспортирования и равномерного осесимметричного индукционного нагрева шаров // Индукционный нагрев. 2011. № 3. С. 40–43.
4. Нейман Л.Р., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники. Л.: Энергия, 1981. Т. 2. 533 с.
5. Слухоцкий А.Е., Рыскин С.Е. Индукторы для индукционного нагрева. М.: Энергия, 1974. 263 с.
6. David J. Griffiths. Introduction to Electrodynamics. 4th Edition. Pearson, 2012. 624 с.
7. Lupi S., Forzan M. Induction and Direct Resistance Heating: Theory and Numerical Modeling. Springer, 2015. 370 с.
8. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике. Изд. 10-е. М.: Наука, 1986. 544 с.
9. Байда Е.И. Расчет электромагнитных и тепловых полей с помощью программы FEMM. Харьков: НТУ «ХПИ», 2015. 147 с.
10. Параллельные вычисления в УрО РАН [Электронный ресурс]. М.: Институт математики и механики УрО РАН, 2016. URL: <http://parallel.uran.ru/node/203>, свободный. Загл. с экрана.

Поступила в редакцию 10 февраля 2017 г.

INFORMATION IN ENGLISH

ANALYSIS OF THE EFFECT OF ELECTROMAGNETIC FORCES ON KINEMATICS OF A SPHERICAL METAL PRODUCT IN AXISYMMETRIC INDUCTION HEATING

Viktor N. Meshcheryakov

D.Sc. (Eng.), Professor, Head of the department, Department of Automatic Electric Drive, Lipetsk State Technical University, Lipetsk Russia.

Sergey S. Titov

Ph.D. (Eng.), General manager, «NPP Sistema48» Research and Production Enterprise Ltd (Lipetsk), Lipetsk Russia.

Daniil V. Bezdenezhnykh

Ph.D. (Eng.), Chief Engineer, «NPP Sistema48» Research and Production Enterprise Ltd (Lipetsk), Lipetsk Russia.

The article is concerned with analysis of the forces acting on the work-piece (ball) from the electromagnetic field of the inductor during its movement in the process of axially symmetric induction heating for heat treatment. The finite element method (FEM) and FEMM software package were used to model the dynamics of the magnetic field of the inductor and to develop a mutual mathematical model of the inductor and the workpiece. This made it possible to

determine the effect of various factors such as the frequency and magnitude of the inductor current, the geometric parameters of the inductor, physical parameters of the material of the inductor and the ball and position of the ball in the heating process on the magnitude of the electromagnetic force acting on the workpiece. The resulting expression is fundamental in terms of analysis of the influence of the electromagnetic forces on the kinematics of the movement of

the ball in the axially symmetric induction heating for further heat treatment. The results of this study are particularly relevant in the development of induction heating process for axially symmetric induction heating of metal spherical shape in the mass production of grinding media for mining and processing mills and cement plants, balls of rolling bearings, valves, hydraulic systems, including highly wear-resistant balls in reverse valves for oil well pumps, etc.

Keywords: Inductor analysis, kinematics, ball, induction heating, electromagnetic forces.

REFERENCES

1. Meshcheryakov V.N., Kuzmenko V.I., Titov S.S. *Induktor nepreryvnogo deystviya dlya simmetrichnogo nagreva izdeliy sharoobraznoy formy* [Continuous operation inductor for symmetric heating of spherical products]. Patent RF, no. 2453612, 2012. (In Russian)
2. Meshcheryakov V.N., Titov S.S. Installation of induction heating for heat treatment of spherical metal products. *Elektrometallurgiya* [Electrometallurgy], 2015, no. 8, pp. 14–22. (In Russian)
3. Meshcheryakov V.N., Kuz'menko V.I., Titov S.S. Development of the method and apparatus for transporting and uniform axisymmetric induction heating of spherical metal products. *Induktsionnyy nagrev* [Induction heating], 2011, no. 3, pp. 40–43. (In Russian)
4. Neyman L.R. *Teoreticheskiye osnovy elektrotekhniki* [Theoretical Foundations of Electrical Engineering]. S.Petersburg: Energiya, 1981, 533 p.
5. Sluhotsky A.Ye., Ryskin S.Ye. *Induktory dlya induktsionnogo nagreva* [Inductors for induction heating]. Moscow: [Energy], 1974, 263 p. (In Russian)
6. David J. Griffiths. *Introduction to Electrodynamics*. 4th Edition. Pearson, 2012, 624 c.
7. Lupi S., Forzan M. *Induction and Direct Resistance Heating: Theory and Numerical Modeling*. Springer, 2015. 370 p.
8. Bronshteyn I.N., Semendyayev K.A. *Spravochnik po matematike, izdaniye desyatoye* [Handbook of mathematics, tenth edition]. Moscow: Nauka, 1986, 544 p. (In Russian)
9. Bayda Ye.I. *Raschet elektromagnitnykh i teplovykh poley s pomoshchyu programmy FEMM* [Calculation of electromagnetic and thermal fields using FEMM software]. Kharkov: NTU «KHPI», 2015, 147 p.
10. *Parallelnyye vychisleniya v UrO RAN* [Parallel Computing in UB RAS]. Moscow Institute of mathematics and mechanics. Available at: <http://parallel.uran.ru/node/203>

Мещеряков В.Н., Титов С.С., Безденежных Д.В. Анализ влияния электромагнитных сил на кинематику движения шара в процессе осесимметричного индукционного нагрева // Электротехнические системы и комплексы. 2017. № 2 (35). С. 67–73. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-2\(35\)-67-73](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-2(35)-67-73)

Meshcheryakov V.N., Titov S.S., Bezdenezhnykh D.V. Analysis of the Effect of Electromagnetic Forces on Kinematics of a Spherical Metal Product in Axisymmetric Induction Heating. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2017, no. 2 (35), pp. 67–73. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-2\(35\)-67-73](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-2(35)-67-73)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Андреев Андрей Игоревич – студ. каф. автоматизированного электропривода и мехатроники, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: andreev.andrey74@gmail.com. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4902-0235>

Безденежных Даниил Владимирович – канд. наук, гл. инженер, ООО «НПП Система48», г. Липецк, Россия. E-mail: daniil_lipetsk@rambler.ru. ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5687-4995>

Бодров Евгений Эдуардович – канд. техн. наук, доц. каф. электроники и микроэлектроники, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: forheartist@mail.ru. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7316-8213>

Бочкарев Игорь Викторович – д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой электромеханики, Кыргызский государственный технический университет имени И. Раззакова, г. Бишкек, Кыргызстан. E-mail: elmech@mail.ru. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9873-9203>

Брякин Иван Васильевич – ст. науч. сотрудник, д-р техн. наук, зав. лабораторией информационно-измерительных систем, Институт автоматизации и информационных технологий, Национальная Академия Наук Кыргызской Республики, г. Бишкек, Кыргызстан. E-mail: bivas2006@yandex.ru. ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7463-8072>

Греков Эдуард Леонидович – канд. техн. наук, доц., зав. кафедрой автоматизированного электропривода, электромеханики и электротехники, ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет», г. Оренбург, Россия. E-mail: aertpm@rambler.ru. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4675-7378>

Ишметьев Евгений Николаевич – д-р техн. наук, директор по стратегическому развитию, ЗАО «КонсОМ СКС», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: eni@konsom.ru

Красильников Сергей Сергеевич – канд. техн. наук, доц. каф. электроники и микроэлектроники, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: wes-j@mail.ru. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3131-7193>

Крубцов Дмитрий Сергеевич – электромонтер, цех «Энергосервис», ООО «Объединенная сервисная компания», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: vozburk@mail.ru. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2128-1935>

Логунова Оксана Сергеевна – д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой вычислительной техники и

программирования, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: logunova66@mail.ru. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7006-8639>

Лукьянов Дмитрий Сергеевич – канд. техн. наук, директор департамента клиентов, ООО «Компас Плюс», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: lukyanov@list.ru

Лукьянов Сергей Иванович – д-р техн. наук, проф., директор института энергетики и автоматизированных систем, зав. каф. электроники и микроэлектроники, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: ieiac@magtu.ru. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4685-7627>

Мещеряков Виктор Николаевич – д-р наук, проф., зав. кафедрой электропривода, ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет», г. Липецк, Россия. E-mail: mesherek@stu.lipetsk.ru. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0984-5133>

Морковина Полина Сергеевна – студ. каф. автоматизированного электропривода и мехатроники, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: midnight-polina@mail.ru. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8339-8098>

Никифоров Геннадий Васильевич – д-р техн. наук, председатель совета директоров, ООО «Магнитогорскгазстрой», г. Магнитогорск, Россия.

Панов Александр Николаевич – канд. техн. наук, доц., начальник отдела инновационных разработок, ЗАО «КонсОМ СКС», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: panov.a@konsom.ru

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

Самарина Ирина Геннадьевна – ст. преподаватель каф. автоматизированных систем и управления, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: ig_samarina@inbox.ru. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0045-9028>

Титов Сергей Сергеевич – канд. техн. наук, ген. директор, ООО «НПП Система48», г. Липецк, Россия. E-mail: algebra934@yandex.ru. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4567-7328>

Филимонов Сергей Игоревич – ст. преподаватель, каф. электроэнергетики и автоматики, ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет», г. Белгород, Россия. E-mail: Sergey.filya@mail.ru. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8870-4998>

Хакимьянов Марат Ильгизович – канд. техн. наук, доц. каф. электротехники и электрооборудования предприятий, ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», г. Уфа, Россия. E-mail: hakimyanovmi@gmail.com. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3344-7469>

Хусаинов Фанур Фаатович – аспирант, каф. электротехники и электрооборудования предприятий, ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», г. Уфа, Россия. E-mail: fanur1991@rambler.ru

Чистяков Дмитрий Владимирович – канд. соц. наук, исполнительный директор, ЗАО «Кон-

сом СКС», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: dvc@konsom.ru

Шафиков Игорь Наилевич – аспирант, каф. электротехники и электрооборудования предприятий, ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», г. Уфа, Россия. E-mail: shafikov_in@mail.ru

Шохин Валерий Владимирович – канд. техн. наук, доц. каф. автоматизированного электропривода и мехатроники, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: shwww@mgn.ru. ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8804-2253>

Якимов Иван Александрович – ст. преподаватель, каф. мехатроники и автоматизации, ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (НИУ)», г. Челябинск, Россия. E-mail: yakimov_ivan@mail.ru. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6587-7570>

Уважаемые коллеги!

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

Журнал «Электротехнические системы и комплексы» основан в 1996 году на базе международного сборника научных трудов, в котором публиковались статьи студентов, аспирантов и ученых, как из России, так и из-за рубежа. Начиная с 2014 года «Электротехнические системы и комплексы» выпускается как журнал с периодичностью четыре номера в год.

С 02.02.2016 журнал входит в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук по группам научных специальностей 05.09.00 – электротехника, 05.13.00 – информатика, вычислительная техника и управление, 05.14.00 – энергетика.

Журнал публикует научные работы по следующим рубрикам:

- теория и практика автоматизированного электропривода;
- электро- и теплоэнергетика;
- электроснабжение;
- энерго- и ресурсосбережение;
- промышленная электроника, автоматика и системы управления;
- электротехнологии в промышленности;
- информационное, математическое и программное обеспечение технических систем;
- мониторинг, контроль и диагностика электрооборудования.

Публикация статей является бесплатной.

Статьи, направленные в адрес журнала, проходят обязательное научное рецензирование и редактирование. Несоответствие материалов требованиям к статьям может служить поводом для отказа в публикации.

Статья должна быть набрана в шаблоне, который размещен на сайте журнала esik.magtu.ru в разделе «Руководство для авторов». Там же находится инструкция по его заполнению, в которой приведены требования к оформлению статей.

Авторы статьи должны гарантировать, что их работа публикуется впервые. Если элементы рукописи ранее были опубликованы в другой работе (статье, монографии, автореферате и т.д.), в том числе на другом языке, авторы обязаны сослаться на более раннюю работу. При этом они обязаны указать, в чем существенное отличие новой работы от предыдущей и, вместе с тем, выявить ее связь с результатами исследований и выводами, представленными в предыдущей работе. Дословное копирование собственных работ или ее элементов более чем на 30% и их перефразирование не приемлемы!

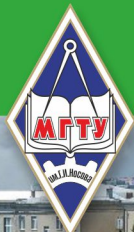
Пакет подаваемых документов:

- рукопись статьи;
- информация об авторах;
- экспертное заключение о возможности опубликования;
- лицензионный договор, заполненный на каждого автора в двух экземплярах (отсканированная копия отправляется в формате pdf, оригиналы – по почте вместе с остальными документами).

С уважением,

редакция журнала «Электротехнические системы и комплексы»

E-mail: ecis.red@gmail.com



Научно-образовательный центр «Шнейдер Электрик – МГТУ им. Г.И.Носова



Концептуальной основой НОЦ является интегрированная автоматизированная система управления (ИАСУ), позволяющая на технических и программных средствах SE изучать и проектировать как локальные объекты электроснабжения и электропривода, так и АСУ различных уровней. Такой подход при создании Центра дал возможность в процессе обучения не только изучать конкретное оборудование и программное обеспечение ИАСУ, но и разрабатывать собственные АСУ и системы автоматизации.

Наполнение центра современным оборудованием с возможностью включения его в АСУ различного уровня делает привлекательным прохождение теоретических и практических занятий как для разработчиков и проектировщиков, так и для служб эксплуатации и наладки промышленных предприятий.

Образовательный центр включает в себя компьютерный класс на 12 ПК и 24 посадочных места (разработка программно-технических комплексов с базовым программным обеспечением), мульти-медийный класс на 18 посадочных мест (проведение презентаций, докладов и теоретических занятий), 4 лабораторных стенда, моделирующих работу интегрированной распределенной АСУ участка, цеха.



Перечень направлений подготовки в рамках НОЦ для бакалавров и магистрантов:

- 27.03.04 и 27.04.04 «Управление в технических системах»;
- 13.03.02 и 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника» (профили «Электропривод и автоматика» и «Электроснабжение»);
- 15.03.06 и 15.04.06 «Мехатроника и робототехника» (профиль «Мехатронные системы в автоматизированном производстве»).

Совместно разработанные программы «Шнейдер Электрик– МГТУ им. Г.И.Носова:

- системы управления электроприводами на базе преобразователей частоты ATV32, ATV71 и ATV93 и библиотеки SoMove;
- примеры архитектур локальной автоматики. Особенности конфигурирования контроллера Modicon M251и разработка приложений SoMachin;
- интеграция оборудования распределения электроэнергии и АСУТП в единую систему управления. Организация сетей CANOpen и Ethernet. Современные подходы к построению программно-технических комплексов.