

Электротехнические системы и комплексы

Издается с января 1996 г.

№1(22), АПРЕЛЬ 2014

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

Редакционный совет

Председатель редсовета:

С.И. Лукьянов — проф., д-р техн. наук, директор института энергетики и автоматизированных систем МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия.

Зам. председателя редсовета:

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

Члены редакционного совета:

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

В.Д. Дмитриенко — проф. д-р техн. наук, НТУ «ХПИ», г. Харьков, Украина;

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

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

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

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

А.Е. Козярук – проф., д-р техн. наук, НМСУ Горный, г. Санкт-Петербург, Россия;

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

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

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

Редакционная коллегия

Главный редактор:

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

Заместитель главного редактора:

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

Члены редакционной коллегии:

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

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

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

С.М. Андреев — доц., канд. техн. наук, МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия; *Е.Б. Агапитов* — доц., д-р. техн. наук, МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия; *Ю.И. Савченко* — доц., канд. физ.-мат. наук, МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия.

Ответственный редактор:

Е.Г. Нешпоренко — доц., канд. техн. наук, МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия.

Технические редакторы:

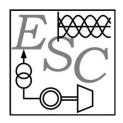
Е.А. Панова — канд. техн. наук, МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия; **Д.А. Савинов** — МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия.

© ФГБОУ ВПО «МГТУ», 2014

Адрес редакции:

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

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



ELECTROTECHNICAL SYSTEMS AND COMPLEXES

PUBLISHED SINCE JAN., 1996

№1(22) APR., 2014

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

Editorial committee

Head of editorial committee:

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

Vice Chairman of editorial committee:

Gennady P. Kornilov - Professor.,

D.Sc. (Eng.), NMSTU, Magnitogorsk, Russia.

Members of Editorial committee:

Nikolai F. Dzhagarov - Professor,

D.Sc. (Eng.), Varna, Bulgaria;

Valeryi D. Dmitrienko - Professor,

D.Sc. (Eng.), NTU «KhPI», Kharkov, Ukraine;

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

Kazhibek T. Tergemes - Professor,

Ph.D. (Eng.), Aktau, Kazakhstan.

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

Oleg I. Osipov - Professor, D.Sc. (Eng.),

NRU «MPEI», Moscow, Russia;

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

Leonid I. Tsitovitch – Professor, D.Sc. (Eng.),

«SUSU» (NRU), Cheluabinsk, Russia; Anatoliy M. Ziyzev - Professor, D.Sc. (Eng.),

UrFU named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia;

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

Editorial board

Editor-in-chief:

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

Deputy chief editor:

I.M. Yachikov – Professor., D.Sc. (Eng.),

NMSTU, Magnitogorsk, Russia;

Editorial board members:

A.S. Karandaev - Professor., D.Sc. (Eng.),

NMSTU, Magnitogorsk, Russia;

I.I. Barankova - Professor., D.Sc. (Eng.),

NMSTU, Magnitogorsk, Russia;

O.S. Logunova - Professor., D.Sc. (Eng.),

NMSTU, Magnitogorsk, Russia;

S.M. Andreev – Associate Professor,

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

E.B. Agapitov – Associate Professor,

D.Sc. (Eng.), NMSTU, Magnitogorsk, Russia;

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

Executive editor:

E.G. Neshporenko – Associate Professor,

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

Typographers:

E.A. Panova - Ph.D.(Eng.), NMSTU, Magnitogorsk, Russia;

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

© FSBI HPPE NMSTU, 2014

Tha publisher:

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

The Publishing House of Nosov Magnitogorsk State Technical University

e-mail: ecis.red@gmail.com

Prepared for publication by publishing center of NMSTU. Printed in the Printing MSTU Area Signed for press.

Order. Circulation – 500 items.

СОДЕРЖАНИЕ

Теория И практика автоматизированного электропривода4 Козярук А.Е., Таранов С.И. Унифицированные энергоэффективные электромеханические системы электропривода экскаваторно-транспортного комплекса......4 М.Г., Кузнецова В.Н. Бычков Реализация коррекции управляющих воздействий многокоординатного сервопривода на базе программируемого логического контроллера......7 Соловьев В.А., Черный С.П., Сухоруков С.И. Об эффективности борьбы с гололедными образованиями на проводах линий электропередачи.......... 14 Лукьянов С.И., Фомин Н.В., Васильев А.Е., **Хлыстов А.И.** Совершенствование электропривода тянущих роликов слябовых машин непрерывного Карандаев А.С., Храмшин В.Р. Совершенствование электроприводов и систем автоматического регулирования технологических параметров широкополосных станов горячей прокатки при расширении Васильев Б.Ю., Козярук А.Е. Релейно-импульсные системы управления асинхронными электроприводами: прямого и фаззи-логического управления ... 31 Дмитриенко В.Д., Заковоротный А.Ю. Математическая модель для исследования и оптимизации электропривода дизель-поезда...... 35 **Мешеряков В.Н., Диденко Е.Е.** Регулирование натяжения полосы в чистовой группе непрерывного широкополосного стана горячей прокатки по косвенному принципу......40 Омельченко Е.Я., Козин А.Н., Маколов В.Н., **Бовшик П.А., Попов С.Н.** Электрооборудование Брылина О.Г., Гельман М.В. Исследование трехфазного активного выпрямителя напряжения 47 Косматов В.И., Зиновьев А.М., Кочергин Г.Г., Карпова У.В. Структурная схема и динамика электропривода с энергосберегающим асинхронным двигателем при произвольной ориентации вращающейся системы координат50 Энерго- и ресурсосбережение...... 56 Ишметьев Е.Н., Панов А.Н., Романенко А.В., Васильев Е.Ю., Коробейников С.М. Опыт применения автоматизированных стационарных систем виброконтроля и вибродиагностики 56 Завьялов А.С., Завьялов Е.А., Сарваров А.С., Петушков М.Ю. Использование сигнатурного анализа в диагностике электродвигателя постоян-Павлов В.В., Логунова О.С., Каландаров П.И., Искандаров Б.П. угли Выбор соотношения шихтовых материалов плавки сталеплавильной печи

CONTENT

Theory and practise of automated electric drive $\ldots\ldots 4$
Kozjaruk A.E., Taranov S.I. Unified Energy Efficient Electromechanical Systems of Excavator—Transport
Complex Electric Drive4
Bychkov M.G., Kusnetsova V.N. Control Actions
Adjustment of Multicoordinate Servodrive Based on Programmable Logic Controller
Solovyev V.A., Chernyi S.P., Sukhorukov S.I. Power
Transmission Line Wires De-Icing Efficiency 14
Lukyanov S.I., Fomin N.V., Vasilyev A.E., Hlystov A.I. Improvement of Pulling Rollers Electric Drive of
Slab Continuous Casting Machine18
Karandaev A.S., Khramshin V.R. Improvement of Drives and Automatic Control Process Parameters of
Wide Strip Hot Rolling Mill in The Process of Product Range Expansion
Vasiliev B.Yu., Kozjaruk A.E. Relay and Pulse Control
Systems of Induction Motor Electric Drives: Direct and Fuzzy-Logic Control31
Dmitrienko V.D., Zakovorotnyj A.Yu. Mathematical
Model for Research and Optimisation of Diesel Train Electric Drive
Mescheryakov V.N., Didenko E.E Adjustment of Strip Tension in Finishing Train of Continuous Hot-Rolling Mill on Indirect Principle
Omelchenko E.Ya., Kozin A.N., Makolov V.N., Bovshik P.A., Popov S.N. Electrical Equipment of Modern Shops of Magnitogorsk Iron and Steel Works
Brylina O.G., Gelman M.V. Study of Three-Phase Active Rectifier47
Kosmatov V.I., Zinoviev A.M., Kochergin G.G.,
<i>Karpova U.V.</i> The Block Diagram and Dynamics of The Electric Drive with The Energy Saving Induction
Motor at The Arbitrariest Orientation of Rotating Coordinate System
Energy- and resources-economy56
Ishmetyev E.N., Panov A.N., Romanenko A.V.,
Vasilyev E.Yu., Korobeynikov S.M. Practical Experience of Automated Stationary Vibration Control and Vibration Diagnostics System Application
Zaviyalov A.S., Zaviyalov E.A., Sarvarov A.S., Petushkov M.Y. Signature Analysis Application for DC Motor Diagnostics
Pavlov V.V., Logunova O.A., Kalandarov P.I., Iskandarov B.P. ugli Arc Furnace Tap Charging Material Proportion Selection for Its Work in Energy Saving Mode

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

УДК 621.313

Козярук А.Е., Таранов С.И.

Унифицированные энергоэффективные электромеханические системы электропривода экскаваторно-транспортного комплекса

На горнодобывающих предприятиях важнейшими задачами являются снижение себестоимости продукции и повышение энергоэффективности при росте объемов выпускаемой продукции. Данные факторы указывают на увеличение нагрузки на существующие производственные мощности, что влечет за собой снижение срока службы оборудования. В данной статье рассмотрены основные стратегические направления развития горнотранспортного комплекса (ГТК), предложен подход к унификации состава оборудования в структуре привода, что позволит оптимизировать работу ГТК предприятий и, как следствие, сократить себестоимость выпускаемой продукции.

Ключевые слова: самосвал, экскаватор, унификация, оптимальная загрузка, электропривод, режимы работы.

Введение

Основными составляющими рентабельного функционирования добывающих предприятий является эффективная организация основных и обслуживающих производственных процессов, в частности, организация системы обслуживания существующих добычных машин и оборудования и формирование горнотранспортного комплекса, которые являются основой для бесперебойной работы добывающего предприятия [1].

Для увеличения энергоэффективности функционирования ГТК необходимо изменить стратегический подход к использованию и обслуживанию основных добывающих мощностей. Для этого можно выделить следующие направления стратегического развития:

- связь экскаватора и самосвала в добычной комплекс и оптимизация времени, затрачиваемого на загрузку автосамосвала;
- переход на использование электропривода переменного тока на основных рабочих узлах экскаватора и самосвала;
- унификация структуры электропривода самосвала и экскаватора;
- единый подход к диагностике остаточного ресурса электромеханического оборудования ГТК;
- использование высокоэффективных алгоритмов формирования выходного напряжения преобразователя.

Рекомендации по созданию ГТК

Вследствие роста объемов выемки горной массы растет потребность в увеличении типоразмеров экскаваторов и самосвалов. Исходя из мировой практики выбора вместимости ковша экскаватора и грузоподъемности самосвала, число циклов экскавации для оптимальной загрузки одного самосвала не должно превышать 3-5 [2].

Данный подход является наиболее оптимальным и экономичным при работе ГТК, поскольку позволяет сокращать время простоя экскаватора и самосвалов. Из этого следует, что выбор типа самосвала и экскаватора для определенного вида работ и их связь в комплекс является первоочередной задачей. В таблице приведено сопоставление экскаваторов и самосвалов, обеспечивающее необходимое число циклов экскавации.

Перспективная линейка экскаваторов и самосвалов [4]

и самосвалов [4]							
Тип экскаватора	Рекомендуемая грузоподъемность само- свала, т						
ЭКГ-12К, ЭКГ-12М	90-150						
ЭКГ-18Р/20К, ЭКГ-20М	120-180						
ЭКГ-32Р, ЭКГ-35К	190-240						
ЭКГ-40	250-320						
ЭКГ-50	320-450						

Экскаваторы ЭКГ-32 и ЭКГ-50, производимые ООО «ИЗ-КАРТЕКС им. П.Г. Коробкова», оснащаются электроприводом переменного тока с цифровой системой управления на основе асинхронного двигателя с КЗ ротором. Это значительно повышает надежность привода, увеличивает его КПД, улучшает динамические характеристики и снижает энергопотребление [3]. Связь экскаватора и самосвала в добычной комплекс должна производиться с учетом вышеуказанных критериев. Примером горнотранспортного комплекса может служить комплекс на основе экскаватора ЭКГ 32Р и самосвала БелАЗ грузоподъемностью от 190 до 240 т. Вместимость сменных ковшей экскаватора ЭКГ 32Р составляет 26, 35 и 42 м³. В ковше экскаватора может находиться до 63 т массы породы, исходя из этого выбирается используемый тип ковша и грузоподъемность самосвала, обслуживающего экскаватор.

Для примера расчета по основным критериям (оптимальному числу циклов экскавации самосвала и весовому модулю) возьмем вариант с самосвалом грузоподъемностью 220 т и вместимостью ковша экскаватора 35 м³ (с максимальным весом породы в ковше до 63 т). В этом случае число циклов экскавации будет численно равно весовому модулю:

$$\mu_B = n = \frac{q_a}{q_e} = \frac{220}{63} = 3,49,$$
(1)

где $\mu_{\scriptscriptstyle R}$ – весовой модуль; n – число циклов экскава-

ции; q_a – грузоподъемность самосвала; q_e – масса породы в ковше экскаватора.

Такое соотношение обеспечивает загрузку самосвала за 4 цикла экскавации, что попадает в заданный диапазон и является приемлемым с точки зрения построения рабочего процесса.

Унификация состава ЭП

Логичным является вопрос унификации электроприводов самосвалов и экскаваторов, что позволит достичь значительного экономического эффекта при эксплуатации ГТК. Рассматривать возможность унификации необходимо, прежде всего, в структуре и алгоритмах системы управления приводом. На рис. 1 и 2 [4] приведены электрические схемы существующих электроприводов переменного тока экскаваторов и самосвалов. Как видно из рис. 1 и 2, разница структуры состоит только в способе получения питающего напряжения: экскаватор получает питание от высоковольтной линии 6 кВ, подходящей к нему в виде гибкого кабеля; самосвал получает питание от синхронного генератора СГ, приводимого во вращение дизельным двигателем.

Приводы содержат в своем составе выпрямитель и двухуровневый автономный инвертор напряжения. Применение активного выпрямителя в схемах электропривода экскаватора обусловлено его возможностью обеспечивать значение коэффициента мощности, близкого к единице, меньший коэффициент нелинейных искажений (по сравнению с диодным многопульсным выпрямителем), а также возможность работы во всех четырех квадрантах механической характеристики с автоматической рекуперацией энергии в питающую сеть [5, 6].

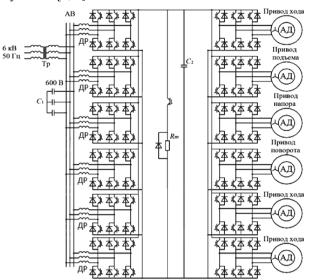


Рис. 1. Схема приводов переменного тока экскаватора ЭКГ 32 Р

Схема управления активным выпрямителем построена по векторному принципу с ориентацией по вектору напряжения сети. Особенности режимов работы привода — ударные нагрузки, необходимость ограничения которых определяет требования по максимальному быстродействию в контуре момента.

В системах управления приводами может быть реализован один из способов формирования напряже-

ния питания: PWM (Pulse Width Modulation), SVPWM (Space Vector Pulse Width Modulation), DTC (Direct Torque Control). Способ формирования напряжения с помощью PWM требует постоянной частоты переключения ключей инвертора. Кроме того, для нормальной работы двигателя выпрямленное напряжение на входе инвертора должно в 2 раза превышать амплитудное значение фазного напряжения двигателя (включенного в «звезду»). Этот способ широко применяется ввиду простоты его реализации и благодаря плавности вращения вектора напряжения [7].

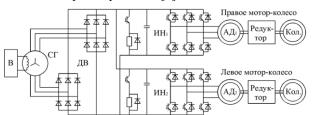


Рис. 2. Схема привода переменного тока самосвала «БелАз» грузоподъемностью 130-220 т

Ранее в различной литературе были рассмотрены структуры электропривода с применением систем DTC, обеспечивающих максимальное быстродействие по контуру момента. Система формирования напряжения DTC выполнена по алгоритму прямого управления моментом, имеет более простую процедуру настройки, в отличие от систем PWM и SVPWM, и содержит всего один ПИ-регулятор скорости. Способ формирования напряжения основан на табличном переключении ключей инвертора, при этом ключи переключаются релейными регуляторами, работающими в скользящем режиме.

Сигналом обратной связи во внешнем контуре служит сигнал, поступающий с датчика частоты вращения двигателя. В системах DTC это либо измеренный сигнал на выходе вращающегося датчика частоты вращения ротора двигателя, либо вычисленный сигнал, пропорциональный частоте вращения ротора двигателя в так называемых бездатчиковых системах. Необходимо отметить, что используемый в литературе термин «бездатчиковый» («sensorless») относится только к вращающемуся датчику частоты вращения. Наличие в системах DTC датчиков напряжения и тока статора двигателя обязательно. Внутренние контуры регулирования в системе DTC представляют собой дискретную часть системы. Они содержат релейные регуляторы потокосцепления статора и электромагнитного момента двигателя. Эти регуляторы обязательно должны иметь гистерезисный допуск. В зарубежных публикациях такие регуляторы называются «hysteresis flux comparator» и «hysteresis torque comparator» [7].

Выводы

- 1. Увеличение типоразмеров экскаваторов при условии их использования в комплексе с самосвалами соответствующей грузоподъемности позволит снизить себестоимость извлечения горной массы.
- 2. Наиболее приемлемым типом электропривода для ГТК является привод переменного тока на основе асинхронных электродвигателей.
- 3. Высокая степень унификации ЭМО позволит снизить его стоимость на стадии проектирования, а

также сократить расходы при эксплуатации и ремонте оборудования.

Список литературы

- 1. Паладеева Н.И. Современные тенденции рынка экскаваторов для горных предприятий // Горное оборудование и электромеханика. 2011. №5. С. 10-14.
- 2. Козярук А.Е., Самолазов А.В., Таранов С.И. Направления повышения эффективности эксплуатации экскаваторно-автомобильных комплексов на открытых горных работах // Горное оборудование и электромеханика. 2014. №1. С. 6-11.
- 3. Карьерный автотранспорт стран СНГ в XXI веке / П.А. Мариев, А.А. Кулешов, А.Н. Егоров, И.В. Зырянов СПб.: Наука, 2006. 387 с.
 - 4. Ганин А.Р., Донченко Т.В., Шибанов Д.А. Практиче

- ские результаты внедрения экскаваторов новой продуктовой линейки ООО «ИЗ'КАРТЭКС имени П.Г. Коробкова» на горных предприятиях России // Горная промышленность. 2013. №2(108). С. 2-5.
- 5. Высокодинамичные энергоэффективные электроприводы горных машин / Б.З. Дробкин, А.Е. Козярук, А.П. Емельянов, А.П. Свириденко // Горное оборудование и электромеханика. 2011. №4. С. 34-39.
- 6. Электроприводы и системы с электрическими машинами и полупроводниковыми преобразователями (моделирование, расчет, применение): монография / М.В. Пронин, А.Г. Воронцов, П.Н. Калачиков, А.П. Емельянов. СПб.;М.: Силовые машины: Электросила, 2004. 252 с.
- 7. Козярук А.Е., Рудаков В.В. Прямое управление моментом в электроприводе переменного тока машин и механизмов горного производства. СПб.: СПГГИ (ТУ), 2008. 100 с.

INFORMATION IN ENGLISH

UNIFIED ENERGY EFFICIENT ELECTROMECHANICAL SYSTEMS OF EXCAVATOR—TRANSPORT COMPLEX ELECTRIC DRIVE

Kozjaruk A.E., Taranov S.I.

At the mining enterprises the major tasks are decrease in product cost and energy efficiency increase with a growth of outputs. These factors indicate increase in loading at existing capacities that involves decrease in service life of the equipment. In this article the main development strategic directions of a mining-transport complex are considered, a new approach to unification of structure of the equipment in drive structure that will allow to optimize the work of the enterprises of mining-transport complexes is offered and, as a result, to reduce the prime cost of products.

Keywords: truck, excavator, unification, optimum work load, electric drive, modes of operation.

REFERENCES

- 1. Paladeeva N.I. Sovremennye tendencii rynka ekskavatorov dlja gornyh predprijatij [Modern trends in the market of excavators for mining companies]. *Gornoe oborudovanie i elektromehanika* [Mining equipment and electromechanics]. 2011, no.5, pp. 10-14.
- 2. Kozjaruk A.E., Samolazov A.V., Taranov S.I. Napravlenija povyshenija jeffektivnosti jekspluatacii jekskavatorno–avtomobilnyh kompleksov na otkrytyh gornyh rabotah [Ways of operating efficiency improvement for excavator and automobile complexes in open cast mining]. *Gornoe oborudovanie i elektromehanika* [Mining equipment and electromechanics]. 2014, no.1, pp. 6-11.
- 3. Mariev P.A., Kuleshov A.A., Egorov A.N., Zyrjanov I.V. Karyernyj avtotransport stran SNG v XXI veke [Open-pit

vehicles of CIS countries in the XXI century]. SPb.: Nauka, 2006. 387 p.

- 4. Ganin A.R., Donchenko T.V., Shibanov D.A. Prakticheskie rezultaty vnedrenija jekskavatorov novoj produktovoj linejki OOO «IZ'KARTJeKS imeni P.G. Korobkova» na gornyh predprijatijah Rossii [The results of excavators application from the new product range of P.G. Korobkov IZ'KARTJeKS ltd. At mining enterprises of Russia]. Gornaja promyshlennost [Mining industry]. 2013, no.2(108), pp. 2-5.
- 5. Drobkin B.Z., Kozjaruk A.E., Emeljanov A.P., Sviridenko A.P. Vysokodinamichnye energoeffektivnye elektroprivody gornyh mashin [Dynamic energy-efficient electric drives of mining machines]. *Gornoe oborudovanie i elektromehanika* [Mining equipment and electromechanics]. 2011, no.4, pp. 34-39.
- 6. Pronin M.V., Voroncov A.G., Kalachikov P.N., Emel'janov A.P. *Jelektroprivody i sistemy s jelektricheskimi mashinami i poluprovodnikovymi preobrazovateljami (modelirovanie, raschet, primenenie)* [Electric drives and systems with electrical machines and semiconductor converters (design, calculations, application)]: monograph. SPb.;M.: Silovye mashiny, Jelektrosila, 2004. 252 p.
- 7. Kozjaruk A.E., Rudakov V.V. *Prjamoe upravlenie momentom v jelektroprivode peremennogo toka mashin i mehanizmov gornogo proizvodstva* [Direct torque control in AC electric drives of mining machines and equipment]. SPb.: SPGGI (TU), 2008, 100 p.

621.316.79

Бычков М.Г., Кузнецова В.Н.

РЕАЛИЗАЦИЯ КОРРЕКЦИИ УПРАВЛЯЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ МНОГОКООРДИНАТНОГО СЕРВОПРИВОДА НА БАЗЕ ПРОГРАММИРУЕМОГО ЛОГИЧЕСКОГО КОНТРОЛЛЕРА

В статье приведены результаты экспериментального исследования контура регулирования положения одной оси многокоординатного электропривода, реализованного на базе программируемого логического контроллера Modicon M258 и сервопривода Lexium 32. Подтверждено негативное влияние на качество переходных процессов наличия в контуре регулирования квантования по времени, связанного с циклом расчёта и обмена информацией между контроллером и сервоприводами. Решение проблемы состоит во введении в программную реализацию регулятора положения эталонной модели контура положения, рассчитывающей желаемый переходный процесс, и корректирующих связей по производной от задания положения и по сигналу скорости в эталонной модели.

Ключевые слова: многокоординатный электропривод, регулятор положения, квантование по времени, эталонная модель, экспериментальные исследования.

Современные системы многокоординатного электропривода позволяют упростить кинематические схемы технологических установок посредством согласованного управления частотно-регулируемыми электроприводами индивидуальных осей. Высокие точностные и динамические показатели в многокоординатных системах управления (СУ) движением достигаются как применением специальных быстродействующих электроприводов по каждой координате, так и за счет их согласованного централизованного управления с помощью специального контроллера управления движением, имеющего достаточно мощный и высокопроизводительный процессор [1-3]. В таких системах для связи центрального контроллера с электроприводами применяются специальные высокоскоростные интерфейсы. Для конкретных применений с относительно невысокими технологическими требованиями по точности и быстродействию использование упомянутых выше специализированных технических средств может быть нерациональным по экономическим соображениям. Примерами таких применений могут служить раскройные столы, плоттеры, упаковочные машины и многие другие. В этих случаях альтернативой построению многокоординатных систем движения может быть применение в качестве исполнительных устройств частотно-регулируемых электроприводов общепромышленного назначения (ПЧ-АД), координация их перемещений с помощью типового программируемого контроллера (ПЛК) и реализация информационных связей в системе интерфейсов, традиционно применяемых в распределенных АСУТП (рис. 1). Применение типового оборудования позволяет снизить стоимость системы, упрощает её эксплуатацию, расширяет возможности дальнейшей модернизации.

В настоящее время микропроцессорные средства управления являются основным средством реализации систем управления электроприводов различного назначения. Микропроцессор как элемент СУ обладает комбинацией специфических свойств дискретного элемента: квантование входных и выходных сигналов по уровню и по времени. Распределенная СУ движением является многопроцессорной, обмен информацией между ведущим контроллером и контроллерами отдельных осей производится по локальным информационным сетям. При этом в контурах управления содержится несколько дискретных элементов с различными временными задержками ΔT_{d1} , ΔT_{d2} , ΔT_{d3} , что существенно усложняет теоретический анализ таких систем.

В [4] рассмотрены результаты исследования на компьютерной модели системы управления одной оси многокоординатного электропривода, учитывающей дискретизацию по времени в контуре регулирования положения. Получены зависимости показателей качества регулирования от значения интервала дискретизации при типовых управляющих воздействиях. Установлено, что даже при интервале квантования T_d , соизмеримом с эквивалентной постоянной времени внутренних контуров регулирования T_μ , перерегулирование превышает 10%. При $T_d=15T_\mu$ оно возрастает до 80%, дальнейшее увеличение T_d приводит к неустойчивости системы.

При реализации регуляторов положения индивидуальных осей в ПЛК эквивалентное значение T_d зависит от: числа управляемых осей, времени цикла обработки программы передающего и принимающего устройств, заданной скорости передачи данных. Кроме того, T_d может быть непостоянным и иметь широкий диапазон изменения из-за многих факторов.

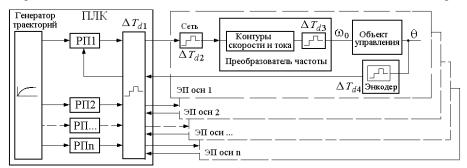


Рис. 1. Функциональная схема распределенной системы управления движением с реализацией контуров регулирования положения в ПЛК

Структура управления, использующая дополнительные сигналы производной задания и скорости в эталонной модели объекта управления для компенсации влияния дискретизации на качество переходных процессов при управляющем воздействии приведена на рис. 2.

Для компенсации влияния дискретизации на качество переходных процессов при управляющем воздействии в эталонной модели объекта управления используют дополнительные сигналы производной задания и скорости (рис. 2).

По способу расчета эталонной модели в ПЛК установлено: при П-регуляторе положения и настройке на технический оптимум порядок системы дифференциальных уравнений модели может быть понижен до второго без существенного ухудшения качества переходного процесса в контуре положения с коррекцией; требования к быстродействию контроллера для реализации эталонной модели объекта управления - шаг интегрирования $T_s = 3T_{\mu}$.

Структура с эталонной моделью подробно рассмотрена в [5]. Корректирующее воздействие в рассматриваемой структуре управления не устраняет ошибок от возмущающих воздействий, основным из которых является нагрузка. Установившуюся ошибку можно устранить, например, с помощью ПИрегулятора скорости, однако динамическая ошибка останется. Вплоть до T_d =5 T_{μ} дискретность управляющего воздействия не оказывает существенного влияния на переходный процесс. Максимальное отклонение по положению возрастает всего на 4% по сравнению с моделью без квантования.

Для экспериментальной проверки предложенной структуры управления использовалась лабораторная установка фирмы Shneider Electric, в которой ПЛК Modicon M258 по сети CANopen был связан с двумя комплектами (сервопреобразователь Lexium 32 + серводвигатель BSH 55MM 0,5 H·м, 6000 об/мин). Для управления режимами работы и изменения различных уставок использовалась графическая панель оператора XBTGT1335. Программирование осуществлялось в программном комплексе SoMachine.

Первоначально программа управления в ПЛК была заключена в основной задаче MAST, выполняемой с приоритетом 15 и фиксированным интервалом 20 мс, контролируемой сторожевым таймером с уставкой 100 мс. К задаче был подключён программный модуль MotionPrg, выполняющий большинство задач управления с помощью функциональных блоков из библиотеки «Motion Control» (префикс MC в имени функционального блока). В этой библиотеке группа блоков Single axis предназначена для выполнения функций или движений одной независимой оси. Программный модуль MotionPrg для управления сервоприводами использует следующие функциональные блоки:

MC_Power_LXM - инициализация привода;

MC_MoveVelocity_LXM - режим задания профиля скорости.

Режим профиля положения:

MC_MoveAbsolute_LXM – абсолютное перемещение; MC_MoveRelative_LXM - относительное перемеще-

MC_Home_LXM - режим Homing, перемещение в исходное положение или его задание;

MC_Stop_LXM - режим остановки.

Группа блоков Administrative используется для конфигурационных задач (чтение и запись параметров, восстановление конфигурации устройства). Она включает в себя следующие блоки:

Чтение параметра:

MC_ReadActualTorque_LXM – чтение текущего значения момента;

MC ReadActualVelocity_LXM - чтение текущего значения скорости;

MC_ReadActualPosition_LXM - чтение текущего значения положения;

MC_ReadStatus_LXM - чтение состояния LXM;

MC_ReadParameter_LXM – чтение параметра LXM. Запись параметра:

MC_WriteParameter_LXM – запись параметра LXM; SetDriveRamp_LXM – задание темпа разгона; MC_Reset_LXM – перезапуск, сброс ошибок.

Показатели настройки внутренних контуров СЕРВОПРИВОДА

Для получения осциллограмм настройки внутренних контуров сервопривода задавался режим задания профиля скорости помощью блока c MC_MoveVelocity_LXM. Из осциллограмм отработки скачков задания скорости $n_3 = 200$, 500, 1000 об/мин при $\varepsilon_{\text{max}} = 100 \cdot 10^3 \, (\text{об/мин})/\text{с}$ и начальной скорости 60 об/мин следует, что при уменьшении скачка задания сохраняется форма графиков и время переходного процесса (рис. 3, а).

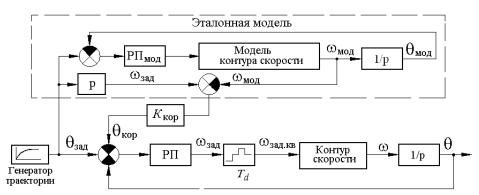
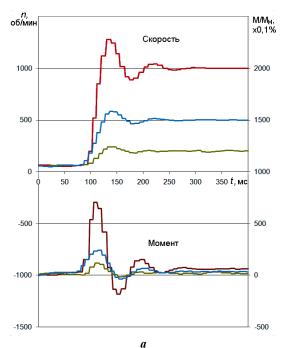


Рис. 2. Структура системы регулирования положения с коррекцией по производной задания и по скорости эталонной модели



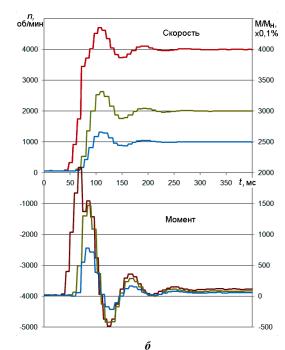


Рис. 3. Осциллограммы отработки скачков задания скорости при $\varepsilon_{\rm max}=100\cdot 10^3$ мин⁻¹/с: $a-n_3=200,\,500,\,1000$ об/мин; $6-n_3=1000,\,2000,\,4000$ об/мин

При увеличении скачка задания $n_3 = 2000$ об/мин (рис. 3, б) отработка также происходит в линейной зоне при сохранении формы графиков скорости и ускорения. При отработке $n_3 = 4000$ об/мин начинает действовать ограничение ускорения, хотя форма графиков изменяется незначительно. Увеличивается общее время переходного процесса и максимум момента, но не вдвое, а всего на 30% по сравнению с отработкой скачка $n_3 = 2000$ об/мин. Для наглядности графики совмещены по участкам окончания переходных процессов (практически совпадают t > 100 Mc).

Полученные результаты дают приближённую оценку эквивалентной малой постоянной времени $T_{\mu}=50/9,4\approx 5$ мс для контура скорости и границы работы без ограничений ($n\leq 2000$ об/мин, $M\leq 150\%$).

Отработка скачка задания положения регулятором сервопривода

«Заложенный» в сервопреобразователь регулятор положения исследовался в режиме отработки абсолютного перемещения с помощью блока МС_МоveAbsolute_LXM. Из осциллограмм углового перемещения θ и частоты вращения n при отработке скачков задания положения θ_3 в диапазоне $100...700^\circ$ и заданном ограничении $n_{\rm max}=1000$ об/мин (**puc. 4**, a) следует, что только до $\theta_3=200^\circ$ ограничение скорости не влияет на форму графиков и время переходного процесса, при $\theta_3>200^\circ$ в графике $\theta(t)$ присутствует участок с постоянным наклоном. Во всех случаях переходный процесс завершается без перерегулирования.

Дальнейшее увеличение θ_3 (рис. 4, δ) более отчётливо выявляет характер нарастания скорости до установившегося значения на начальном участке переходного процесса и идентичность участков, завершающих выход из ограничения скорости на заданное значение перемещения. Хотя нарастание скорости носит колебательный характер, оно происходит без перерегулиро-

вания, что может быть связано с особенностями реализации в сервоприводе контура регулирования положения

Увеличение ограничения скорости до $n_{\rm max}=2000$ об/мин примерно вдвое сокращает время отработки $\theta_{\rm 3}=2000^{\circ}$ или обеспечивает неизменное время отработки при увеличении скачка задания до $\theta_{\rm 3}=4000^{\circ}$ (рис. 5). При этом сохраняется форма переходных процессов как на начальных, так и на завершающих участках.

Таким образом, установлено, что настройка внутреннего контура положения сервопривода близка к оптимальной, обеспечивающей отработку заданного перемещения без перерегулирования как в области малых, так и больших перемещений. Заданный уровень ограничения ускорения не достигается, поэтому малые перемещения (без ограничений переменных) сразу переходят в большие (с ограничением скорости). При $n_{\text{max}} = 1000$ об/мин граница находится в районе $\theta_{\text{3}} = 200...300^{\circ}$ и линейно растет при увеличении n_{max} .

Режим постоянной заводки с регулятором положения в сервоприводе

Для получения режима так называемой «постоянной заводки» (отработки линейного нарастания задания положения) в основном программном модуле MotionPrg или добавочной задаче Task_Measure, связанной с программным модулем Measure_PRG, формируется линейное нарастание задания положения $\theta_3 = \epsilon_3 t$ с помощью функционального блока сложения ADD, выполняющего операцию

SetPosDrive1:=SetPosDrive1+SetDeltaPosDrive1

при входном сигнале %IX1.3=1. Период выполнения Task_Measure составляет 1 мс, т.е. существенно меньше, чем MAST. Наклон θ_3 и, следовательно, значение скорости заводки n_3 определяется значением приращения SetDeltaPosDrive1.

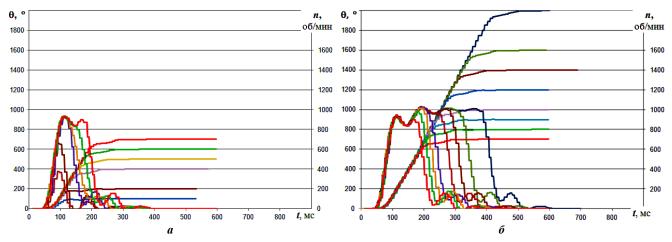


Рис. 4. Осциллограммы θ и n при отработке скачков θ_3 и ограничении $n_{\max} = 1000$ об/мин

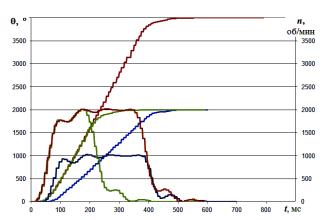
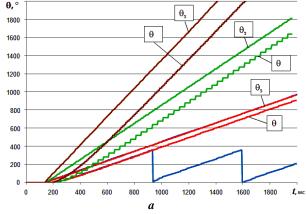


Рис. 5. Осциллограммы θ и n при отработке скачков θ_3 в диапазоне 20000-4000° и ограничении $n_{\rm max}$ =2000 об/мин

На **рис. 6** приведены осциллограммы такого режима для трех различных значений скорости заводки: $n_3 = 87$, 167 и 262 об/мин. На **рис. 6**, a для малой скорости заводки сигнал положения θ приведен в двух вариантах: при непрерывном нарастании θ и при изменении θ в пределах одного оборота. Второй вариант получается при задании режима движения Modulo (установки параметра LXM32 MOD_Enable=1). Такой режим предназначен для отработки заданного абсолютного положения оси в пределах одного или нескольких оборотов. Отличие от обычного (непрерывного) режима состоит в том, что отработка из текущего положения производится по кратчайшему направлению. В дальнейших экспериментах этот режим не использовался.

На рис. 6, δ показаны графики рассогласования $\Delta\theta$ на входе регулятора положения сервопривода и текущего значения скорости n. Как и следует из теории следящих систем, при пропорциональном регуляторе положения скоростная ошибка растёт пропорционально скорости заводки. Высокочастотные колебания в сигнале $\Delta\theta$ обусловлены главным образом заданным временем квантования в процедуре измерения и интервалом измерения положения в LXM32. Для $n_3 = 87$ и 262 об/мин оно составляет 12 мс (функциональные блоки измерения положения, скорости и момента вынесены в модуль Measure_PRG), а для 167 об/мин -40 мс (блоки измерения располагались в главном модуле MotionPrg).



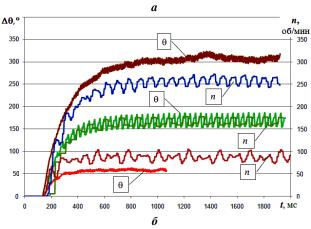


Рис. 6. Режим «постоянной заводки» для трех различных значений скорости заводки

Для уменьшения скоростной ошибки в системе управления сервопривода LXM32 предусмотрена подача сигнала компенсации, пропорционального скорости изменения задающего сигнала θ_3 . Степень компенсации задаётся параметром Velocity feed-forward CTRL1 KFPp в пределах 0-200%. На рис. 7 приведены осциллограммы такого режима CTRL1_KFPp = 100% для трех различных значений скорости заводки. По сравнению с отсутствием компенсации (см. **рис. 6**) значение $\Delta\theta$ существенно уменьшается и не превышает в среднем 75° даже при вдвое большей, чем на рис. 6, скорости заводки. Однако при этой скорости заводки значительно возрастают наблюдаемые колебания скорости.

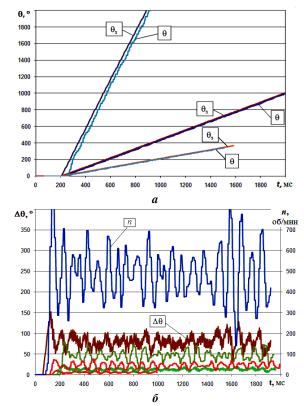


Рис. 7. Режим «постоянной заводки» при подаче сигнала компенсации, пропорционального скорости изменения θ_3

Отработка скачка задания положения регулятором в ПЛК

Для адаптации исходного варианта ПО к проведению дальнейших экспериментальных исследований в нем были произведены следующие изменения.

Для получения максимальной частоты регистрации текущих значений переменных сервопривода функциональные блоки их чтения были вынесены в отдельную задачу Task_Measure с приоритетом 3 и циклом повторения 1 мс. В программном модуле Measure_PRG использовались следующие вызовы функциональных блоков и дополнительные переменные:

```
PROGRAM Measure_PRG
VAR
ReadActTotqueDrive1:
MC_READACTUALTORQUE_LXM;
ReadActVelDrive1: MC_ReadActualVelocity_LXM;
ReadActPosDrive1: MC_ReadActualPosition_LXM;
MvtAbsDrive1a: MC_MoveAbsolute_LXM;
mTick: BOOL;
mMoveAbsEnable: BOOL:= 0;
END VAR
```

Для практического подтверждения полученных ранее теоретических результатов в дополнительном программном модуле ПЛК был реализован пропорциональный регулятор положения, выходной сигнал которого выдавался в качестве задания на скорость сервопривода, который в данном случае использовался в режиме отработки скорости.

Модуль REG_PRG подключён к циклически выполняемой задаче Task_Reg. В программном модуле используются следующий вызов функционального блока и дополнительные переменные:

```
PROGRAM REG_PRG
VAR
mTick2: BOOL;
VeloDriveReg1: MC_MoveVelocity_LXM;
PosRegOut0: DINT;
Out_CorReg: DINT;
END VAR
```

Предварительными исследованиями установлено, что библиотечный блок MC_MoveVelocity_LXM воспринимает информацию с входа задания Velocity и начинает отработку этого задания только по положительному фронту сигнала на входе управления Execute. Для организации отработки постоянно изменяющегося сигнала PosRegOut2 во входную цепь Execute к сигналу управления %IX1.3 был добавлен контакт вспомогательной переменной mTick2, которая инвертирует своё значение при каждом вызове модуля REG_PRG. Таким образом, при заданном значении интервала TREG_PRG вызова задачи Task_Reg реальное значение интервала квантования контура регулирования положения в ПЛК составляло $T_{\text{кв}} \ge 2T_{\text{REG-PRG}}$.

Для оценки влияния квантования по времени на качество переходного процесса изменялся период сканирования программы расчета регулятора. Минимальное значение $T_{\rm kB}$ составляло 2 мс, что примерно в два раза меньше эквивалентной некомпенсируемой постоянной времени сервопривода. Тем самым создавалась ситуация, когда квантование по времени не сказывалось на качестве переходного процесса, которое определялось значением коэффициента регулятора положения $K_{\rm pn}$ и настройкой внутреннего контура скорости. Как показали эксперименты, программно реализованный в ПЛК регулятор обеспечил $T_{\rm per} = 160$ мс, что соизмеримо с встроенным регулятором положения в сервопреобразователе.

При увеличении $T_{\text{\tiny KB}}$ до 40 мс перерегулирование по положению увеличивается до 17% (рис. 8, а). Увеличение $T_{\kappa B}$ до 80 мс приводит к перерегулированию в 30% (рис. $8, \delta$). Таким образом, экспериментально проверено влияние квантования по времени на показатели качества переходных процессов в контуре регулирования положения. На рис. 8, а на рассмотренный ранее переходный процесс отработки скачка задания положения при $T_{\text{\tiny KB}} = 40 \,\text{мc}$ наложены графики выходной координаты модели $\theta_{\text{мод}}$ и её производной $n_{\text{мод}}$. Следует заметить, что модель начинает отрабатывать скачок задания практически без задержки, а привод - с переменной задержкой, поскольку $T_{\text{инт}} << T_{\text{кв}}$ и интервал расчета регулятора положения никак не синхронизировался с периодом повторения скачков задания. Приведенные экспериментальные результаты подтверждают полученные в [4] теоретические данные о негативном влиянии квантования по времени управляющего воздействия на выходную координату системы регулирования перемещения при реализации регулятора в ПЛК.

Для компенсации негативного влияния квантования по времени был программно реализован сигнал коррекции по скорости, получаемый из эталонной модели (см. рис. 2). Для реализации такого управления в ПЛК добавлен модуль программы расчета эталонной модели, выполняемый с шагом интегрирования $T_s = 10$ мс.

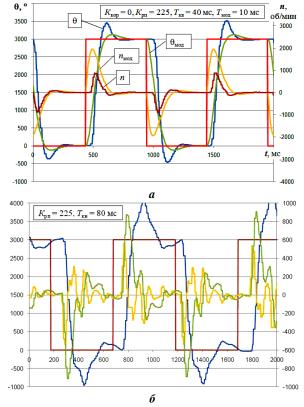


Рис. 8. Переходные процессы отработки приводом скачков заданий в режиме позиционирования без коррекции

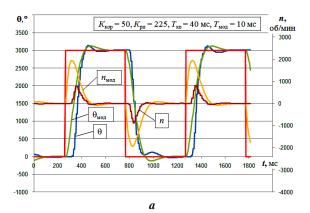
При введении дополнительного корректирующего сигнала, рассчитанного в ПЛК с $T_s = 2T_{\rm u}$, перерегули

рование θ уменьшается до 5% и не превосходит перерегулирования модели (**рис. 9**). Однако и здесь проявляется отсутствие синхронизации запуска модели с интервалом квантования при расчёте регулятора положения – график отработки фронта спадания θ_3 немного отличается от отработки фронта нарастания θ_3 . Сравнение с графиками **рис. 8** показывает эффективность введения корректирующих сигналов с целью стабилизации динамических свойств и сохранения оптимального характера переходного процесса отработки скачка задания при изменении интервала квантования в широких пределах — от 2 до 80 мс.

Режим постоянной заводки с регулятором положения в ПЛК

Приведенные на **рис. 10** осциллограммы отработки постоянной заводки со скоростью 1000 об/мин при полном отсутствии коррекции аналогичны по виду осциллограммам **рис. 6**, рассмотренным ранее для режима постоянной заводки с регулятором положения в сервоприводе.

Осциллограммы рис. 11 демонстрируют полную компенсацию установившейся скоростной ошибки при скоростях заводки 1000, 500 и 200 об/мин. Следует отметить, что на начальном этапе отработки возникают значительные перерегулирования, однако они обусловлены скачкообразным нарастанием производной от задания положения. В реальной ситуации формирование задания может производиться с ограничением рывка, что уменьшит значения перерегулирования по скорости.



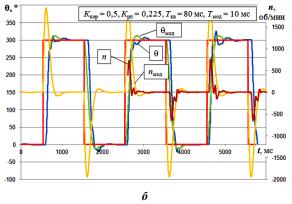
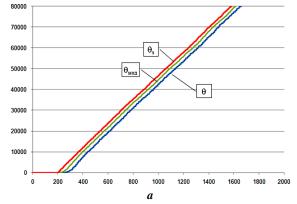


Рис. 9. Переходные процессы отработки приводом скачков заданий в режиме позиционирования с коррекцией



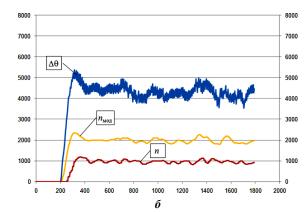


Рис. 10. Осциллограммы отработки постоянной заводки со скоростью 1000 об/мин при полном отсутствии коррекции

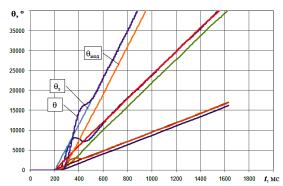


Рис. 11. Полная компенсация установившейся скоростной ошибки при скоростях заводки 1000, 500 и 200 об/мин

Основным результатом проведенных исследований можно считать следующее: экспериментально проверен способ коррекции сигнала управления, передаваемого по информационной сети в качестве задания контура регулирования скорости, компенсирующий негативное влияние квантования по времени и обеспечивающий требуемое качество переходного процесса

по управляющему воздействию. Коррекция эффективно действует, если интервал квантования не превышает 30% от времени переходного процесса.

Список литературы

- 1. Бычков М.Г. Аппаратные средства систем управления движением: учеб. пособие. М.: Издательский дом МЭИ, 2007. 84 с.
- 2. Бычков М.Г. Обзор современных электроприводов с вентильными двигателями и их применений // Электропривод с вентильными двигателями: докл. науч.-техн. семинара. М.: Издательский дом МЭИ, 2007. С. 15-34.
- 3. Бычков М.Г. Мехатронные технологии как сфера применения современного электропривода // Электропривод в мехатронных технологиях: докл. науч.-техн. семинара. М.: Издательский дом МЭИ, 2009. С. 4-44.
- 4. Бычков М.Г., Кукушкин М.С. Компенсация дискретности по времени управляющего сигнала в системе регулирования положения с эталонной моделью // Электричество. 2011. № 9. С. 55-63.
- 5. Кукушкин М.С. Разработка и исследование многокоординатных электроприводов на базе частотнорегулируемых электродвигателей и промышленных информационных сетей: дис. ... канд. техн. наук. М., 2011.

INFORMATION IN ENGLISH

CONTROL ACTIONS ADJUSTMENT OF MULTICOORDINATE SERVODRIVE BASED ON PROGRAMMABLE LOGIC CONTROLLER

Bychkov M.G., Kusnetsova V.N.

Experimental study results of one axis position regulation contour of the multicoordinate electric drive, based on Modicon M258 PLC and the Lexium 32 servo-drive are given in the article. Negative influence of quantization on transient process in the contour related to the cycle of calculation and exchange of information between the controller and servo-drives is confirmed. The solution is to install the reference model of position contour and correct the signal in program realization of the regulator. One signal is the derivative of set position and the other one is the signal of speed in the reference model.

Keywords: multi-axis electric drive, position regulator, time quantization, reference model, experimental study.

REFERENCES

- 1. Bychkov M.G. *Apparatnyie sredstva sistem upravleniya dvizheniem* [Hardware platform of motion control system]: educational aid. M.: Izdatelskii dom MEI, 2007, 84 p.
- 2. Bychkov M.G. Obzor sovremennyh elektroprivodov s ventilnymi dvigatelyami i ih primenenii [Overview of modern electric drives with AC converter-fed motors and their applications]. *Elektroprivod s ventilnymi dvigatelyami* [Electric drive

with ac converter-fed motors]: report at the scientific and technical seminar. M.: Izdatelskii dom MEI, 2007, pp. 15-34.

- 3. Bychkov M.G. Mehatronnye tehnologii kak sfera primeneniya sovremennogo elektroprivoda [Mechatronic technology as a field of modern electric drive application]. *Elektroprivod v mehatronnyh tehnologiyah* [Electric drive in mechatronic technology]: report at the scientific and technical seminar. M.: Izdatelskii dom MEI, 2009, pp. 4-44.
- 4. Bychkov M.G., Kukushkin M.S. Kompensatsiya diskretnosti po vremeni upravlyayuschego signala v sisteme regulirovaniya polozheniya s etalonnoi modelyu [Increment compensation by the timing of control signal in position control system with reference model]. *Elektrichestvo* [Electricity]. 2011, no.9, pp. 55-63.
- 5. Kukushkin M.S. Razrabotka i issledovanie mnogokoordinatnyh elektroprivodov na base chastotno-reguliruemyh elektrodvigateley i promyshlennyh informatsionnyh setei [Development and study of multiaxis electric drives based on variable-frequency electric drives and industrial information networks]: Dissertation for the degree of PhD. (Engineering). M., 2011.

УДК 621.31

Соловьев В.А., Черный С.П., Сухоруков С.И.

ОБ ЭФФЕКТИВНОСТИ БОРЬБЫ С ГОЛОЛЕДНЫМИ ОБРАЗОВАНИЯМИ НА ПРОВОДАХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

В статье рассмотрена проблематика борьбы с гололедом, образующимся на проводах линий электропередачи (ЛЭП), описаны основные применяемые на сегодня способы и устройства для удаления гололеда с проводов ЛЭП. Предложен новый электродинамический способ удаления гололеда с проводов, приведены результаты экспериментального исследования предложенного способа.

Ключевые слова: ЛЭП, провода, удаление гололеда, источник тока, энергоэффективность.

Введение

Периодически возникающие в последнее время природные аномальные явления («ледяной дождь», обильный снегопад при резком понижении температуры и т.п.), приводящие к возникновению аварийных ситуаций в системах энергоснабжения, заставляют искать высокоэффективные способы борьбы с такими техногенными процессами. Основным фактором, обуславливающим возникновение аварийных ситуаций, является образование гололеда на проводах ЛЭП и несущих опорах, масса которого в несколько раз может превышать предельно допустимое значение, определяемое прочностными характеристиками ЛЭП. Примером такой аварии может служить обрыв гирлянды изолятора и отключение энергоснабжения на острове Сахалин 26 октября 2013 года. В результате были обесточены 7 населенных пунктов в Поронайском районе Сахалинской области (центральная часть острова), где проживает порядка 17 тысяч человек [1].

На сегодняшний день наиболее распространённым способом борьбы с гололедными отложениями на проводах ЛЭП является плавка гололеда постоянным или переменным током [2, 3]. При этом реализация данного способа требует отключения ЛЭП от генерирующих источников на длительное время, а токи, обеспечивающие необходимую величину тепловой энергии для плавки гололеда, могут достигать значений, приводящих к необратимым пластическим деформациям проводов.

Целесообразность переключения ЛЭП на устройства для плавки гололеда диктуется сведениями о массе отложившегося льда на проводах, которую в реальных условиях определить довольно сложно.

Использование композитных проводов [4, 5] не решает задачу устранения аварийных ситуаций в целом, поскольку с помощью этих проводов расширяется только диапазон механических нагрузок, которые могут выдержать провода. В целом переход на новые типы проводов связан со значительными затратами (стоимость провода АССС в 5-6 раз выше провода марки АС того же сечения), кроме того, использование проводов с более высокими механическими характеристиками требует и изменения (усиления) устройств подвески изоляторов.

В [6-8] приведены примеры использования для оценки состояния проводов ЛЭП специальных робототехнических устройств. Однако не приведены сведения о том, как будут вести себя данные устройства в сложных климатических условиях (большие ветровые нагрузки, плохая видимость из-за снега). Кроме того, при

таких условиях затруднительно переключение робототехнического устройства с одного пролета ЛЭП на другой.

Использование для оценки состояния проводов ЛЭП датчиков гололеда [9, 10, 11] не всегда позволяет достичь желаемого результата. Это связано с тем, что большинство описанных в технической литературе датчиков гололеда (за исключением датчиков тензометрического типа) ориентировано на фиксацию начала образования гололедных отложений и не позволяет судить о массе отложившегося льда на проводах. Применение для этих целей устройств и сигнализаторов обледенения, широко используемых в авиационной технике, построенных на различных физических принципах (тепломерном, вибрационном, акустическом, радиоизотопном, оптическом и др.), не всегда приемлемо или из-за требуемой конструктивной доработки, или из-за трудности реализации в силу распределенности объекта обледенения.

Использование тензометрических датчиков [12] типа ДГВН обеспечивает одновременное измерение нагрузок в двух плоскостях: вертикальной (измерение массы образовавшегося льда) и горизонтальной (измерение силы ветра), но требует некоторого изменения узла подвески проводов. При этом взаимное влияние составляющих нагрузки практически полностью исключается. Нагрузка от массы провода компенсируется в момент установки датчика, а нагрузка от тяжения провода при изменении температуры (в горизонтальной плоскости, параллельной воздушной линии) датчиком не воспринимается. При наличии датчиков данного типа в качестве источника сигналов обратной связи может быть реализована управляемая система автоматического удаления льда.

Исследование предложенного способа удаления гололеда с проводов ЛЭП

В [13] предложен альтернативный способ удаления льда с проводов ЛЭП. Сущность данного способа состоит в комбинированном (механическом и тепловом) воздействии на провода. Если через провода пропускать импульсы тока определенной скважности и амплитуды, то под воздействием силы Ампера провода, расположенные в одной плоскости, будут испытывать силовые возмущения, приводящие их в колебательное движение. Колебательные движения проводов с определенной частотой приведут к упругопластической деформации двухслойной структуры «проводлед», что и приведет к разрушению ледового покрытия проводов.

Для повышения эффективности процесса разрушения ледового покрытия необходимо, чтобы частота колебаний обледеневших проводов была близка к резонансной частоте собственных колебаний подвешенного провода. Кроме того, для ослабления адгезионных свойств границы раздела «провод-лед» желательно, чтобы температура провода была несколько выше температуры льда.

Для оценки работоспособности данного способа удаления льда с проводов ЛЭП были проведены экспериментальные исследования на физическом макете линии электропередачи в масштабе 1:100. Лед на провода наносился путем сбрызгивания проводов из пульверизатора при температуре окружающего воздуха -12°С. Возмущающие электрические воздействия создавались с помощью источника постоянного тока, переключаемого программируемым микроконтроллером Siemens LOGO! (рис. 1).

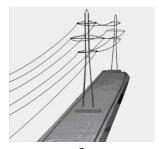




Рис. 1. Экспериментальный стенд: а – макет ЛЭП; б – генератор импульсов

В силу того, что масса осаждаемого льда на проводах является величиной переменной, а распределение ледового покрытия на проводах — неравномерным, то для приведения проводов в колебательный процесс с частотой, близкой к резонансной, необходимо, чтобы электрический источник возмущающих воздействий был управляемым.

На рис. 2 приведен один из возможных вариантов реализации такого управляемого источника возмущающих воздействий.

Силовая часть источника выполнена в виде однофазного моста из IGBT-транзисторов, управляемого с

помощью микроконтроллера через специальные микросхемы-драйверы. Это позволяет формировать на выходе источника импульсы тока заданной формы, частоты, скважности и величины (в том числе, и двухполярные импульсы). Управление на основе микроконтроллера позволяет программно задавать необходимые настройки импульса, осуществлять связь источника с компьютером, а также автоматическую подстройку частоты под изменяющиеся параметры линии [14].

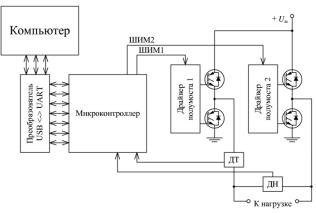


Рис. 2. Структурная схема управляемого источника тока: $+U_{\rm M}$ — напряжение, подаваемое на мост; ДТ — датчик тока, ДН — датчик напряжения

Так как математическое описание вынужденных колебательных движений свободно подвешенного провода представляет собой сложную задачу, требует учета множества параметров и не позволяет выявить однозначную связь между механическими параметрами колебаний и электрическими параметрами возмущающих воздействий [15, 16], авторами была проведена серия экспериментов на физическом макете ЛЭП в масштабе 1:40 с использованием вышеописанного управляемого источника возмущающих воздействий. На рис. 3 приведены кривые зависимости амплитуды колебаний провода от частоты возмущающих воздействий для свободно подвешенного провода и провода с ледяным покрытием при равномерном его распределении по длине провода.

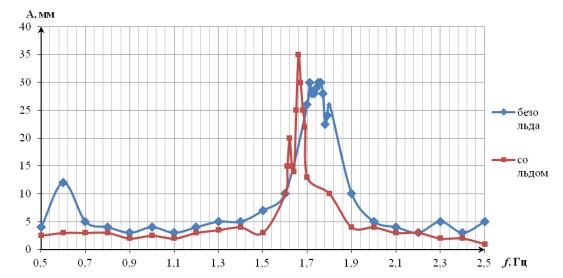


Рис. 3. Кривые зависимости амплитуды колебаний провода от частоты возмущающих воздействий

Выволы:

На приведенных кривых четко прослеживается резкое повышение амплитуды колебаний при приближении частоты возмущающих воздействий к частоте собственных колебаний провода. Кроме того, видно, что при увеличении массы максимум амплитуды колебаний сдвигается в сторону низких частот. На частотах, отличных от резонансных, амплитуда колебаний провода снижается, а на частотах, близких к резонансным (амплитуда колебаний максимальна), не происходит схлестывания проводов. Время удаления льда с проводов в несколько раз меньше времени, необходимого на плавку гололеда стандартным способом. Это подчеркивает высокую энергетическую эффективность предложенного способа.

Список литературы

- 1. Циклон оставил без света 17 тысяч человек на Сахалине // Энергетика. Режим доступа: http://pronedra.ru/energy /2013 /10 /27/cyklon-sahalin/.
- 2. Борьба с гололедом Эксплуатация воздушных линий электропередачи // Энергетика: оборудование, документация. Режим доступа: http://forca.ru/instrukcii-poekspluatacii/vl/ekspluataciya-vozdushnyh-linii-elektrope*redachi* _4. html.
- 3. Инновационные технологии управления. В 2 книгах. Кн. 1. : монография / В.А. Соловьев, С.П. Черный, В.М. Козин, С.И. Сухоруков [авт.кол. : Баранников А.А., Дунская, Ильиных С.А., и др.]. Одесса: КУПРИЕНКО СВ, 2013. 128 с.
- 4. Высокотемпературные провода: повышение пропускной способности ВЛ // EnergyFuture.ru: Профессионально об энергетике будущего и настоящего. Режим доступа: http://energyfuture.ru/vysokotemperaturnye-provoda-povyshenie-propusknoj-sposobnosti-vl.
- 5. Обзор новых технологий в энергетике. Вып. 1. М.: Департамент технического развития ОАО «МРСК Центра», 2008. 11 с.
- 6. Робот LineScout на линиях электропередач // Мир роботов Roboting.ru. Режим доступа: http://roboting.ru/1253-robot-linescout-na-liniyax-yelektroperedach.html.
- 7. Expliner робот для обслуживания линий электропередач выходит на работу // Новости технологий. Режим доступа: http://techvesti.ru/node/3807.
- 8. Робот Expliner инспектирует высоковольтные линии // Мир роботов Roboting.ru. URL: http://roboting.ru/957-robot-

- expliner-inspektiruet.html.
- 9. Пат. 2079944 С1 Российская Федерация, МПК Н 02 G 7/16. Сигнализатор начала обледенения / Р.М. Рудакова; М.Б. Гузаиров; И.Г. Асмандияров; заявитель и патентообладатель Уфимский государственный авиационный технический университет № 95107564/07; заявл. 11.05.1995; опубл. 20.05.1997.
- 10. Пат. 2080723 С1 Российская Федерация, МПК Н 02 G 7/16. Сигнализатор начала обледенения проводов воздушных линий электропередачи / Р.М. Рудакова; Ю.А. Воронов; А.М. Фарвазов; заявитель и патентообладатель Уфимский государственный авиационный технический университет. №95107566/07; заявл. 11.05.1995; опубл. 27.05.1997.
- 11. Пенчев Е. А. Емкостный метод индикации гололёдно-изморозевых об-разований : автореф. дис. ...канд. техн. наук. : 11.00.09 / Пенчев Евгений Александрович. Одесса, 1984.
- 12. Тензометрический датчик тип ДГВН // Элна-Север плюс. Режим доступа: http://elna-severplus.ru/produkcija/tenzometricheskie-datchiki/tip-dgvn-datchik-gololedno-vetrovyh/.
- 13. Пат. 2442256 С1 Российская Федерация, МПК Н 02 G 7/16. Способ удаления обледенения с проводов линий электропередач / В.М. Козин, В.А. Соловьев, Д.А. Орлов, С.И. Сухоруков, К.С. Малых; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Амурский гуманитарно-педагогический государственный университет». №2010144485/07; заявл. 29.10.2010; опубл. 10.02.2012, Бюл. № 4.4 с.: ил.
- 14. Сухоруков С.И., Соловьев В.А. Управляемый источник тока для экспериментальной установки по удалению льда с проводов ЛЭП // Электротехнические комплексы и системы управления, 2013. № 4. С. 6-10.
- 15. Способ удаления гололеда с проводов контактных сетей и линий электропередач / В.М. Козин, В.А. Соловьев, С.И. Сухоруков, Д.А. Орлов // Прикладные задачи механики деформируемого твердого тела и прогрессивные технологии в машиностроении: сборник статей. Вып. 4. Комсомольск-на-Амуре: ИМиМ ДВО РАН, 2013. С. 126-137.
- 16. Сергеева А.М., Ткачева А.В., Одиноков В.И. Построение математической модели процесса деформирования ледяного покрова ледокольным судном // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. 2012. № I-1(9). С. 24-31.

INFORMATION IN ENGLISH

POWER TRANSMISSION LINE WIRES DE-ICING EFFICIENCY

Solovyev V.A., Chernyi S.P., Sukhorukov S.I.

The paper presents a short overview of the problem of power transmission line wires de-icing, the main methods and devices for power transmission line wires de-icing are described. A new electrodynamic method is offered and the results of experimental research are shown.

Keywords: power transmission line, wires, de-icing, current source, power efficiency.

REFERENCES

- 1. Cyklon ostavil bez sveta 17 tysyach chelovek na Sahaline [Cyclon caused power outage for 17 thousand citizens of Sakhalin]. *Energetika* [Power industry]. Mode of access: http://pronedra.ru/energy/2013/10/27/cyklon-sahalin/.
 - 2. Borba s gololedom Ekspluatatsiya vozdushnyh linii

- elektroperedachi [Deicing overhead power transmission line operation]. Power industry: equipment, specifications. Mode of access: http://forca.ru/instrukcii-po-ekspluatacii/vl/ekspluataciya-vozdushnyh-linii-elektroperedachi_4.html.
- 3. Solovyev V.A., Chyerhyi V.A., Kozin V.M., Suhorukov S.I. *Innovatsionnye tehnologii upravlenita* [Innovative control technology]. 2 Volumes. Vol. 1.: monograph / [Barannikov A.A., Dunskaya, Ilyinyh S.A. and others]. Odessa: KUPTIYENKO SV, 2013. 128 p.
- 4. Vysokotemperaturnye provoda: povyshenie propusknoj sposobnosti vl [High temperature wires: transmission capacity improvement of high voltage lines]. EnergyFuture.ru: Power energy of the future and present. Mode of access: http://energyfuture.ru/vysokotemperaturnye-provoda-povyshenie-propusknoj-sposobnosti-vl.

- 5. Obzor novyh tehnologii v energetike [Overview of new technologies in power industry]. Issue 1. Department of technological development of OJSC «MRSK Tsentra», 2008. 11p.
- 6. Robot linescout na liniyax yelektroperedach [LineScout robot on power transmission lines]. Mir robotov Roboting.ru. URL: http://roboting.ru/1253-robot-linescout-na-liniyax-yelektroperedach.html.
- 7. Expliner robot dlya obsluzhivaniya yelektroperedach vyhodit na rabotu [Expliner, the robot for power transmission line maintenance, is put into operation]. Tech news. URL: http://techvesti.ru/node/3807.
- 8. Robot expliner inspektiruet vysokovoltnye linii [Expliner surveys high voltage lines]. Mir robotov Roboting.ru. Mode of access: http://roboting.ru/957-robot-expliner-inspektiruet.html.
- 9. RF Patent 2079944 C1, MΠK H 02 G 7/16. Indicator of ice formation / Rudakova R.M.; Guzairov M.B.; Asmandiyarov I.G.; patent applicant and patent holder Ufa state aircraft technical university. №95107564/07; applied on 11.05.1995; published on 20.05.1997.
- 10. RF Patent 2080723 C1, MIIK H 02 G 7/16. Indicator of ice formation start on overhead power transmission lines / Rudakova R.M.; Voronov Yu.A.; Farvazov A.M.; patent applicant and patent holder Ufa state aircraft technical university. №95107566/07; applied on 11.05.1995; published on 27.05.1997.
- 11. Penchev E.A. Emkostnyi metod indikatsii gololednoizmorozevyh obrazovanii [Capacitance method of glaze-ice and rime deposition indication]: synopsis of Dissertation for the degree of PhD. (Engineering): 11.00.09 / Penchev Evgenie. Odessa, 1984.

- 12. Tenzometricheskie datchiki tip DGVN [Strain gage transducer of DGVN type]. Elna-sever plus. Mode of access: http://elna-severplus.ru/produkcija/tenzometricheskie-datchiki/tip-dgvn-datchik-gololedno-vetrovyh/.
- 13. RF Patent 2442256 C1, MITK H 02 G 7/16. Method of power transmission lines deicing / Kozin V.M., Solovyev V.A., Orlov D.A., Suhorukov S.I., Malyh K.S.; patent applicant and patent holder Federal state educational institution of higher professional education «Amur pedagogical state university». No. 2010144485/07; applied on 29.10.2010; published on 10.02.2012, Certificate No. 4, 4 p.: Fig.
- 14. Suhorukov S.I., Solovyev V.A. Upravlyaemyi istochnic toka dlya eksperimentalnoy ustanovki po udaleniyu lda s provodov LEP [Controlled current source for pilot installation of power transmission line deicing]. Electro technical complexes and control systems, 2013. No. 4, pp. 6-10.
- 15. Kozin V.M., Suhorukov S.I., Solovyev V.A., Orlov D.A. Sposob udaleniya gololyeda s provodov kontaktnyh setei i liniy elektroperedach [Method of overhead contact system and power transmission lines deicing]. Applied problems of deformable solid body mechanics and advanced technology in machine building: collected articles. Issue 4. Komsomolsk-on-Amur: IMIM DVO RAN, 2013, pp. 126-137.
- 16. Sergeeva A.M., Tkacheva A.V., Odinokov V.I. Postroenie matematicheskoi modeli protsessa deformirovaniya ledyanogo pokrova ledokolnym sudnom [Mathematical modeling of ice cover deformation process by ice-breaking ship]. Proceedings of Komsomolsk-on-Amur state technical university. Natural and engineering sciences, 2012, № I-1(9), pp. 24-31.

УДК 621.74.06:62-83

Лукьянов С.И., Фомин Н.В., Васильев А.Е., Хлыстов А.И.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ТЯНУЩИХ РОЛИКОВ СЛЯБОВЫХ МАШИН НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ ЗАГОТОВОК

Представлены результаты экспериментальных и теоретических исследований электропривода тянущих роликов машины непрерывного литья заготовок. Приведены авторские методики расчета продольных усилий и моментов вытягивания в межроликовом пространстве зоны вторичного охлаждения. Разработан алгоритм управления электроприводом тянуще-правильного устройства машины непрерывного литья заготовок.

Ключевые слова: система управления, электропривод тянущих роликов, усилие в слитке, зона вторичного охлаждения, машина непрерывного литья заготовок.

Одним из резервов повышения качества макроструктуры слябов и увеличения производительности машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) является совершенствование электропривода тянущих роликов (ТР) и систем его управления [1,2].

Сотрудниками Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова совместно со специалистами ОАО «ММК» на действующих слябовых МНЛЗ криволинейного типа выполнен значительный объем теоретических и экспериментальных исследований влияния показателей работы электропривода ТР на качество макроструктуры непрерывнолитых заготовок и производительность МНЛЗ. Проделанный объем работ, опыт экспериментальных исследований и внедрения результатов позволяет предложить разработчикам и изготовителям слябовых МНЛЗ методики и основные технические решения по реализации схем силового питания электродвигателей и систем управления электроприводами ТР.

Исследования проводились на МНЛЗ №1-5 ОАО «ММК». Следует отметить, что электропривод ТР слябовых МНЛЗ №1-4 выполнен по схеме «тиристорный преобразователь – двигатель» (ТП-Д) с силовым питанием всех электродвигателей (до 70 шт.) от одного ТП. Электропривод МНЛЗ №5 выполнен по индивидуальной схеме «преобразователь частоты – асинхронный двигатель» (ПЧ-АД) [3].

В результате исследования временных диаграмм изменения токов нагрузки электродвигателей ТР и общего тока электропривода тянуще-правильного устройства (ТПУ) МНЛЗ №1-4 на неизменном установившемся уровне задания скорости литья заготовки установлено, что имеют место два различных режима работы электропривода ТПУ. В первом - при практически неизменных скорости разливки V, общего тока I_{Σ} электропривода ТПУ и большинства токов нагрузки i_k электродвигателей ТР на ряде электродвигателей имеют место явно выраженные, устойчивые за цикл разливки, колебания токов i_k (**рис. 1, a**). Во втором – имеют место устойчивые колебания (автоколебания) токов нагрузки i_k всех электродвигателей TP, а также общего тока I_{Σ} электропривода ТПУ и скорости разливки V(рис. 1, δ). В результате статистического анализа временных диаграмм рис. 1, а доказано отсутствие взаимного влияния между изменениями токов нагрузки i_k соседних электродвигателей и между изменениями токов отдельных электродвигателей и общим током I_{Σ} электропривода ТПУ. Это позволяет принять в качестве оценки распределения общего усилия вытягивания

слитка по тянущим роликам зоны вторичного охлаждения (ЗВО) и группам приводов за длительный период времени ($t_{\rm H} > 2T_{\rm P}$, где $T_{\rm P}$ – период вращения ролика) математическое ожидание тока $I_{\rm k}$. Анализ временных диаграмм токов и скорости **рис. 1,** δ показал, что изменения токов i_k отдельных электродвигателей и общего тока I_{Σ} электропривода ТПУ отражают общий колебательный процесс в электромеханической системе «электропривод ТПУ – роликовая проводка – слиток» и в качестве адекватного отражения автоколебаний в электроприводе ТПУ достаточно использовать изменение общего тока I_{Σ} . Сравнительный анализ двух режимов работы электропривода ТПУ показал, что изменения токов отражают различные физические явления, происходящие в электромеханической системе привода ТР. Поэтому исследования целесообразно выполнять отдельно для случая разливки стали на неизменной скорости и для случая автоколебаний скорости разливки [4].

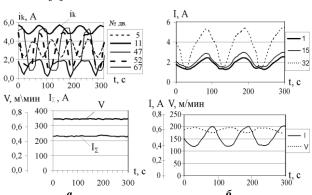


Рис. 1. Временные диаграммы работы электропривода ТПУ: а – на неизменной скорости разливки; б – при наличии колебаний

Установлено, что распределение общего рабочего тока I_{Σ} и общего тока холостого хода $I_{XX\Sigma}$ электропривода ТПУ по электродвигателям ТР явно неравное (рис. 2). На различных ручьях МНЛЗ №1-4 вид неравномерности распределения рабочих токов I_k и токов холостого хода $I_{XX\Sigma}$ вдоль ЗВО различный и установить какие-либо общие аналитические закономерности распределения токов I_k и $I_{XX,k}$ не представилось возможным.

Кроме того, доля значений токов холостого хода в общем рабочем токе электропривода ТПУ существенна и достигает 60%, поэтому оценку реального усилия, развиваемого конкретным электродвигателем на контакте его ТР со слитком, необходимо выполнять за

вычетом тока холостого хода. При изменении скорости разливки и по истечении времени с момента проведения капитальных работ происходит существенное перераспределение тока электропривода ТПУ между электродвигателями ТР. Следовательно, сравнительную оценку распределения токов на различных ручьях необходимо выполнять для конкретного момента времени на конкретной скорости разливки. В качестве оценки неравномерности распределения токов нагрузки применен коэффициент вариации:

$$v_I = S_I / I, \tag{1}$$

где S_I — среднее квадратическое отклонение значений токов электродвигателей от математического ожидания I тока группы электродвигателей [4].

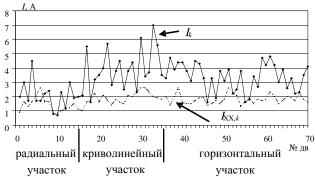


Рис. 2. Распределение токов рабочих и холостого хода вдоль линии ЗВО

Предложена следующая методика оценки распределения общего тока нагрузки электропривода ТПУ по отдельным электродвигателям, отражающего распределение усилия вытягивания заготовки по ТР: до начала разливки во время прокрутки электропривода ТПУ измеряются значения токов холостого хода $I_{XX,k}$ электродвигателей тянущих роликов на предполагаемой рабочей скорости разливки заготовки V м/мин; рассчитывается временной интервал, соответствующий двум периодам ТР вращения роликов наибольшего диаметра D_P ; величина периода определяется по уравнению: $T_P = 60\pi D_P/V$, с; по данным изменения мгновенных значений токов i_k электродвигателей определяются значения их математических ожиданий

$$I_{\scriptscriptstyle k} = \sum_{\scriptscriptstyle i=1}^{\scriptscriptstyle N} i_{\scriptscriptstyle k}/N$$
; рассчитываются составляющие рабочих

токов нагрузки, определяющие усилия вытягивания слитка $I_{\text{НА}\Gamma,k} = I_k - I_{\text{XX},k}$.

В результате анализа изменения форм распределения общего тока нагрузки по электродвигателям ТР при изменении таких технологических факторов, как скорость разливки V, ширина слитка B и фактора времени на различных ручьях одной МНЛЗ и на различных МНЛЗ №1-4 установлено, что распределение токов нагрузки между роликами, секциями и участками ЗВО не является стационарным: при изменении указанных факторов происходит случайное перераспределение величин токов I_k ; с увеличением скорости неравномерность распределения возрастает; установить какие-либо взаимосвязи между формами изменения распределения токов нагрузки и указанными факторами невозможно. Распределение общего тока по группам ТР на различных ручьях МНЛЗ №1-4 при идентичных

технологических параметрах литья заготовки существенно отличаются между собой. На радиальном участке доля нагрузки изменяется в пределах 3-14%, на криволинейном — 33-44%, на горизонтальном участке в первой группе электродвигателей — от 10 до 19% и во второй группе составляет от 31 до 44% [4].

Расчет требуемого по технологии общего статического момента вытягивания слитка $M_{\rm BЫT}$, развиваемого всеми ТР на установившейся скорости разливки, выполняется из условия, что m ТР должны приложить к слитку суммарное усилие вытягивания $F_{\rm BЫT}$, необходимое и достаточное для преодоления сил сопротивления протягиванию застывающей заготовки через n пар роликов верхнего и нижнего ряда роликовой проводки ЗВО. Это условие обусловлено тем, что в роликовой проводке применяются приводные и неприводные ролики различного диаметра [2].

Усилие вытягивания на приводных роликах F_j определяется как сумма усилий на данном j-м приводном ролике и на неприводных роликах F_i перед ним до ближайшего другого j-1 приводного ролика.

Требуемое суммарное усилие вытягивания слитка вычисляется по выражению

$$F_{\text{BMT}} = \sum_{j=1}^{m} F_j. \tag{2}$$

Усилие F_i сопротивления вытягиванию заготовки в одном межроликовом пространстве ЗВО в общем виде для МНЛЗ криволинейного типа определяется из выражения

$$F_{i} = F_{\kappa p} + f_{i}(P_{\phi i} + P_{\tau n i} + P_{\eta p i} + P_{3 a r i} + P_{3 i} + P_{M \Pi i} + G_{p i} + G_{Q i}) + (3)$$

$$+ F_{\eta \nu n i} + G_{\nu i} + G_{r i},$$

 $+F_{{\rm\scriptscriptstyle BBIII}i}+G_{{}_{\rm\scriptscriptstyle M}}+G_{{}_{\rm\scriptscriptstyle T}i},$ где $F_{{}_{\rm\scriptscriptstyle KP}}-$ усилие вытягивания слитка из кристаллизатора; f_i — эквивалентный коэффициент трения, обусловленный трением качения ролика по слитку и трением в подшипниках опор роликов; $P_{\phi i}$ – усилие ферростатического давления на ролики; $P_{\text{тп}i}$ – усилие давления на ролики от температурных поводок непрерывнолитой заготовки; $P_{\text{пр}i}$ – усилие давления на ролик, обусловленное правкой; $P_{\text{загi}}$ – усилие давления на ролик, обусловленное загибом заготовки; P_{3i} – усилие давления, вызванное протягиванием затвердевшей заготовки через роликовую проводку на горизонтальном участке ЗВО; $P_{{}_{\rm M\Pi}i}$ — усилие механического прижима роликов к слитку; $G_{\text{p}i}$ – сила тяжести i-го ролика; G_{Qi} , G_{Ti} – нормальная и тангенциальная составляющие силы тяжести части слитка в межроликовом пространстве G_{ci} ; $F_{\text{вып}i}$ усилие сопротивления вытягиванию выпученной корки заготовки из i-й пары роликов; $G_{\scriptscriptstyle \rm M}$ – сила тяжести металла в кристаллизаторе. Составляющие (3) рассчитываются по известным зависимостям [5].

Значение требуемого по технологии момента вытягивания слитка $M_{\text{выт}j}$ на валу электродвигателя j-го тянущего ролика определяется по выражению: $M_{\text{выт}j} = F_{\text{выт}j} D_{\text{p}j}/(2i_{\text{pi}})$, где i_{pi} — передаточное число релуктора.

Из сравнения между собой значений относитель-

ного распределения реальных (см. **рис. 2**) и требуемых по технологии общих моментов вытягивания заготовки (**рис. 3**) по группам ТР сделан вывод, что в реальных условиях литья заготовки тянущие ролики радиального, криволинейного и первой группы горизонтального участков всегда загружены менее требуемых значений. Напротив, ролики второй группы горизонтального участка существенно (33,3-45,1 вместо требуемых 3,0-6,0%) в реальных условиях загружены более требуемых по технологии значений.

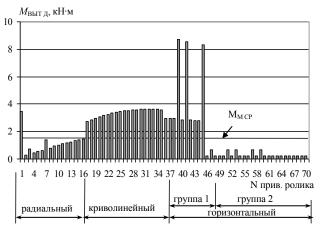


Рис. 3. Требуемое по технологии распределение моментов вытягивания вдоль 3BO

Следовательно, ТР второй группы горизонтального участка создают в слитке статические продольные усилия (натяжение) и посредством этого разгружают тянущие ролики остальных групп ТПУ [4]. На основании равенства реальных и расчетных значений общего момента вытягивания слитка, развиваемого всеми приводными роликами, разработана методика расчета распределения вдоль технологической линии ЗВО статических продольных усилий:

$$F_{n-1,n} = F_{Pn} - F_{Mn};$$
 $F_{n-2,n-1} = F_{n-1,n} + (F_{Pn-1} - F_{Mn-1});$
 $F_{i-1,i} = \sum_{j=n,-1}^{i+1} F_{j-1,j} + (F_{Pi} - F_{Mi});$
 $F_{1,2} = \sum_{j=n,-1}^{3} F_{j-1,j} + (F_{P2} - F_{M2}),$

где $F_{i-1,i}$ — статическое продольное усиление, создаваемое в слитке электроприводом ТПУ, в пространстве между i-1 и i-м приводными роликами; $F_{\mathrm{P}i}$ — реальное усилие вытягивания слитка, развиваемое i-м тянущим роликом; $F_{\mathrm{M}i}$ — требуемое по технологии усилие вытягивания слитка, рассчитанное по (3).

Графическая иллюстрация распределения статических продольных усилий в слитке на примере ручья 3, 4 МНЛЗ №1 приведена на **рис. 4**, из которой следует: на радиальном участке имеют место отрицательные продольные усилия (подпор), а на криволинейном и горизонтальном участках — положительные (натяжение); величина растягивающих усилий в заготовке достигает существенных значений (375 кН) в месте закрытия лунки жидкой фазы (между 64 и 65 роликами).

Анализ распределения продольных усилий в

слитке вдоль ЗВО на МНЛЗ №1-4 ОАО «ММК» показал, что на различных ручьях, находящихся в идентичных технологических условиях, распределение продольных усилий в слитке по абсолютной величине и характеру изменения вдоль ЗВО значительно отличаются друг от друга. На горизонтальном участке в зоне закрытия жидкой фазы обнаружены значительные изменения максимальных значений натяжения в слитке от 186 до 622 кН [4].



Рис. 4. Распределение продольных усилий в слитке вдоль ЗВО

В результате исследования влияния технологических факторов на распределение продольных усилий в слитке установлено: при изменении скорости разливки V, ширины отливаемой заготовки B и после проведения ремонтных работ в роликовой проводке ЗВО происходит существенное изменение максимальных значений и вида распределения статических продольных усилий; в пределах же сроков межремонтного периода эксплуатации МНЛЗ при фиксированных скорости V и ширине слитка В изменение продольных усилий незначительны (<5%); исследование влияния продольных усилий, создаваемых в слитке электроприводом ТПУ, на качество литой заготовки целесообразно проводить в пределах сроков межремонтного периода каждой МНЛЗ для идентичных по скорости литья и ширине отливаемой заготовки технологических условий.

Установлено, что чем выше значения показателя неравномерности распределения токов нагрузки электродвигателей ТР первой группы горизонтального участка (коэффициента вариации $\nu_{\Gamma OP}$), тем выше относительная частота снижения сортности литой заготовки по осевым трещинам и осевой рыхлости (коэффициенты парной корреляции R составили соответственно 0,93 и 0,75). Кроме этого, чем выше значения продольных усилий в слитке на радиальном и криволинейном участках ЗВО, тем выше частота возникновения перпендикулярных и гнездообразных трещин [4].

На основании выполненного анализа сформулированы дополнительные технологические требования к системе управления электроприводом ТР, реализация которых позволяет минимизировать продольные растягивающие усилия в слитке: в системе управления электроприводом ТР должна быть предусмотрена возможность в рабочем режиме вытягивания слитка рассчитывать и поддерживать на заданных уровнях значения моментов нагрузки электродвигателей ТР.

Идеальным вариантом реализации технологиче-

ских требований является применение индивидуального электропривода ТР. Данные рекомендации реализованы при проектировании и изготовлении МНЛЗ №5 ОАО «ММК», в которой применен индивидуальный электропривод переменного тока на базе преобразователей частоты «Місготаster» (рис. 5).

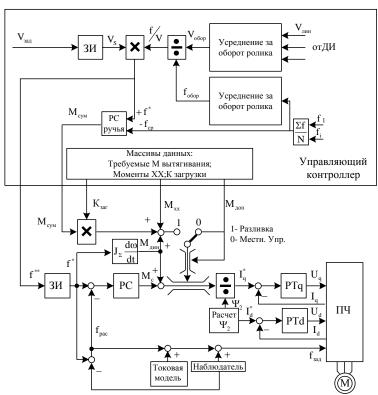


Рис.5. Функциональная схема системы управления электроприводом ТПУ

В управляющем контроллере реализована система распределения требуемых моментов вытягивания по электродвигателям ТР. В контроллере хранятся массивы данных величин общих моментов нагрузки, требуемых для вытягивания конкретного слитка, значения коэффициентов загрузки каждого электродвигателя ТР и массивы данных моментов холостого хода электродвигателей на заданной скорости вытягивания слитка.

Общий алгоритм системы управления электроприводом ТПУ (**рис. 6**) определяет последовательность выполнения макроопераций в системе управления. Описание работы системы (см. **рис. 5**) и алгоритма (см. **рис. 6**) приведено в [6,7].

Разработанные методики расчетов продольных усилий, моментов нагрузки и алгоритм работы системы управления электроприводом ТПУ могут быть использованы при проектировании новых и модернизации электроприводов ТР существующих слябовых машин непрерывного литья заготовок.

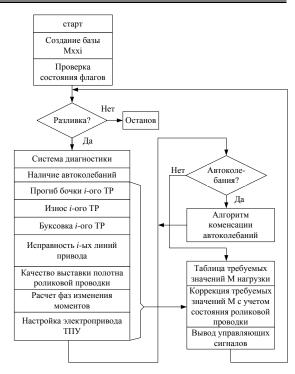


Рис.6. Алгоритм управления

Список литературы

- 1. Нисковских В.М., Карлинский С.Е., Беренов А.Д. Машины непрерывного литья слябовых заготовок. М.: Металлургия, 1991. 272 с.
- 2. Марголин Ш.М. Электропривод машин непрерывного литья заготовок. М.: Металлургия, 1987. 297 с.
- 3. Электропривод переменного тока роликового аппарата машины непрерывного литья заготовок с индивидуаль ным питанием двигателей / В.М. Альшиц, В.И. Зеленцов, Б.Г. Бажин, А.Е. Тикоцкий // Труды V Международной (XVI Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2007. СПб., 2007. С. 344-347.
- 4. Лукьянов С.И., Васильев А.Е., Лукьянов Д.С. Автоматизированный электропривод тянуще-правильного устройства МНЛЗ: монография. Магнитогорск: МГТУ, 2004. 179 с.
- 5. Лукьянов С.И., Фомин Н.В., Хлыстов А.И. Расчет продольных усилий в слитке МНЛЗ // Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах: междунар. сб. науч. трудов. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2011. Ч.П. С. 137-142.
- 6. Система управления электроприводом тянущих роликов машины непрерывного литья заготовок / С.И. Лукьянов, Н.В. Фомин, А.И. Хлыстов, Е.С. Лукьянов // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2012. Вып. 6. С. 104-109.
- 7. Автоматизированный электропривод тянущеправильного устройства машин непрерывного литья / С.И. Лукьянов, А.Е. Васильев, Д.В. Швидченко и др. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова, 2006. №2(14). С.30-34.

INFORMATION IN ENGLISH

IMPROVEMENT OF PULLING ROLLERS ELECTRIC DRIVE OF SLAB CONTINUOUS CASTING MACHINE

Lukyanov S.I., Fomin N.V., Vasilyev A.E., Hlystov A.I.

The results of experimental and theoretical research of the electric drive of pulling rollers of continuous casting machine are presented. The author's methods of calculation of longitudinal forces and the pulling moments are given for the interroller space of the secondary cooling zone. The control algorithm of the pulling rollers electric drive of continuous casting machine is developed.

Keywords: Control system, electric drive of pulling rollers, force in the ingot, secondary cooling zone, continuous casting machine.

REFERENCES

- 1. Niskovskih V.M., Karlinskiy S.E., Berenov A.D. *Mashiny nepreryvnogo litya slyabovyh zagotovok* [Slab continuous casting machines]. Moscow: Metallurgy, 1991. 272 p.
- 2. Margolin Sh.M. *Elektroprivod mashin nepreryvnogo litya zagotovok* [Electric drive of continuous casting machines]. Moscow: Metallurgy, 1987. 297 p.
- 3. Alshic V.M., Zelencov V.I., Bazhin B.G., Tikotskij A.E. Elektroprivod peremennogo toka rolikovogo apparata mashiny neprepyvnogo litya zagotovok s individualnym pitaniem dvigatelei [AC electric drive of continuous casting machine rollers with individual power motors]. Proceedings of V International (XVI all-Russian) conference on automatic electric drive AEP-2007. Saint-Petersburg, 2007, pp. 344 347.

4. Lukyanov S.I., Vasilyev A.E., Lukyanov D.S. Avtomatizirovannyi elektroprivod tyanusche-pravilnogo ustroistva MNLZ [Automated electric drive of drawing-levelling device of continuous casting machine]: Monograph. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2004. 179 p.

5. Lukyanov S.I., Fomin N.V., Hlystov A.I. Raschet prodolnyh usilii v slitke MNLZ [Calculation of the longitudinal force in ingot of continuous casting machines]. *Mathematical support and software of systems in industrial and social spheres: the international collection of scientific works.* Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2011, vol.II, pp. 137-142.

6. Lukyanov S.I., Fomin N.V., Hlystov A.I., Lukyanov E.S. Sistema upravleniya elektroprivodom tyanuschih rolikov mashiny nepreryvnogo litya zagotovok [Control system of electric drive of continuous casting machine pulling rollers]. Vestnik of Ivanovo State Power University. 2012, no. 6, pp. 104-109.

7. Lukyanov S.I., Vasilyev A.E., Shvidchenko D.V. et.al. Avtomatizirovannyi elektroprivod tyanusche-pravilnogo ustroistva mashin nepreryvnogo litya [Automated electric drive of drawing-levelling device of continuous casting machines]. Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tehnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University] 2006, no. 2 (14), pp.30-34.

УДК 621.311+621.34.001

Карандаев А.С., Храмшин В.Р.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ И СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ШИРОКОПОЛОСНЫХ СТАНОВ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ ПРИ РАСШИРЕНИИ СОРТАМЕНТА ПОЛОС

Показано, что современной тенденцией совершенствования технологии широкополосных станов горячей прокатки является расширение сортамента при производстве продукции малыми партиями. Расширение сортамента происходит как за счет производства толстых полос из труднодеформируемых марок стали, так и за счет производства особо тонкой полосы, являющейся конечной продукцией металлургического предприятия. Отмечены технологические особенности прокатки полос расширенного сортамента на широкополосных станах 2000 и 2500 ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (ОАО «ММК»). Рассмотрены разработки, обеспечивающие энергосбережение за счет снижения потребления реактивной мощности тиристорными электроприводами клетей без применения компенсирующих устройств. Представлен комплекс разработанных и внедренных технических решений по совершенствованию систем автоматического регулирования технологических параметров: натяжения, толщины полосы и скоростных режимов прокатки. Показано, что разработанные системы обеспечивают ресурсосбережение за счет снижения материалоемкости и улучшение качества полосы за счет повышения точности регулирования натяжения и толщины в установившихся и динамических режимах.

Ключевые слова: широкополосный стан горячей прокатки, сортамент, автоматизированный электропривод, энергосбережение, технологические параметры, системы автоматического регулирования, совершенствование, экспериментальные исследования, внедрение.

Тенденции развития технологии широкополосных станов горячей прокатки (ШСГП)

В прошедшие десятилетия существенно изменились потребности рынка в продукции прокатного производства. При этом явно выражены две противоречивые тенденции: с одной стороны, растет спрос на тонкую горячекатаную полосу (толщиной 0,7-1,2 мм), являющуюся конечной рыночной продукцией, с другой в качестве основной перспективы ШСГП названа прокатка толстой полосы из труднодеформируемых и специальных сталей [1, 2]. Наряду с изменением конъюнктуры рынка качественно изменились требования потребителей. Исследования, проведенные международным институтом чугуна и стали (IISI), выявили

главное требование к металлургическому производству, которое должно быть удовлетворено в XXI веке – это поставка стали высокого качества при низкой стоимости, малыми партиями и в короткое время [3, 4].

На рис. 1 представлены диаграммы, характеризующие сортамент сталей, прокатываемых на европейских заводах, представленные фирмой «Schloemann-Demag» («SMS-Demag», Германия) [5]. Необходимо отметить значительную долю мягких нелегированных сталей, используемых для холодной формовки и прокатки. Доля полос толщиной 0,7-1,2 мм составляет 57% всех холоднокатаных полос из мягких нелегированных сталей, доля полос шириной 900-1300 мм – 72%. Подобное распределение характерно также для США и для других развитых стран.

Представленные данные наглядно демонстрируют факт, что современный высокопроизводительный стан горячей прокатки полосы не используется на полную мощность при прокатке большинства марок сталей. Кроме того, на всех широкополосных станах горячей прокатки имеются технологические ограничения сортамента продукции, в частности, в направлении уменьшения конечных толщин. На обычном высокопроизводительном стане хорошее качество обеспечивается при толщине полосы не ниже 1,5 мм. При попытке получить полосу толщиной менее указанной возникают технические и технологические трудности в связи с тем, что скорость и температура прокатки выходят за пределы допустимых диапазонов [6]. К тому же уменьшение конечной толщины полос приводит к снижению производительности стана.

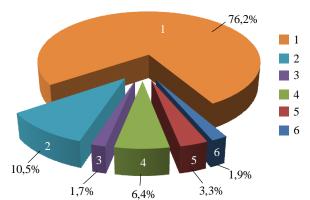


Рис. 1. Соотношение производства различных марок стали по двадцати западноевропейским странам:

мягкие нелегированные стали для холодной штамповки и прокатки;
 свариваемые конструкционные стали;
 высокопрочные углеродистые стали;
 - микролегированные конструкционные и трубные свариваемые стали с мелкозернистой структурой;
 - нержавеющие стали;
 - кремнистые электротехнические стали

Считается, что в будущем использование обычных высокопроизводительных станов будет целесообразно для прокатки труднодеформируемых и специальных сталей, в основном используемых в качестве заготовки для производства труб большого диаметра. При совершенствовании этих станов (в процессе создания новых и модернизации действующих) основное внимание следует уделять повышению производственной гибкости и внедрению высокоточных автоматизированных систем управления.

Одновременно растет рыночный спрос на тонкую горячекатаную полосу. Так, по данным фирмы «Voest-Alpine Industrieanlagenbau» — (VAI, Австрия), доля полосы толщиной 1,2-2,0 мм в 2005 г. составила 25% за счет снижения спроса на полосу толщиной 2-25 мм (с 82% в 1995 г. до 74% в 2005 г.). Таким образом, общемировой тенденцией является переход на производство тонкой горячекатаной полосы, являющейся конечной рыночной продукцией металлургических предприятий [7, 8].

Перечисленные выше тенденции, связанные с изменением сортамента традиционных ШСГП, в полной мере касаются ОАО «ММК». Предварительные расчеты, выполненные специалистами-технологами, показали принципиальную возможность прокатки трубной

заготовки. Разработаны технологии производства полос толщиной 18 мм и выше из труднодеформируемых марок стали из слябовой заготовки толщиной до 300 мм на широкополосном стане 2000. Прокатка, выполненная на стане, выявила ряд технологических проблем, связанных с особенностями производства трубной заготовки. Они вызваны низкими скоростями прокатки, высокими, неравномерными обжатиями по клетям. Это приводит к недопустимому снижению скоростей валков в момент захвата, ухудшению качества поверхности полосы, а в ряде случаев — к аварийной остановке стана.

В то же время реконструкция стана 2500 направлена на расширение сортамента и увеличение производства полос толщиной 0,8-1,5 мм. Производство тонкой полосы требует высокой точности регулирования натяжений, обеспечиваемой за счет согласования и совместного регулирования скоростей электроприводов всех клетей чистовой группы. При этом принципиально новыми требованиями являются обеспечение точности регулирования скорости в динамических режимах и быстродействующая коррекция скоростей при возмущающих воздействиях, возникающих в процессе прокатки и при вмешательстве оператора. Это предопределило необходимость совершенствования алгоритмов и систем управления режимами электроприводов и автоматического регулирования технологических параметров: натяжения, толщины полосы и скорости прокатки [9, 10].

В рамках научно-исследовательских работ, финансируемых за счет средств Министерства образованауки РΦ (ГК 02.740.11.0755 ГК 16.740.11.0072), И договорных работ ОАО «ММК», выполнен комплекс научно обоснованных, концептуально связанных разработок по совершенствованию электроприводов и систем регулирования технологических параметров широкополосных станов горячей прокатки, обеспечивающих энерго- и ресурсосбережение при расширении сортамента полос [11]. Ниже рассматриваются основные внедренные разработки.

ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТИРИСТОРНЫЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ ПРОКАТНЫХ СТАНОВ

Наиболее энергоемкими электромеханическими системами металлургических предприятий являются электроприводы (ЭП) постоянного тока прокатных станов. Энергетические показатели таких электроприводов далеки от оптимальных. Большая часть потерь электрической энергии связана с потреблением реактивной мощности, вызванным фазовым регулированием напряжения [12, 13].

Главные электроприводы клетей, как правило, выполняются с двухзонным регулированием скорости. К ним предъявляются жесткие требования в отношении быстродействия и надежности при отработке ударного приложения нагрузки, возникающего при захвате металла валками, а также в режиме разгона под нагрузкой при прокатке с ускорением. Данные требования выполняются, если динамический запас системы регулирования, и в первую очередь запас выпрямленной ЭДС тиристорного преобразователя (ТП), будут обеспечены в названных динамических режимах. До-

полнительное увеличение запаса обеспечивает повышение надежности ЭП, однако приводит к ухудшению энергетических показателей за счет увеличения потребления реактивной мощности, зависящей от степени регулирования выпрямленной ЭДС.

С целью улучшения энергетических показателей разработана концепция систем двухзонного регулирования, в основу которой положен принцип перераспределения запаса выпрямленной ЭДС ТП в установившемся и динамических режимах [14, 15]. Это позволяет уменьшить величину запаса за счет более рационального его использования.

В рамках названной концепции предложены способ и система зависимого управления потоком возбуждения в функции выпрямленной ЭДС ТП [16]. Суть способа заключается в том, что задающее воздействие на регулятор внешнего контура в цепи возбуждения формируется пропорциональным номинальной выпрямленной ЭДС. Реализация способа позволяет уменьшить запас выпрямленной ЭДС при относительно плавном изменении нагрузки (для тиристорных ЭП прокатных станов – в режиме разгона под нагрузкой). Применение разработанной системы рекомендуется в ЭП непрерывных и реверсивных станов холодной прокатки, работающих в широком диапазоне изменения нагрузки.

Для ограничения запаса выпрямленной ЭДС ТП при отработке ударного приложения нагрузки разработаны способ и система зависимого управления потоком возбуждения с автоматическим изменением уставки выпрямленной ЭДС, а также системы двухзонного регулирования с переключением координаты, регулируемой по цепи возбуждения [17].

С целью обеспечения запаса выпрямленной ЭДС, необходимого для безопасного инвертирования, разработана система двухзонного регулирования скорости с автоматическим регулированием уставки ЭДС в функции напряжения сети, схема которой представлена на рис. 2 [18, 19]. Подробное описание системы приведено в [20].

Выполнены исследования разработанных автома-

тизированных электроприводов методами математического моделирования [21] и на специально созданной лабораторной установке [22]. В результате подтверждены принципиальная возможность и техническая эффективность применения разработанных систем. Подтверждены технические преимущества автоматизированных электроприводов клетей прокатных станов, выполненных на основе рассмотренных систем двухзонного регулирования скорости с переключающимися структурами. Они заключаются в снижении потерь электрической энергии за счет уменьшения потребления реактивной мощности без применения компенсирующих устройств. Улучшение энергетических показателей обеспечивается практически без капитальных затрат за счет снижения вторичного напряжения преобразовательного трансформатора [23]. Применение систем обеспечивает снижение потребления реактивной мощности на 15-35% в зависимости от нагрузки [24]. При этом сохраняются высокие динамические характеристики и показатели надежности электропривода.

Система, представленная на рис. 2, дополнительно обеспечивает повышение устойчивости электроприводов при снижениях напряжения сети во время прокатки толстых полос.

РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИЕ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ СХЕМЫ ШИРОКОПОЛОСНОГО СТАНА ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ

В направлении ресурсосбережения за счет снижения материалоемкости производства выполнен комплекс научно обоснованных разработок по совершенствованию автоматизированных электроприводов и систем регулирования технологических параметров широкополосных станов горячей прокатки, включающий:

1. Разработку и реализацию систем и алгоритмов управления скоростными режимами электроприводов клетей непрерывной группы, обеспечивающих ресурсосбережение и улучшение качества полосы за счет повышения точности регулирования натяжения и поддержания заданного температурного режима прокатки.

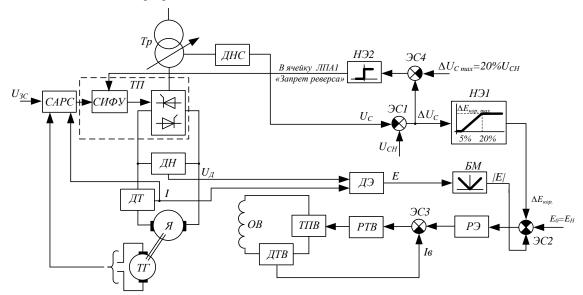


Рис. 2. Функциональная схема системы двухзонного регулирования скорости с автоматическим регулированием уставки ЭДС в функции напряжения сети

- 2. Разработку и реализацию нового принципа построения высокодинамичных систем взаимосвязанного регулирования толщины и натяжения, обеспечивающих технические возможности производства горячекатаной полосы толщиной 0,8÷1,5 мм, являющейся конечной продукцией металлургического предприятия.
- 3. Совершенствование системы автоматического регулирования толщины (CAPT), с целью снижения разнотолщинности по длине полосы.

ПРИНЦИПЫ УПРАВЛЕНИЯ СКОРОСТНЫМИ РЕЖИМАМИ В АСУТП ШИРОКОПОЛОСНОГО СТАНА ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ [25]

В ходе комплексной модернизации электроприводов и создания современной АСУТП стана 2500 ОАО «ММК» предложены и реализованы новые принципы управления скоростными режимами ЭП чистовой группы.

Каскадная коррекция скорости клетей [26]. Для ограничения высоты петли полосы в межклетевом промежутке разработаны система и алгоритм каскадной коррекции скоростей предыдущих клетей чистовой группы. Суть заключается в том, что корректирующие воздействия складываются и передаются в направлении «против хода прокатки». При этом величина воздействия на скорость предыдущей клети рассчитывается по изменению зазора валков. Регулятор размера петли воздействует на задание скорости, устраняет разницу между заданной и фактической длинами полосы в межклетевом промежутке, что позволяет сохранить высоту петли неизменной. В качестве опорной клети используется последняя катающая клеть, корректирующие воздействия на нее отсутствуют. Это вызвано требованиями к постоянству скорости полосы на выходе из чистовой группы. Единственным фактором, влияющим на скоростной режим, является ускорение после заправки полосы. Однако его величина постоянна, поэтому может быть учтена и скомпенсирована в системе регулирования охлаждения.

Компенсация статических отклонений скорости клети [27-30]. В электроприводах чистовой группы применены пропорциональные регуляторы скорости. Их настройка проведена таким образом, чтобы обеспечить максимально возможное быстродействие контура скорости при полном отсутствии перерегулирования. Однако применение П-регуляторов не позволяет учесть и внести в программу контроллера величину статического отклонения (просадки) скорости, зависящего от приложенной нагрузки и определяемого жесткостью механической характеристики. В результате этого управление от математической модели становится неэффективным. С целью устранения этого недостатка разработан узел компенсации статической просадки в программе управления скоростными режимами, включающий разомкнутый и замкнутый контуры компенсации, а также блок логики управления режимами. В результате длительных экспериментов показано, что таким образом обеспечивается наиболее эффективное регулирование с наименьшим влиянием на устойчивость в динамических режимах.

Совершенствование электромеханической системы автоматического регулирования натяжения полосы. К системам регулирования натяжения и петли

полосы современных широкополосных станов горячей прокатки предъявляются жесткие требования, направленные на обеспечение непрерывного контроля и поддержание точности регулирования натяжения как в установившихся, так и в динамических режимах. При прокатке тонких полос в непрерывной группе стана возникает значительное взаимное влияние натяжения и толщины полосы. Существующие системы, выполненные по принципу косвенного регулирования натяжения, не обеспечивают возросших требований по разнотолщинности при переходе на производство горячекатаной полосы толщиной 0,8-1,5 мм. Упрощенные алгоритмы задания и регулирования натяжения, реализованные в аналоговых системах, приводят к появлению значительных погрешностей, которые при повышении требований к точности регулирования геометрических размеров не являются допустимыми. Это требует совершенствования алгоритмов вычисления и регулирования параметров, влияющих на натяжение, которые можно реализовать в системах, выполненных на основе промышленных контроллеров.

Вместе с тем только за счет повышения точности вычисления и регулирования технологических параметров не обеспечивается выполнение возросших требований к динамическим показателям. Возникла задача повышения быстродействия регулирования за счет максимального использования ресурса канала регулирования толщины, выполненного на базе гидравлических нажимных устройств. Наиболее целесообразным является построение системы взаимосвязанного регулирования натяжения и толщины, подобно тому, как это делается на станах холодной прокатки. Однако принципиальным отличием ШСГП является наличие петледержателей в межклетевых промежутках чистовой группы.

Основными результатами являются:

- 1. Алгоритм вычисления задания момента электропривода петледержателя и аналитические зависимости для вычисления составляющих момента, обеспечивающие наиболее высокую точность задания и регулирования натяжения, по сравнению с известными аналогичными системами [31].
- 2. Способ и система косвенного взаимосвязанного регулирования натяжения и толщины полосы, отличительным признаком которых является дополнительное корректирующее воздействие на гидравлическое нажимное устройство предыдущей клети межклетевого промежутка, подаваемое одновременно с корректирующим воздействием на скорость двигателя этой клети [32].
- 3. Теоретические и экспериментальные исследования, которые показали, что применение быстродействующего контура с воздействием на гидравлическое нажимное устройство позволяет увеличить быстродействие системы регулирования натяжения и петли полосы во всех динамических режимах и тем самым обеспечить требуемые отклонения толщины полосы в пределах \pm 5% [33].

Полученные технические результаты наглядно представлены в виде диаграмм на **рис. 3** (на примере стана 2500 OAO «ММК») [34].

Основные технические эффекты, обеспечиваемые при совершенствовании системы:

- снижение материалоемкости (ресурсосбережение) за счет повышения точности регулирования толщины на концах рулона;
- улучшение условий захвата полосы валками за счет реализации алгоритмов управления, обеспечивающих взаимное согласование работы системы регулирования натяжения и петли полосы и гидро-САРТ в динамических режимах;
- повышение размерной точности полосы за счет быстродействующего взаимосвязанного регулирования натяжения и толщины.

Совершенствование САРТ стана 2000. В результате экспериментальных исследований показано, что САРТ Davy McKee, установленная на стане 2000, обеспечивает разнотолщинность полосы по длине в пределах ±0,1 мм и уровень глиссажных меток ±0,05 мм, что значительно превышает допуски. Для устранения этого недостатка разработаны функциональные схемы замкнутых систем статической и динамической коррекции разнотолщинности полосы, реализованные в виде алгоритмов в контроллерах АСУТП. Предложены усовершенствованные алгоритмы компенсации возмущающих воздействий, возникающих при прокатке в чистовой группе.

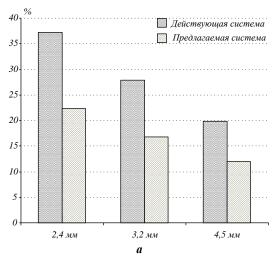
Схема, поясняющая общий принцип построения САРТ, разработанной и технически исполненной на стане 2000, представлена на **рис. 4, а** [35, 36]. Задание на положение нажимных устройств (НУ) можно условно разделить на сигналы статической коррекции, отвечающей за получение проката требуемой толщины, и динамической коррекции, отвечающей за стабилизацию толщины на полосе. Сигналы статической коррекции остаются неизменными для всей партии полос, сигналы динамической коррекции рассчитываются на каждой полосе отдельно и сбрасываются при ее выходе из клети.

Задание на положение гидравлического НУ определяется суммой задания статического рабочего (среднего) положения, динамической коррекции САРТ и грубой коррекции от выходного толщиномера ХОСПТ:

$$X_{\text{THY}} = X_{\text{pa6}} + X_{\text{CAPT}} + X_{\text{OCIIT}}$$
.

Функциональная схема системы динамической коррекции представлена на **рис. 4, б**. Входной сигнал Δh регулятора положения формируется как сумма

$$\Delta h = h_{\text{зал}} + h_{\text{тлш}} + h_{\text{слел}} + h_{\text{внеш}} - h_{\text{тек}}$$
.



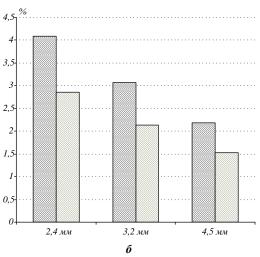


Рис. 3. Сравнение динамических отклонений натяжения (a) и толщины (б) в действующей и разработанной системах регулирования натяжения

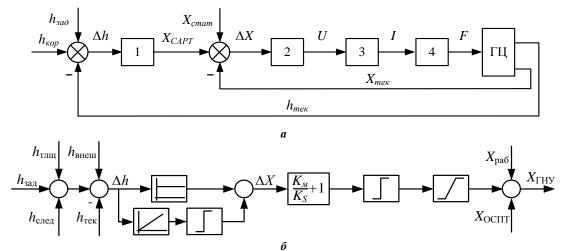


Рис. 4. Сигналы задания САРТ (а) сигналы и структура системы динамической коррекции толщины (б)

Расчет заданной толщины $h_{\rm зад}$ осуществляется при включении режима стабилизации толщины при условии, что металл заправлен в следующую клеть, т.е. имеет место установившийся режим прокатки. Согласно разработанному алгоритму в течение заданного времени (\approx 400 мс) производится усреднение показаний датчиков положения и усилия прокатки, рассчитывается толщина на выходе из клети и запоминается в качестве задания. Затем к заданию прибавляются сигналы коррекции:

- $-h_{\rm глщ}$ тонкая коррекция от выходного толщиномера, она представляет собой интегрированную величину отклонения толщины от заданной на выходе из чистовой группы;
- $-h_{\text{след}}$ коррекция от следующей клети. Назначение: перераспределение регулирования на предыдущие клети при приближении динамической коррекции НУ данной клети к ограничению;
- $-h_{\mbox{\tiny BHeIII}}$ внешняя коррекция. Могут быть введены: компенсация толщины масляной пленки в подшипниках валков, компенсация теплового расширения валков, компенсация износа валков, упреждающая коррекция, и др.

Более подробное описание системы представлено в [35].

Разработана усовершенствованная САРТ, обеспечивающая перераспределение обжатий по клетям чистовой группы, исключающая насыщение регулятора положения НУ последней клети при больших корректирующих сигналах, поступающих от толщиномера [37]. Это позволяет ограничить интегральную коррекцию на последних клетях и тем самым не допустить размыкания контура регулирования толщины.

В целях реализации принципа упреждающей коррекции технологических параметров разработан алгоритм параметрического регулирования толщины головного участка полосы путем упреждающего увеличения зазора валков перед входом полосы в клеть с последующим возвращением нажимных устройств в исходное положение для прокатки основного участка [38, 39].

Для настройки параметров изменения зазора проведены эксперименты, в ходе которых исследована прокатка полос с различными параметрами коррекции по клетям [40]. Также были выполнены исследования влияния изменения межвалкового зазора на отклонения толщины полосы методами математического моделирования [41, 42]. В результате обоснованы усредненные параметры коррекции толщины при прокатке головного участка для полос различного сортамента.

Также предлагается ввести в работу САРТ алгоритмы самообучения: оценивать величину коррекции и уровень разнотолщинности на головном участке на предыдущих полосах и в зависимости от их разности вычислять величину зазора, до которого следует разводить валки перед входом следующей полосы.

В настоящее время исследования проводятся при поддержке Министерства образования и науки РФ (в рамках государственного задания $N \ge 2014$ -80).

Выводы

1. На основе развития концепции энергосберегающих электроприводов с перераспределением запаса

выпрямленной ЭДС тиристорного преобразователя разработаны способы и системы двухзонного регулирования скорости с переключающимися структурами, обеспечивающие снижение потерь электрической энергии, вызванных потреблением реактивной мощности. Разработана система двухзонного регулирования с автоматическим регулированием ЭДС двигателя в функции напряжения сети, обеспечивающая безопасное инвертирование при прокатке полос «тяжелого» сортамента.

- 2. На основе теоретических и экспериментальных исследований разработан комплекс новых научных положений и практически значимых решений, направленных на теоретическое обоснование и создание автоматизированных электроприводов и электротехнических систем взаимосвязанного регулирования технологических параметров, обеспечивающих техническую возможность производства полос расширенного сортамента на действующих широкополосных станах горячей прокатки.
- 3. Теоретически и экспериментально доказано, что внедрение разработанных электроприводов, систем и алгоритмов обеспечивает необходимую размерную точность при производстве особо тонкой полосы и повышает устойчивость технологического процесса при прокатке толстых полос из труднодеформируемых марок стали. В результате обеспечиваются технические предпосылки для производства горячекатаных полос расширенного сортамента на отечественных металлургических предприятиях. Независимо от сортамента, внедрение разработанных технических решений обеспечивает энергосбережение за счет снижения потерь электрической энергии и ресурсосбережение за счет сокращения брака и потерь с концевой обрезью.

Список литературы

- 1. Egawa N., Ishizuka H., Hirita T. Hot Rolling Technology for Producing High Quality Stainless steel at № 3 Hot Strip Mill in Chiba Works // MPT International. 1998. №23(30). P. 82-87 (англ.).
- 2. Bald W., Kneppe Q., Rosenthal D., Sudau P. Innovative technologies for strip production // Steel Times Int. 2000. №5 (24). P. 16-19 (англ.).
- 3. Тонкослябовые литейно-прокатные агрегаты для производства стальных полос / В.М. Салганик, И.Г. Гун, А.С. Карандаев, А.А. Радионов. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. 506 с.
- 4. Карандаев А.С. Автоматизированный электропривод непрерывно-реверсивного литейнопрокатного агрегата: дис. ... д-ра техн. наук / Карандаев Александр Сергеевич. Москва: МЭИ, 2000. 382 с.
- 5. Kneppe G., Rozentel D. Hot strip rolling technology: Tasks for the new century // MPT International. 1998. N 3 (22). P. 56-58, 60, 62, 64, 66, 67 (англ.).
- 6. Определение энергосиловых параметров процессов обработки металлов давлением косвенным методом / А.А. Радионов, Д.Ю. Усатый, А.С. Карандаев, А.С. Сарваров; Магнитогорск. гос. тех. ун-т им. Г.И. Носова. Магнитогорск, 2000. 8 с. Деп. в ВИНИТИ 20.04.2000, № 1085-В00.
- 7. Новые технологии и оборудование для получения сверхтонкой горячекатаной полосы / М. Батис, М. Роту и др. // Сталь. 2004. № 3. С. 30-33.
- 8. Освоение технологии производства тонких полос и гнутых профилей / В.А. Сацкий, А.Ю. Путноки, В.Т. Тилик и др. // Сталь. 2003. № 10. С. 34-42.
 - 9. Ограничение минимальных скоростей электроприво-

- дов стана 2000 при прокатке трубной заготовки / А.А. Радионов, И.Ю. Андрюшин, В.В. Галкин, А.Н. Гостев // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2011. № 3. С. 20-22.
- 10. Автоматическая коррекция скоростей электроприводов клетей стана 2000 при прокатке трубной заготовки / И.Ю. Андрюшин, В.В. Галкин, В.В. Головин, А.С. Карандаев, А.А. Радионов, В.Р. Храмшин // Изв. вузов. Электромеханика. 2011. № 4. С. 31-35.
- 11. Храмшин В.Р. Разработка электротехнических систем непрерывной группы стана горячей прокатки при расширении сортамента полос: дис. ... д-ра техн. наук / Храмшин Вадим Рифхатович. Магнитогорск: ФГБОУ ВПО «МГТУ», 2013 393 с
- 12. Федоров А.А., Корнилов Г.П., Карандаев А.С. Улучшение энергетических показателей электропривода в системе двухзонного регулирования частоты вращения // Изв. вузов. Энергетика. 1983. № 9. С. 29-33.
- 13. Головин В.В., Карандаев А.С., Храмшин В.Р. Энергосберегающие тиристорные электроприводы с автоматическим изменением координаты, регулируемой по цепи возбуждения // Изв. вузов. Электромеханика. 2006. № 4. С. 35-39.
- 14. Концепция построения электроприводов прокатных станов с двухзонным регулированием скорости и улучшенными энергетическими показателями / А.С. Карандаев, А.А. Радионов, В.В. Головин, А.В. Осипов // Труды IV Международной (XV Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу «Автоматизированный электропривод в XXI веке: пути развития» (АЭП-2004, Магнитогорск). Ч.2. Магнитогорск, 2004. С. 260-264.
- 15. Карандаев А.С. Энергосбережение приоритетное направление научных исследований энергетического факультета Магнитогорского государственного технического университета // Изв. вузов. Электромеханика. 2004. №2. С. 5-10.
- 16. Карандаев А.С., Радионов А.А., Головин В.В. Система двухзонного зависимого регулирования скорости в функции выпрямленной ЭДС тиристорного преобразователя // Изв. вузов. Электромеханика. 2004. №2. С. 40-46.
- 17. Храмшин В.Р., Храмшин Р.Р., Лукин А.А. Способ регулирования уставки ЭДС двигателя прокатного стана в функции напряжения сети // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. 2012. Т.2. №70. С. 105-108.
- 18. Патент на полезную модель 121669 РФ, МПК7 Н 02 Р 7/06. Устройство двухзонного регулирования скорости двигателя постоянного тока / В.Р. Храмшин, А.С. Карандаев, Р.Р. Храмшин, И.Ю. Андрюшин // БИМП. 2012. №30. С. 112.
- 19. Храмшин В.Р. Разработка и внедрение автоматизированных электроприводов и систем регулирования технологических параметров широкополосного стана горячей прокатки //Вестник ИГЭУ. 2012. №6. С. 100-104.
- 20. Храмшин В.Р. Повышение безопасности режима инвертирования тиристорного электропривода при прокатке полос расширенного сортамента // Электротехника. 2013. №2. С. 52-56.
- 21. Математическое моделирование тиристорного электропривода с переключающейся структурой / А.С. Карандаев, В.Р. Храмшин, В.В. Галкин, А.А. Лукин // Изв. вузов. Электромеханика. 2010. №3. С. 47-53.
- 22. Экспериментальные исследования тиристорных электроприводов с двухзонным регулированием скорости с улучшенными энергетическими характеристиками / А.С. Карандаев, В.Р. Храмшин, А.А. Лукин, Г.В. Шурыгина, В.В. Головин // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Сер. «Энергетика». 2010. №14. С. 67-72.
- 23. Головин В.В., Карандаев А.С., Храмшин В.Р. Оценка эффективности применения тиристорного электропривода с автоматическим изменением координаты, регулируемой по цепи возбуждения // Изв. вузов. Электромеханика. 2006. № 4.

- C. 40-45.
- 24. Храмшин В.Р. Энергосберегающие тиристорные электроприводы прокатных станов: монография. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2013. 180 с.
- 25. Технологические схемы управления электроприводами чистовой группы широкополосного стана горячей прокатки / А.С. Карандаев, В.Р. Храмшин, И.Ю. Андрюшин, В.В. Головин, П.В. Шиляев // Труды VII конгресса прокатчиков. Т.1. М., 2007. С. 71-75.
- 26. Каскадное управление скоростными режимами широкополосного стана горячей прокатки / П.В. Шиляев, И.Ю. Андрюшин, В.В. Головин, А.С. Карандаев, В.Р. Храмшин // Труды V Международной (XVI Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу. СПб., 2007. С. 417-421.
- 27. Патент на изобретение 2477187 РФ, МПК7 В 21 В 37/52. Способ автоматического управления процессом прокатки в непрерывной группе клетей / И.Ю. Андрюшин, В.В. Галкин, В.В. Головин, П.В. Шиляев, А.С. Карандаев, В.Р. Храмшин, Р.Р. Храмшин // БИМП. 2013. №7.
- 28. Храмшин В.Р. Система автоматической коррекции скоростей электроприводов клетей широкополосного стана горячей прокатки // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Сер. «Энергетика». 2012. № 37 (296). С. 60-67.
- 29. Храмшин В.Р. Способы компенсации статических отклонений скорости электроприводов клетей широкополосного стана горячей прокатки // Электротехника. 2013. №4. С. 49-55.
- 30. Андрюшин И.Ю., Шиляев П.В., Головин В.В. Экспериментальные исследования системы автоматической коррекции натяжения в межклетевом промежутке широкополосного стана горячей прокатки // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Сер. «Энергетика». Вып. 11. 2009. № 15. С. 51-59.
- 31. Алгоритмы цифровой системы автоматического регулирования натяжения и петли широкополосного стана горячей прокатки / П.В. Шиляев, И.Ю. Андрюшин, В.В. Головин, А.А. Радионов, А.С. Карандаев, В.Р. Храмшин // Электротехника. 2013. №10. С. 3-11
- 32. Патент на изобретение 2446026 РФ, МПК7 В 21 В 37/48. Способ автоматического регулирования натяжения полосы в межклетевом промежутке широкополосного стана горячей прокатки / А.С. Карандаев, В.Р. Храмшин, П.В. Шиляев, И.Ю. Андрюшин, В.В. Головин, П.Л. Пономарев // БИМП. 2012. №9. С. 117.
- 33. Математическое моделирование взаимосвязанных электромеханических систем межклетевого промежутка широкополосного стана горячей прокатки / Карандаев А.С., Храмшин В.Р., Андрюшин И.Ю., Шиляев П.В., Головин В.В. // Изв. вузов. Электромеханика. 2009. №1. С. 12-20.
- 34. Храмшин В.Р. Совершенствование электроприводов и систем регулирования технологических параметров широкополосного стана горячей прокатки при расширении сортамента полос // Материалы VII Междунар. (XVII Всерос.) науч.-техн. конф. по автоматизированному электроприводу (АЭП-2012): сб. тр. Иваново: ФГБОУ ВПО «ИГЭУ», 2012. С. 561-565.
- 35. Технические решения в системе автоматического регулирования толщины стана 2000 горячей прокатки / В.Р. Храмшин, И.Ю. Андрюшин, П.В. Шиляев, С.А. Петряков, А.Н. Гостев // Изв. вузов. Электромеханика. 2011. №4. С. 41-45.
- 36. Совершенствование системы автоматического регулирования толщины широкополосного стана горячей прокатки / В.Р. Храмшин, А.С. Карандаев, Р.Р. Храмшин, И.Ю. Андрюшин, С.А. Петряков // Труды VII Международной (XVIII Всероссийской) научно-технической конференции по автоматизированному электроприводу, Иваново: ФГОУ ВПО

«Ивановский государственный энергетический университет». 2012. С. 556-561.

- 37. Патент на полезную модель 117839 РФ, МПК7 В 21 В 37/00. Устройство автоматического регулирования толщины полосы непрерывного широкополосного стана горячей прокатки / В.Р. Храмшин, А.С. Карандаев, С.А. Петряков, Р.Р. Храмшин // БИМП. 2012. №19. С. 36.
- 38. Патент на полезную модель 117329 РФ, МПК7 В 21 В 37/48. Устройство для коррекции толщины головного участка полосы в чистовой клети широкополосного стана горячей прокатки / В.Р. Храмшин, А.С. Карандаев, С.А. Петряков, В.В. Галкин, Р.Р. Храмшин // БИМП. 2012. №18. С. 38.
- 39. Автоматическая коррекция толщины головного участка полосы в гидро-САРТ широкополосного стана горячей прокатки / В.В. Галкин, С.А. Петряков, А.С. Карандаев, В.Р.

- Храмшин //Изв. вузов. Электромеханика. 2011. №4. С. 46-50.
- 40. Карандаев А.С., Храмшин В.Р. Исследование системы автоматической коррекции толщины полосы на широкополосном стане горячей прокатки // Изв. вузов. Электромеханика. 2013. №4. С. 39-46.
- 41. Карандаев А.С., Храмшин В.Р., Петряков С.А. Следящая система автоматического регулирования толщины полосы стана горячей прокатки // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2011. №3. С. 25-29.
- 42. Hramshin V.R., Karandaev A.S., Radionov A.A., Hramshin R.R. Study of Thickness Control of Strip Head Section Using Mathematical Simulation Methods //Вестник Южно-Уральского государственного университета. Сер. «Энергетика». Вып. 13. 2013. № 1. С. 144-153.

INFORMATION IN ENGLISH

IMPROVEMENT OF DRIVES AND AUTOMATIC CONTROL PROCESS PARAMETERS OF WIDE STRIP HOT ROLLING MILL IN THE PROCESS OF PRODUCT RANGE EXPANSION

Karandaev A.S., Khramshin V.R.

It is shown that the current trend of improving the technology of wide strip hot rolling mills is product mix expansion in the manufacture of small batches of products. Product mix expansion occurs due to the production of thick bands of hard steels, particularly thin strip, which is the final product of metallurgical enterprises. Technological features of product range extension at wide strip rolling mills 2000 and 2500 of OJSC "Magnitogorsk Iron and Steel Works" (OJSC "MMK") are listed. The authors dwell on developments providing energy savings by reducing the consumption of reactive power thyristor electric drives stands without compensating devices. The article presents a complex of designed and implemented technical solutions to improve the systems of automatic control of the following process parameters: tension, strip thickness and rolling speed modes. It is shown that the developed system provides resource savings by reducing material consumption and improves the quality of the strip by increasing the precision of tension and thickness control in steadystate and dynamic conditions.

Keywords: wide strip hot rolling mill, gauge, automated electric drive, energy saving, process parameters, automatic control system, improvement, experimental research, introduction.

REFERENCES

- 1. Egawa N., Ishizuka H., Hirita T. Hot Rolling Technology for Producing High Quality Stainless steel at № 3 Hot Strip Mill in Chiba Works. MPT International. 1998, no. 23 (30), pp. 82-87.
- 2. Bald W., Kneppe Q., Rosenthal D., Sudau P. Innovative technologies for strip production. Steel Times Int. 2000, no. 5(24), pp. 16-19.
- 3. Salganik V.M., Gun I.G., Karandaev A.S., Radionov A.A. Tonkosljabovye litejno-prokatnye agregaty dlja proizvodstva stalnyh polos [Thin slab casting and rolling machines for steel strip production]. Moscow: Bauman Moscow State Technical University, 2003, 506 p.
- 4. Karandaev A.S. Avtomatizirovannyj jelektroprivod nepreryvno-reversivnogo litejno-prokatnogo agregata: Dis. ... dokt. tehn. nauk [Automated electric drive of continuous casting and reverse rolling unit: Dis. ... Doctor. Tehn. Science]. Moscow: MPEI, 2000, 382 p.
- 5. Kneppe G., Rozentel D. Hot strip rolling technology: Tasks for the new century. MPT International. 1998, no. 3 (22), pp. 56-58, 60, 62, 64, 66, 67.
- 6. Radionov A.A., Usatyj D.Ju., Karandaev A.S., Sarvarov A.S. Opredelenie jenergosilovyh parametrov processov obrabotki metallov davleniem kosvennym metodom [Determination of pow-

- er parameters of metal forming processes using the indirect method]; Nosov Magnitogorsk state technical university. Magnitogorsk, 2000. 8 p. Deposited in VINITI 20.04.2000, no. 1085-B00.
- 7. Batis M., Bobig P., Rotu M. *Novye tehnologii i oborudovanie dlja poluchenija sverhtonkoj gorjachekatanoj polosy* [New technologies and equipment for ultrafine hot strip]. Stal [Steel]. 2004, no. 3, pp. 30-33.
- 8. Sackij V.A., Putnoki A.Ju., Tilik V.T. Osvoenie tehnologii proizvodstva tonkih polos i gnutyh profilej [Development of production technology of thin strips and roll-formed sections]. *Stal* [Steel]. 2003, no.10, pp. 34-42.
- 9. Radionov A.A., Andrjushin I.Ju., Galkin V.V., Gostev A.N. Ogranichenie minimalnyh skorostej elektroprivodov stana 2000 pri prokatke trubnoj zagotovki [Minimum speed limit of 2000 mill electric drives during tube shell rolling]. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2011, no. 3, pp. 20-22.
- 10. Andrjushin I. Yu., Galkin V.V., Golovin V.V., Karandaev A.S., Radionov A.A., Khramshin V.R. Avtomaticheskaja korrekcija skorostej elektroprivodov kletej stana 2000 pri prokatke trubnoj zagotovki [Automatic Correction of 2000 Mill Stands Speed When Rolling Tube Stock]. *Izvestija vuzov. Elektromehanika* [Sci. electromechanics]. 2011, no. 4, pp. 31-35.
- 11. Khramshin V.R. Razrabotka elektrotehnicheskih sistem nepreryvnoj gruppy stana gorjachej prokatki pri rasshirenii sortamenta polos: Dis. ... dokt. tehn. nauk [Development of Electrical Systems of Continuous Hot Rolling Mill in Product Range Expansion: Dis. ... Doctor. Tehn. Science]. Magnitogorsk, MSTU. 2013. 393 p.
- 12. Fedorov A.A., Kornilov G.P., Karandaev A.S. Uluchshenie energeticheskih pokazatelej elektroprivoda v sisteme dvuhzonnogo regulirovanija chastoty vrashhenija [Improving the energy performance of the drive system in a two-zone speed control]. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij SSSR. Energetika*. [Proceedings of the higher educational institutions of the USSR. Energy.] 1983, no. 9, pp. 29-33.
- 13. Golovin V.V., Karandaev A.S., Khramshin V.R. Energosberegajushhie tiristornye elektroprivody s avtomaticheskim izmeneniem koordinaty, reguliruemoj po tsepi vozbuzhdenija [Energy-saving thyristor electric drives with automatic change of coordinates controlled by the excitation circuit]. *Izvestija vuzov. Jelektromehanika* [Sci. electromechanics]. 2006, no. 4, pp. 35-39.

- 14. Karandaev A.S., Radionov A.A., Golovin V.V., Osipov A.V. Koncepcija postroenija elektroprivodov prokatnyh stanov s dvuhzonnym regulirovaniem skorosti i uluchshennymi energeticheskimi pokazateljami [Development Concept of Electric Rolling Mills with a Two-zone Adjustable Speed and Improved Energy Performance]. Trudy IV Mezhdunarodnoj (XV Vserossijskoj) konferencii po avtomatizirovannomu elektroprivodu [Proceedings of the IV International (XV All-Russian) Conference on automated electric drive]. Part 2. Magnitogorsk, MSTU, 2004, pp. 260-264.
- 15. Karandaev A.S. Energosberezhenie prioritetnoe napravlenie nauchnyh issledovanij energeticheskogo fakulteta Magnitogorskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta [Energy saving is a priority research at Energy Department of Magnitogorsk State Technical University]. *Izvestija vuzov. Elektromehanika* [Sci. electromechanics]. 2004, no. 2, pp. 5-10.
- 16. Karandaev A.S., Radionov A.A., Golovin V.V. Sistema dvuhzonnogo zavisimogo regulirovanija skorosti v funkcii vyprjamlennoj JeDS tiristornogo preobrazovatelja [Two-zone system of dependent speed control function of rectified EMF thyristor converter]. *Izvestija vuzov. Elektromehanika* [Sci. electromechanics]. 2004, no. 2, pp. 40-46.
- 17. Khramshin V.R., Khramshin R.R., Lukin A.A. Sposob regulirovanija ustavki JeDS dvigatelja prokatnogo stana v funkcii naprjazhenija seti [Method of EMF setpoint control of rolling mill motor depending on main's voltage]. *Aktualnye problemy sovremennoj nauki, tehniki i obrazovanija*. [Urgent problems of modern science, technology and education]. Magnitogorsk, MSTU, 2012, part 2, no. 70, pp. 105-108.
- 18. Khramshin V.R., Karandaev A.S., Khramshin R.R., Andrjushin I.Ju. *Ustrojstvo dvuhzonnogo regulirovanija skorosti dvigatelja postojannogo toka* [Two-band device to control the speed of DC motor]. Patent 121669 RU, Opening. Inventions, 2012, no. 30.
- 19. Khramshin V.R. Razrabotka i vnedrenie avtomatizirovannyh elektroprivodov i sistem regulirovanija tehnologicheskih parametrov shirokopolosnogo stana gorjachej prokatki [Development and introduction of automated electric drives and control systems of technological parameters of wide strip hot rolling mill]. *Vestnik IGJeU* [Bulletin of ISPU]. 2012, no. 6, pp. 100-104.
- 20. Khramshin V.R. Povyshenie bezopasnosti rezhima invertirovanija tiristornogo elektroprivoda pri prokatke polos rasshirennogo sortamenta [Safety Improvement of Inverting the Thyristor Drive during Rolling of Extended Product Range]. *Elektrotehnika* [Electrical Engineering]. 2013, no. 2, pp. 52-56.
- 21. Karandaev A.S., Khramshin V.R., Galkin V.V., Lukin A.A. Matematicheskoe modelirovanie tiristornogo elektroprivoda s perekljuchajushhejsja strukturoj [Mathematical Modeling of the Thyristor Electric Drive with Switchable Structure]. *Izvestija vuzov. Elektromehanika* [Sci. electromechanics]. 2010, no. 3, pp. 47-53.
- 22. Karandaev A.S., Khramshin V.R., Lukin A.A., Shurigina G.V., Golovin V.V. Eksperimentalnye issledovanija tiristornyh elektroprivodov s dvuhzonnym regulirovaniem skorosti s uluchshennymi energeticheskimi harakteristikami [Experimental research of thyristor drives with two-region speed control with improved energy characteristics]. *Vestnik JuUrGU* [Journal SUSU]. 2010, no. 14, pp. 67-72.
- 23. Golovin V.V., Karandaev A.S., Khramshin V.R. Otsenka effektivnosti primenenija tiristornogo elektroprivoda s avtomaticheskim izmeneniem koordinaty, reguliruemoj po tsepi vozbuzhdenija [Effectiveness evaluation of thyristor with automatic coordinate change controlled by excitation circuit]. *Izvestija vuzov. Elektromehanika* [Sci. electromechanics]. 2006, no. 4, pp. 40-45.
- 24. Khramshin V.R. Energosberegajushhie tiristornye elektroprivody prokatnyh stanov: monografija [Energy-saving thyristor electric drives of rolling mills: Monograph]. Magnitogorsk, MSTU, 2013, 180 p.

- 25. Karandaev A.S., Khramshin V.R., Andrjushin I.Yu. at al. Tehnologicheskie shemy upravlenija elektroprivodami chistovoj gruppy shirokopolosnogo stana gorjachej prokatki [Manufacturing scheme of finishing train electric drive control of wide strip hot rolling mill]. *Trudy VII kongressa prokatchikov*. [Papers of the VII millmen congress]. Moscow, 2007, vol. 1, pp. 71-75.
- 26. Shiljaev P.V., Andrjushin I.Ju., Golovin V.V., Karandaev A.S., Khramshin V.R. Kaskadnoe upravlenie skorostnymi rezhimami shirokopolosnogo stana gorjachej prokatki [Cascade control of speed modes of wide strip hot rolling mill]. *Trudy V Mezhdunarodnoj (XVI Vserossijskoj) konferencii po avtomatizirovannomu elektroprivodu* [Proceedings of the V International (XVI All-Russian) Conference on automated electric drive]. St. Petersburg, 2007, pp. 417-421.
- 27. Andrjushin I.Ju., Galkin V.V., Golovin V.V., Shiljaev P.V., Karandaev A.S., Khramshin V.R., Khramshin R.R. Sposob avtomaticheskogo upravlenija processom prokatki v nepreryvnoj gruppe kletej [Automatic control method of rolling in the continuous train]. Patent 2477187 RU, Opening. Inventions, 2013, no. 7.
- 28. Khramshin V.R. Sistema avtomaticheskoj korrekcii skorostej elektroprivodov kletej shirokopolosnogo stana gorjachej prokatki [System of automatic speed adjustment of stand electric drives of wide strip hot rolling mill]. *Vestnik JuUrGU* [Journal of SUSU]. 2012, vol. 18, no. 37 (296), pp. 60-67.
- 29. Khramshin V.R. Sposoby kompensatsii staticheskih otklonenij skorosti elektroprivodov kletej shirokopolosnogo stana gorjachej prokatki [Ways of static speed deviation compensation of electric drive of wide strip hot rolling mill]. *Elektrotehnika* [Electrical Engineering]. 2013, no. 4, pp. 49-55.
- 30. Andrjushin I.Ju., Shiljaev P.V., Golovin V.V. Eksperimentalnye issledovanija sistemy avtomaticheskoj korrekcii natjazhenija v mezhkletevom promezhutke shirokopolosnogo stana gorjachej prokatki [Experimental study of automatic correction of tension in interstand interval of wide strip hot rolling mill]. *Vestnik JuUrGU* [Journal SUSU]. 2009, vol. 11, no. 15, pp. 51-59.
- 31. Shilyaev P.V., Andryushin I.Yu., Golovin V.V., Radionov A.A., Karandaev A.S., Khramshin V.R. Algoritmy tsifrovoj sistemy avtomaticheskogo regulirovanija natjazhenija i petli shirokopolosnogo stana gorjachej prokatki [Algorithms of Digital Automatic System for Tension and Loop Control in Wide Strip Hot Rolling Mill]. *Elektrotehnika* [Electrical Engineering]. 2013, no. 10, pp. 3-11.
- 32. Karandaev A.S., Khramshin V.R., Shiljaev P.V., Andrjushin I.Ju., Golovin V.V., Ponomarev P.L. Sposob avtomaticheskogo regulirovanija natjazhenija polosy v mezhkletevom promezhutke shirokopolosnogo stana gorjachej prokatki [Method of automatic adjustment of tension in interstand gap of wide strip hot rolling mill]. Patent 2446026 RU, Opening. Inventions, 2012, no. 9.
- 33. Karandaev A.S., Khramshin V.R., Andrjushin I.Yu., Shiljaev P.V., Golovin V.V. Matematicheskoe modelirovanie vzaimosvjazannyh elektromehanicheskih sistem mezhkletevogo promezhutka shirokopolosnogo stana gorjachej prokatki [Mathematical modeling of related electro-mechanical systems of interstand gap of wide strip hot rolling mill]. *Izvestija vuzov. Elektromehanika* [Sci. Electromechanics]. 2009, no. 1, pp. 12-20.
- 34. Khramshin V.R. Sovershenstvovanie elektroprivodov i sistem regulirovanija tehnologicheskih parametrov shirokopolosnogo stana gorjachej prokatki pri rasshirenii sortamenta polos [Improvement of electric drives and control systems of technological parameters of wide strip hot rolling mill in product range expansion]. *Trudy VI Mezhdunarodnoj (XVII Vserossijskoj) konferencii po avtomatizirovannomu elektroprivodu* [Proceedings of the VI International (XVII All-Russian) Conference on automated electric drive]. Ivanovo: ISPU, 2012, pp. 561-565.
 - 35. Khramshin V.R., Andrjushin I.Yu., Shiljaev P.V.,

Petrjakov S.A., Gostev A.N. Tehnicheskie reshenija v sisteme avtomaticheskogo regulirovanija tolshhiny stana 2000 gorjachej prokatki [New Engineering Designs in the Automatic Control System of Hot Rolling Mill 2000 Thickness]. *Izvestija vuzov. Elektromehanika* [Sci. electromechanics]. 2011, no. 4, pp. 41-45.

- 36. Khramshin V.R., Karandaev A.S., Khramshin R.R., Andrjushin I.Ju., Petrjakov S.A. Sovershenstvovanie sistemy avtomaticheskogo regulirovanija tolshhiny shirokopolosnogo stana gorjachej prokatki [Improving of automatic thickness control of wide strip hot rolling mill]. *Trudy VI Mezhdunarodnoj (XVII Vserossijskoj) konferencii po avtomatizirovannomu elektroprivodu* [Proceedings of the VI International (XVII All-Russian) Conference on automated electric drive]. Ivanovo: ISPU, 2012, pp. 556-561.
- 37. Khramshin V.R., Karandaev A.S., Petrjakov S.A., Khramshin R.R. Ustrojstvo avtomaticheskogo regulirovanija tolshhiny polosy nepreryvnogo shirokopolosnogo stana gorjachej prokatki [Automatic regulation of strip thickness of continuous wide strip hot rolling mill]. Patent 117839 RU, Opening. Inventions, 2012, no. 19.
- 38. Khramshin V.R., Karandaev A.S., Petrjakov S.A., Galkin V.V., Khramshin R.R. Ustrojstvo dlja korrekcii tolshhiny golovnogo uchastka polosy v chistovoj kleti shirokopolosnogo stana gorjachej prokatki [Device for thickness adjustment of strip head in finishing stand of wide strip hot rolling mill]. Patent 117329 RU, Opening. Inventions, 2012. no. 18.

39. Galkin V.V., Petrjakov S.A., Karandaev A.S.,

Khramshin V.R. Avtomaticheskaja korrekcija tolshhiny golovnogo uchastka polosy v gidravlicheskoj sisteme avtomaticheskogo regulirovanija tolshhiny shirokopolosnogo stana gorjachej prokatki [Automatic Correction of Strip Head Section Thickness in Hydraulic System of Automatic Control of Wide-Strip Hot Rolling Mill]. Izvestija vuzov. Elektromehanika [Sci. Electromechanics], 2011, no. 4, pp. 46-50.

- 40. Karandaev A.S., Khramshin V.R. Issledovanie sistemy avtomaticheskoj korrekcii tolshhiny polosy na shirokopolosnom stane gorjachej prokatki [Study of Thickness Control of Strip Head Section Using Mathematical Simulation Methods]. *Izvestija vuzov. Elektromehanika* [Sci. electromechanics], 2013, no. 4, pp. 39-46.
- 41. Karandaev A.S., Khramshin V.R., Petrjakov S.A. Sledjashhaja sistema avtomaticheskogo regulirovanija tolshhiny polosy stana gorjachej prokatki [Servo-Mechanism of Automatic Control Strip Gage of Hot Rolling Mill]. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2011, no. 3, pp. 25-29.
- 42. Khramshin V.R., Karandaev A.S., Radionov A.A., Khramshin R.R. Issledovanie sistemy avtomaticheskoj korrekcii tolshhiny polosy na shirokopolosnom stane gorjachej prokatki [Study of Thickness Control of Strip Head Section Using Mathematical Simulation Methods]. *Vestnik of JuUrGU* [Journal of SUSU]. 2013, no. 1 (13), pp. 144-153.

УДК 621.316.728

Васильев Б.Ю., Козярук А.Е.

РЕЛЕЙНО-ИМПУЛЬСНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АСИНХРОННЫМИ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ: ПРЯМОГО И ФАЗЗИ-ЛОГИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Рассмотрены системы управления асинхронными электроприводами на основе алгоритмов прямого управления моментом и фаззи-логических алгоритмов. Приведены структуры систем различных алгоритмов. Проанализированы результаты их использования.

Ключевые слова: электропривод, асинхронный двигатель, прямое управление моментом, фаззи-логическое управление.

Введение

Для обеспечения высокоэффективного регулирования электромеханических координат электроприводов (ЭП) на основе асинхронных двигателей (АД) необходимо осуществлять независимое управление электромагнитным моментом и магнитным потоком машин. В современных электроприводах для этого могут использоваться следующие виды систем автоматического управления (САУ): векторное управление с ориентацией по потокосцеплению статора (field oriented control – FOC) [1-7]; прямое управление моментом (Direct Torque Control – DTC) [8-14].

Системы FOC и DTC в сочетании с высокоэффективными алгоритмами пространственно-векторной модуляции (space vector modulation – SVM) обеспечивают высокое качество и точность управления координатами АД [15-19]. Однако в последнее время получают распространение интеллектуальные алгоритмы управления ЭП: нечеткие алгоритмы (fuzzy logic); генетические алгоритмы (genetic algorithms). САУ ЭП на основе интеллектуальных алгоритмов имеют структуру, аналогичную системам прямого управления моментом. Поэтому они получили название: Fuzzy Direct Torque Control – FDTC и Genetic Direct Torque Control

– GDTC

Преимущество интеллектуальных алгоритмов заключается в минимизации пульсаций крутящего момента и обеспечении более высокого уровня электромеханической совместимости.

Система прямого управления моментом

Главные особенности алгоритма DTC заключаются в том, что в CAУ используются релейные регуляторы, а выбор управляющего воздействия осуществляется по таблице переключений.

Основные преимущества DTC заключаются в простоте, надежности управления, а также инвариантности к внешним и параметрическим возмущениям за счет отсутствия в системе преобразователей координат, регуляторов составляющих тока статора и специальных аппаратных и программных средств для обеспечения модуляционного управления преобразователем частоты.

Структурная схема ЭП с системой DTC представлена на **рис.** 1. В САУ установлены следующие регуляторы: двухуровневый регулятор потокосцепления статора (ДРП); трехуровневый регулятор момента (ТРМ). Результирующий вектор выходного напряжения автономного инвертора и комбинация коммути-

руемых полупроводниковых ключей автономного инвертора (АИ) выбираются по таблице переключений (ТП DTC). В зависимости от структуры и требований к динамическим характеристикам ЭП таблица переключений может иметь различное внутреннее содержание.

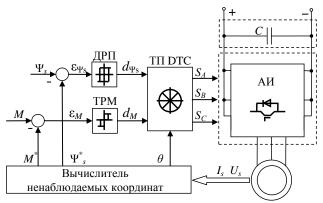


Рис. 1. Структурная схема ЭП с системой DTC

Обратная связь в системе DTC образуется с помощью вычислителя ненаблюдаемых координат, который в режиме реального времени по измеренным координатам ЭП U_s , I_s , U_{dc} , производит расчет действующих значений векторов электромагнитного момента M^* и потокосцепления статора Ψ^*_s , а также рассчитывает величину текущего угла θ . Вычисленные значения M^* , Ψ^*_s сравниваются с заданными M, Ψ_s . Рассогласования поступают на вход релейных регуляторов. Характеристики релейных регуляторов представлены на рис. 2.

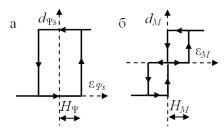


Рис. 2. Характеристики релейных регуляторов системы DTC

Выходные сигналы релейных регуляторов $d_{\Psi s}, d_M$ и значение угла поворота вектора потокосцепления статора θ поступают на вход блока «Таблица переключений DTC», по которой выбирается вектор результирующего напряжения АИ. После этого в системе прямого управления автоматически формируется коммутационная функция управления полупроводниковыми ключами (S_A , S_B , S_C), при замыкании которых образуется выбранный вектор. Условия выбора результирующего вектора напряжения представлены в **табл. 1**.

Таблица 1 Условия выбора результирующего вектора напряжения в системе DTC

B CUCTEME DTC									
d_{Ψ_S}	1			0					
d_M	0	0	-1	1	0	-1			
θ_1	U_5	U_7	U_6 ,	U_1	U_0	U_2			
θ_2	U_1	U_0	U_4	U_3	U_7	U_6			
θ_3	U_3	U_7	U_5	U_2	U_0	U_4			
θ_4	U_2	U_0	U_1	U_6	U_7	U_5			
θ_5	U_6	U_7	U_3	U_4	U_0	U_1			
θ_6	U_4	U_0	U_2	U_5	U_7	U_3			

Принцип функционирования системы прямого управления проиллюстрирован на **рис. 3**. Если вектор Ψ_s в определенный момент времени находится в первом секторе и необходимо увеличить его амплитуду и уменьшить электромагнитный момент, то по таблице переключений система управления выберет и сформирует вектор U_6 .

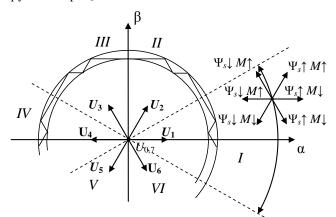


Рис. 3. Годограф потокосцепления статора АД

Система фаззи-логического управления электроприводом

Структурная схема системы фаззи-логического управления асинхронным электроприводом представлена на рис. 4. Система FDTC имеет три входа и один выход. На входы поступают сигналы, соответствующие рассогласованию по моменту и потокосцеплению статора, а также угол поворота вектора потокосцепления статора. Вычислительный алгоритм на основе нечеткой логики состоит из трех этапов: фаззификации, фаззи-логического вычисления и дефаззификации.

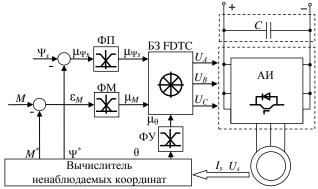


Рис. 4. Структурная схема электропривода с системой FDTC

Фаззификация входных сигналов выполняется с использованием функций принадлежностей. Функция принадлежности рассогласования по потокосцеплению статора (ФП) представлена тремя множествами: ZF – близкое к нулю, PF – положительное; NF – отрицательное. Функция принадлежности рассогласования по моменту (ФП) также представлена тремя множествами: ZM – близкое к нулю, PM – положительное; NM – отрицательное. На третий вход нечеткой системы управления поступает сигнал, соответствующий угловому положению вектора потокосцепления статора (ФУ). Величине этой переменной соответствуют шесть нечетких множеств θ_1 к θ_6 .

Функции принадлежности входных координат

FDTC представлены на **рис.** 5: a — потокосцепления статора; δ — электромагнитного момента; ϵ — угла поворота вектора потокосцепления статора.

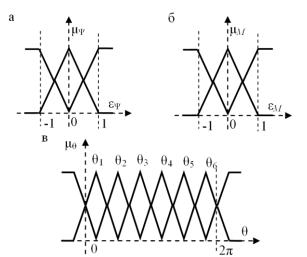


Рис. 5. Функции принадлежности входных координат FDTC

Этап фаззи-логических вычислений выполняется на основе базы знаний (БЗ FDTC), сформированной по экспертной оценке. База знаний связывает входные и выходные сигналы в соответствии с правилами управления, которые формулируются в форме: если $\varepsilon_F = A_i$; $\varepsilon_M = B_i$; $\theta = C_i$ то $U = U_i$. При заданных функциях принадлежности входных сигналов количество таких правил будет 54. Эти правила приведены в **табл. 2**.

Для дефаззификации используется алгоритм логического вывода Мамдани, который основан на минимаксном выборе, реализуемом в два этапа. На первом этапе вычисляется весовой коэффициент

$$\alpha_{i} = \min[\mu_{\Psi}(\varepsilon_{\Psi}), \mu_{M}(\varepsilon_{M}), \mu_{\theta}(\theta)],$$
$$\mu_{Ui}^{*} = \min[\alpha_{i}, \mu_{Ui}(U)],$$

а затем вычисляется переменная с максимальным весовым коэффициентом

$$M_{Uout} = \max \left[\mu_{Ui}^* (U) \right].$$

Схема фаззи-логического регулирования представлена на рис. 6.

Таблица 2 Нечеткие правила базы знаний в системе FDTC

печеткие правила вазы знании в системет в те							
Ψ3	ϵ_M	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5	θ_6
	PM	U_2	U_3	U_4	U_5	U_6	U_7
PF	ZM	U_0	U_7	U_0	U_7	U_0	U_7
	NM	U_6	U_1	U_2	U_3	U_4	U_5
ZF	PM	U_2	U_3	U_4	U_5	U_6	U_7
	ZM	U_7	U_0	U_7	U_0	U_7	U_0
	NM	U_6	U_1	U_2	U_3	U_4	U_5
	PM	U_3	U_4	U_5	U_6	U_1	U_2
NF	ZM	U_7	U_0	U_7	U_0	U_7	U_0
	NM	U_5	U_6	U_1	U_2	U_3	U_4

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРЯМОГО И ФАЗЗИ-ЛОГИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ АСИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

Эффективность управления координатами электропривода с системами DTC и FDTC исследовалась с помощью имитационного моделирования в среде MatLab. При имитационном моделировании использовались модели асинхронного двигателя АДКЗ 4A250S4У3. Номинальная мощность электродвигателя 75 кВт, номинальное напряжение 380 В.

На **рис. 7** представлены осциллограммы изменения электромагнитного момента (a) и потокосцепления статора (δ), а также годограф потокосцепления статора (a). Осциллограммы слева сняты с модели ЭП с DTC, а справа – FDTC.

На осциллограмме **рис. 7**, a видно, что пульсации электромагнитного момента при использовании фаззилогического управления значительно ниже, чем у ЭП с прямым управлением моментом.

Регулирование потокосцепления статора (рис. $7, \delta$) также осуществляется с большей точностью, а переходный процесс протекает с меньшей колебательностью, что видно по годографу (рис. $7, \epsilon$).

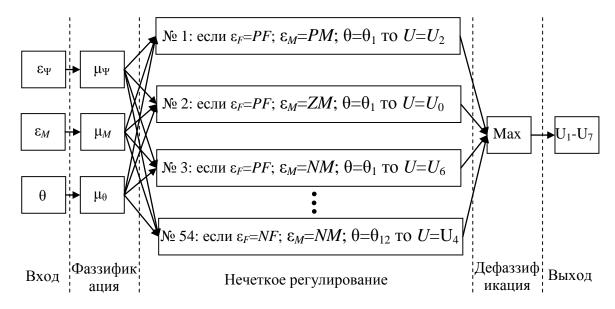


Рис. 6. Схема алгоритма фаззи-логического регулирования

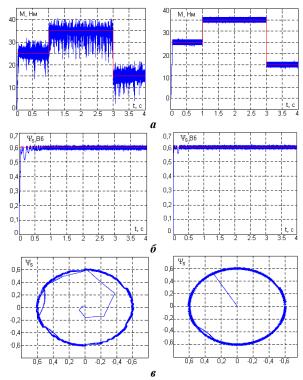


Рис. 7. Результаты моделирования электроприводов с DTC и FDTC

Список литературы

- 1. Takahashi I., Noguchi T. A new quick-response and high efficiency control strategy of an induction motor // IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 22, № 5, 1986, pp. 820-827.
- 2. Козярук А.Е., Рудаков В.В. Прямое управление моментом в электроприводе переменного тока машин и механизмов горного производства: учеб. пособие. СПб., 2008. 99с
- 3. Пронин М.В., Воронцов А.Г. Силовые полностью управляемые полупроводниковые преобразователи (моделирование и расчет) / под ред. Е.А. Крутякова. СПб., 2003. 172 с.
- 4. Toufouti R., Meziane S., Benalla H. Direct torque control strategy of in-duction motors // Acta Electrotechnica et Informatica. no. 1, vol. 7, 2007, pp. 1-7.
- 5. Baader U., Depenbrock M., Gierse G., Direct self control of inverter-fed-inducktion machine a basis for speed control without speed measurement // IEEE Trans. of Industry App., vol. 28, no. 3. May/June 1992, pp.581-588.
 - 6. Habetler T.G., Profumo F., Pastorelli M. Direct torque

- control of induction machines over a wide speed range // Conference Record of the 1992 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting. Vol.14. 9 Oct. 1992, pp.600-606.
- 7. Hu H., Li Y. D., Yi Z. Direct torque control of induction motor for railway traction in whole speed range // IECON 02, Ind.1 Elec. Soc., IEEE 2002 28th Annual Conference. Vol. 3. 5-8 Nov. 2002, pp.2161-2166.
- 8. Козярук А.Е., Васильев Б.Ю. Алгоритмы управления энергоэффективным высокооборотным электроприводом газоперекачивающего агрегата // Изв. вузов. Электромеханика. 2012. №3. С. 40-44.
- 9. Grabowski P.Z., Kazmierkowski M.P., Bose B.K, Blaabjerg F. A simple direct-torque neurofuzzy control of PWM-inverter-fed induction motor drive // IEEE Tran. on Ind. Elec. Vol. 47. Issue: 4. Aug. 2000, pp.863-870.
- 10. Grabowski P.Z. A simple direct-torque neuro-fuzzy control of pwm-inverter-fed induction motor drive // IEEE Trans. on ind. elec. Vol. 47. № 4. 2000, pp. 863–870.
- 11. Rodrigues M. Fuzzy logic torque ripple reduction by turn-off angle compensation for switched reluctances motors // IEEE Trans. On Ind. Elec. Vol.48. № 3. 2001, pp. 711–715.
- 12. Zidani F. Rachid N, Sa I. Direct torque control of induction motor with fuzzy minimization torque ripple // Journal of electrical engineering, vol. 56, № 7-8, 2005, pp. 183–188.
- 13. Youb L., Craciunescu A. Direct torque control of induction motors with fuzzy minimization torque ripple // Proceedings of the world congress on engineering and computer science. 2009. Vol II.
- 14. Chikhi A., Chikhi K. Induction motor direct torque control with fuzzy logic method // Jour. of elec. eng. & tech. 2009. Vol. 4, no. 2, pp. 234-239.
- 15. Васильев Б.Ю., Козярук А.Е. Повышение эффективности асинхронных электроприводов с прямым управление моментом // Вестник ЮУрГУ. Сер. «Энергетика». 2013. Т.13. №2. С. 75-84.
- 16. Minghua Fu, Longya Xu. A novel sensorless control technique for permanent magnet synchronous motor using digital signal processor // Proceedings of the IEEE 1997 Nat. Aeros. and Elec. Con. 1997. Vol. 1. 14-17 July 1997, pp.403-408.
- 17. Tang L. A new direct torque control strategy for flux and torque ripple reduction for induction motors drive by space vector modulation // Conf. Rec. IEEE-PESC'2001. 2001. Vol.2, pp. 1440–1445.
- 18. Malinowski M. Adaptive modulator for three-phase PWM rectifier/inverter // Proc. EPE-PEMC Conf. Kosice. 2000, pp. 1.35-1.41.
- 19. Malinowski M. Sensorless control strategies for threephase PWM rectifiers. PhD Thesis, Warsaw University of Technology. 2001.

INFORMATION IN ENGLISH

RELAY AND PULSE CONTROL SYSTEMS OF INDUCTION MOTOR ELECTRIC DRIVES: DIRECT AND FUZZY-LOGIC CONTROL

Vasiliev B.Yu., Kozjaruk A.E.

The systems of induction motor electric drives control of on basis of direct torque control algorithm and fuzzy-logic algorithm are considered. The structures of different algorithms systems are shown. The results of their use are analyzed

Keywords: electrical drive, induction motor, direct torque control, fuzzy-logic control.

REFERENCES

1. Takahashi I., Noguchi T. A new quick-response and high efficiency control strategy of an induction motor. IEEE Trans.

Ind. Appl. Vol. 22. No. 5. 1986, pp. 820-827.

- 2. Kozjaruk A.E., Pudakov V.V. *Pryamoe upravlenie momentom v elektroprivode peremennogo toka mashin i mehanizmov gornogo proizvodstva: uchebnoe posobie* [Direct torque control in AC electric drive of mining machines and equipment: a tutorial]. St. Petersburg, 2008. 99 p.
- 3. Pronin M.V., Vorontsov A.G. *Silovye polnostyu upravlyaemye poluprovodnikovye preobrazovateli (modelirovanie i raschet)* [Fully controlled power semiconductor converters (design and calculations)]; Under the editorship of E.A. Krutyakov. St. Petersburg, 2003. 172 p.

- 4. Toufouti R., Meziane S., Benalla H. Direct torque control strategy of induction motors. Acta Electrotechnica et Informatica. No. 1. Vol. 7. 2007, pp. 1-7.
- 5. Baader U., Depenbrock M., Gierse G., Direct self control of inverter-fed-inducktion machine a basis for speed control without speed measurement. IEEE Trans. of Industry App. Vol. 28. No. 3. May/June 1992, pp.581-588.
- 6. Habetler T.G., Profumo F., Pastorelli M. Direct torque control of induction machines over a wide speed range. Conference Record of the 1992 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting. Vol.14. 9 Oct. 1992, pp.600-606.
- 7. Hu H., Li Y. D., Yi Z. Direct torque control of induction motor for railway traction in whole speed range. IECON 02, Ind.1 Elec. Soc., IEEE 2002 28th Annual Conference. Vol. 3. 5-8 Nov. 2002, pp.2161-2166.
- 8. Kozjaruk A.E., Vasilyev B.Yu. Algoritmy upravleniya energoeffektivnym vysokooborotnym elektroprivodom gazoperekachivayuschego agregata [Control algorithms of energy-efficient high-speed electric drive of gas compressor unit]. *Izvestiya VUZov "Elektromehanika"* [Proceedings of universities "Electromechanics"]. 2012. №3, pp. 40-44.
- 9. Grabowski P.Z., Kazmierkowski M.P., Bose B.K, Blaabjerg F. A simple direct-torque neurofuzzy control of PWM-inverter-fed induction motor drive. IEEE Tran. on Ind. Elec., Vol. 47. Issue 4. Aug. 2000, pp.863 870.
- 10. Grabowski P.Z. A simple direct-torque neuro-fuzzy control of pwm-inverter-fed induction motor drive. IEEE Trans. on ind. elec. Vol. 47. № 4. 2000, pp. 863–870.
- 11. Rodrigues M. Fuzzy logic torque ripple reduction by turn-off angle compensation for switched reluctances motors. IEEE Trans. On Ind. Elec. Vol.48, N 3. 2001, pp. 711–715.

- 12. Zidani F. Rachid N, Sa I. Direct torque control of induction motor with fuzzy minimization torque ripple. Journal of electrical engineering. Vol. 56. № 7-8. 2005, pp. 183–188.
- 13. Youb L., Craciunescu A. Direct torque control of induction motors with fuzzy minimization torque ripple. Proceedings of the world congress on engineering and computer science. 2009. Vol II.
- 14. Chikhi A., Chikhi K. Induction motor direct torque control with fuzzy logic method. Jour. of elec. eng. & tech. 2009. Vol. 4. №. 2, pp. 234-239.
- 15. Vasilyev B.Yu., Kozjaruk A.E. Povyshenie effektivnosti asinhronnyh elektroprivodov s pryamym upravleniem momentum [Energy efficiency improvement of induction electric drives with direct torque control]. *Vestnik YuUrGY. Seriya "Energetika"* [Bulletin of the South Ural State University. "Power engineering"]. 2013. Vol. 13. №2, pp.75-84.
- 16. Minghua Fu, Longya Xu. A novel sensorless control technique for permanent magnet synchronous motor using digital signal processor. Proceedings of the IEEE 1997 Nat. Aeros. and Elec. Con. 1997. Vol. 1. 14-17 July 1997, pp.403-408.
- 17. Tang L. A new direct torque control strategy for flux and torque ripple reduction for induction motors drive by space vector modulation. Conf. Rec. IEEE-PESC'2001. Vol. 2, pp. 1440–1445, 2001.
- 18. Malinowski M. Adaptive modulator for three-phase PWM rectifier/inverter. Proc. EPE-PEMC Conf., Kosice, 2000, pp. 1.35-1.41.
- 19. Malinowski M. Sensorless control strategies for threephase PWM rectifiers. PhD Thesis, Warsaw University of Technology, 2001.

УДК 629.424.2:517.926

Дмитриенко В.Д., Заковоротный А.Ю.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОПТИМИЗАЦИИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ДИЗЕЛЬ-ПОЕЗДА

Рассматривается синтез линейной математической модели дизель-поезда с тяговым асинхронным приводом на основе динамической линеаризации модели объекта управления средствами геометрической теории управления. На основании последовательности инволютивных распределений получена линейная математическая модель в форме Бруновского, эквивалентной нелинейной модели.

Ключевые слова: линейная математическая модель, тяговый асинхронный привод, геометрическая теория управления, инволютивные распределения.

Введение

Тяговый подвижной состав является одним из основных потребителей электроэнергии и топлива. Поэтому снижение энергозатрат при перевозке пассажиров и грузов является одной из важнейших задач для железнодорожного транспорта. Один из путей уменьшения энергозатрат - это оптимизация управления тяговым подвижным составом. Вопросам оптимизации законов управления подвижным составом за последние десятилетия занимались многие ученые [1-10]. Однако в большинстве этих исследований использовались модели, описываемые системами обыкновенных нелинейных дифференциальных уравнений 2-3 порядка, а для асинхронного тягового привода – пятого порядка. Использование таких упрощенных моделей, с одной стороны, позволило решить ряд задач оптимального управления, но, с другой стороны, слишком упрощенное описание объекта управления не позволяет исследовать целый ряд процессов, влияющих на энергетиче-

ские затраты тягового подвижного состава. Кроме того, даже при упрощенном описании тягового асинхронного привода системой нелинейных дифференциальных уравнений возникают серьезные трудности при синтезе оптимальных регуляторов с помощью большинства известных методов теории оптимального управления [11, 12]. В связи с этим в работах [10, 13] была предпринята попытка получить удобный математический инструмент для решения задач управления тяговым приводом с помощью геометрической теории управления. При этом удалось получить законы оптимального управления для объектов, которые описывались системами обыкновенных нелинейных дифференциальных уравнений 5-6 порядка. Однако при этом модель привода имела только один эквивалентный тяговый двигатель, что существенно ограничило возможности модели для поиска оптимальных законов управления реальным приводом.

Исследование параллельной работы двигателей,

буксования, юза требует в математической модели не менее двух двигателей. Использование известных методов оптимального управления для решения задач оптимизации функционирования подобных объектов вызывает серьезные трудности. В связи с этим выглядит перспективным привлечь для решения задач оптимального управления рассматриваемыми объектами методы геометрической теории управления, использующие динамическую линеаризацию исходной нелинейной модели. Для поиска оптимальных законов управления реальным приводом с учетом параллельной работы электродвигателей необходимо уточнение используемых моделей (получение систем обыкновенных дифференциальных уравнений десятого и более высоких порядков) и разработка метода динамической линеаризации уточненных моделей (получение линейных моделей объекта управления в форме Бруновского), а также поиск оптимальных законов управления с помощью этих моделей.

Целью исследования является синтез линейной математической модели дизель-поезда с тяговым асинхронным приводом на основе динамической линеаризации модели объекта управления средствами геометрической теории управления.

Движение дизель-поезда в режиме тяги и в режиме перехода от тяги к буксованию в первом приближении может быть описано следующей системой обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\frac{dS}{dt} = k_1 V;$$

$$\frac{dV}{dt} = k_2 (\Psi_1^1 \Psi_4^1 - \Psi_2^1 \Psi_3^1 + \Psi_1^2 \Psi_4^2 - \Psi_2^2 \Psi_3^2) - (1)$$

$$-a_{20} - a_{21} V - a_{22} V^2;$$

$$\begin{split} \frac{d\Psi_{1}^{q}}{dt} &= a_{31}^{q}\Psi_{1}^{q} + a_{33}^{q}\Psi_{3}^{q} + U_{1}^{q}, \\ \frac{d\Psi_{2}^{q}}{dt} &= a_{42}^{q}\Psi_{2}^{q} + a_{44}^{q}\Psi_{4}^{q} + U_{2}^{q}, q = 1, 2; \\ \frac{d\Psi_{3}^{q}}{dt} &= a_{51}^{q}\Psi_{1}^{q} + a_{53}^{q}\Psi_{3}^{q} + a_{542}^{q}\Psi_{4}^{q}\Omega_{q}, q = 1, 2; \\ \frac{d\Psi_{4}^{q}}{dt} &= a_{62}^{q}\Psi_{2}^{q} + a_{64}^{q}\Psi_{4}^{q} + a_{632}^{q}\Psi_{3}^{q}\Omega_{q}, q = 1, 2. \end{split}$$

где S — расстояние, отсчитываемое от начала перегона; t — время; $k_1, k_2, a_{20}, a_{21}, a_{22}, a_{31}, a_{33}, \ldots, a_{64}, a_{632}$ — постоянные коэффициенты, определяемые параметрами привода; V — скорость движения состава; Ψ_1^q, Ψ_3^q (q=1,2) — потокосцепления по оси u первого и второго двигателей; Ψ_2^q, Ψ_4^q (q=1,2) — потокосцепления по оси v первого и второго двигателей; Ω_1, Ω_2 — угловые скорости вращения роторов соответственно первого и второго асинхронных двигателей; $\Omega_q = V/(\pi D_q)$; D_q (q=1,2) — диаметр q-й колесной пары; U_1^q, U_2^q (q=1,2) — питающие напряжения, при гармоническом напряжении:

$$U_1^q = A_a \cos(\Omega_a t); \ U_2^q = A_a \sin(\Omega_a t),$$

где $A_q,\ \Omega_q\ (q=1,2)$ — соответственно амплитуды и частоты питающих напряжений первого и второго тяговых двигателей.

Обозначив $x_1 = S$; $x_2 = V$; $x_3 = \Psi_1^1$ $x_3 = \Psi_1^1$; $x_4 = \Psi_3^1$; $x_5 = \Psi_4^1$; $x_6 = \Psi_2^1$; $x_7 = \Psi_3^2$; $x_8 = \Psi_1^2$; $x_9 = \Psi_4^2$; $x_{10} = \Psi_2^2$, из системы уравнений (1) получим следующую модель, описывающую движение дизель-поезда:

$$\begin{split} \frac{dx_1}{dt} &= a_{12}x_2; \ \frac{dx_2}{dt} = a_{235}x_3x_5 - a_{246}x_4x_6 + a_{289}x_8x_9 - a_{2,7,10}x_7x_{10} - a_{20} - a_{21}x_2 - a_{22}x_2^2; \\ \frac{dx_3}{dt} &= a_{33}x_3 + a_{34}x_4 + U_1^1; \quad \frac{dx_4}{dt} = a_{43}x_3 + a_{44}x_4 + a_{425}x_2x_5; \\ \frac{dx_5}{dt} &= a_{55}x_5 + a_{56}x_6 + a_{524}x_2x_4; \quad \frac{dx_6}{dt} = a_{65}x_5 + a_{66}x_6 + U_2^1; \\ \frac{dx_7}{dt} &= a_{77}x_7 + a_{78}x_8 + a_{729}x_2x_9; \quad \frac{dx_8}{dt} = a_{87}x_7 + a_{88}x_8 + U_1^2; \\ \frac{dx_9}{dt} &= a_{99}x_9 + a_{9,10}x_{10} + a_{927}x_2x_7; \quad \frac{dx_{10}}{dt} = a_{10,9}x_9 + a_{10,10}x_{10} + U_2^2, \\ \end{split}$$

$$\text{TME} \quad a_{12} &= k_1; \quad a_{235} = a_{246} = a_{289} = a_{2,7,10} = k_2; \quad a_{33} = a_{31}^1; \quad a_{34} = a_{33}^1; \quad a_{43} = a_{51}^1; \quad a_{44} = a_{53}^1; \quad a_{425} = a_{542}^1; \\ a_{55} &= a_{64}^1; \quad a_{56} = a_{62}^1; \quad a_{524} = a_{632}^1/(\pi D_1); \quad a_{65} = a_{44}^1; \quad a_{66} = a_{42}^1; \quad a_{77} = a_{53}^2; \quad a_{78} = a_{51}^2; \quad a_{729} = a_{542}^2/(\pi D_2); \\ a_{87} &= a_{33}^2; \quad a_{88} = a_{31}^2; \quad a_{99} = a_{64}^2; \quad a_{910} = a_{69}^2; \quad a_{927} = a_{637}^2/(\pi D_2); \quad a_{109} = a_{44}^1; \quad a_{1010} = a_{42}^2. \end{split}$$

С системой дифференциальных уравнений (2) связаны следующие векторные поля:

Система уравнений (2) может быть преобразована к форме Бруновского только в случае, если инволютивны распределения \boldsymbol{M}^0 , \boldsymbol{M}^1 , \boldsymbol{M}^2 для этой системы. Поскольку векторные поля \boldsymbol{Y}_i ($i=\overline{1,4}$) постоянны, то распределение $\boldsymbol{M}^0=\operatorname{span}\{\boldsymbol{Y}_1,\boldsymbol{Y}_2,\boldsymbol{Y}_3,\boldsymbol{Y}_4\}$ инволютивно и размерность распределения $\dim \boldsymbol{M}^0=4$ (здесь $\operatorname{span}\{\boldsymbol{Y}_1,\boldsymbol{Y}_2,\boldsymbol{Y}_3,\boldsymbol{Y}_4\}$ — линейная оболочка векторов $\boldsymbol{Y}_1,\boldsymbol{Y}_2,\boldsymbol{Y}_3,\boldsymbol{Y}_4$).

Проанализируем распределение M^1 = span{ $Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, L_xY_1, L_xY_2, L_xY_3, L_xY_4$ }, где L_xY_k ($k=\overline{1,4}$) — производные Ли вдоль векторного поля X векторных полей Y_k ($k=\overline{1,4}$). Производные Ли вычисляются следующим образом:

$$L_{X}Y_{k} = [X, Y_{k}] = \frac{\partial Y_{k}}{\partial x} X - \frac{\partial X}{\partial x} Y_{k} = -\frac{\partial X}{\partial x} Y_{k} = \frac{\partial X}{\partial x} Y_{k}$$

Непосредственная проверка скобок Ли [X_i, X_j], X_{i}, X_{i} – векторные поля из множества $\{Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, L_YY_1, L_YY_2, L_YY_3, L_YY_4\}$ и ранга матриц $B_1 = ||Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, L_YY_1, L_YY_2, L_YY_3, L_YY_4, [X_i, X_i]||$ зывает, что распределение M^1 не является инволютивным. однако все его подраспределения $M_k^1 = \text{span}\{Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, L_xY_k\}, k = 1, 4$ являются инволютивными. Поэтому дополнительные переменные, или интеграторы, можно вводить в любой канал управления. Однако введение одного, двух или трех интеграторов в любые каналы не позволяет решить проблему получения инволютивного распределения ${\it M}^{\scriptscriptstyle 1}$ для расширенной системы. Распределение ${\it M}^{\scriptscriptstyle 1}$ становится инволютивным только при введении одного интегратора в каждый канал объекта управления.

Для расширенной модели объекта управления введем следующие обозначения:

$$y_{i} = x_{i}, i = \overline{1, 3}; y_{4} = U_{1}^{1};$$

$$U_{1} = \frac{dy_{4}}{dt};$$

$$y_{5} = x_{4}; y_{6} = x_{5}; y_{7} = x_{6}; y_{8} = U_{2}^{1};$$

$$U_{2} = \frac{dy_{8}}{dt};$$

$$y_{9} = x_{7}; y_{10} = x_{8}; y_{11} = U_{1}^{2};$$

$$U_{3} = \frac{dy_{11}}{dt};$$

$$y_{12} = x_{9}; y_{13} = x_{10}; y_{14} = U_{2}^{2};$$

$$U_{4} = \frac{dy_{14}}{dt}.$$

В этих обозначениях расширенная модель объекта записывается следующим образом:

$$\begin{split} \frac{dy_1}{dt} &= \phi_1 = a_{12}y_2; \\ \frac{dy_2}{dt} &= \phi_2 = a_{235}y_3y_6 - a_{246}y_5y_7 + a_{289}y_{10}y_{12} - a_{2,7,10}y_9y_{13} - a_{20} - a_{21}y_2 - a_{22}y_2^2; \\ \frac{dy_3}{dt} &= \phi_3 = a_{33}y_3 + a_{34}y_5 + y_4; & \frac{dy_9}{dt} &= \phi_9 = a_{77}y_9 + a_{78}y_{10} + a_{729}y_2y_{12}; \\ \frac{dy_4}{dt} &= U_1; & \phi_4 = 0; & \frac{dy_{10}}{dt} &= \phi_{10} = a_{87}y_9 + a_{88}y_{10} + y_{11}; \\ \frac{dy_5}{dt} &= \phi_5 = a_{43}y_3 + a_{44}y_5 + a_{425}y_2y_6; & \frac{dy_{11}}{dt} &= U_3; & \phi_{11} = 0; \\ \frac{dy_6}{dt} &= \phi_6 = a_{55}y_6 + a_{56}y_7 + a_{524}y_2y_5; & \frac{dy_{12}}{dt} &= \phi_{12} = a_{99}y_{12} + a_{9,10}y_{13} + a_{927}y_2y_9; \\ \frac{dy_7}{dt} &= \phi_7 = a_{65}y_6 + a_{66}y_7 + y_8; & \frac{dy_{13}}{dt} &= \phi_{13} = a_{10,9}y_{12} + a_{10,10}y_{13} + y_{14}; \\ \frac{dy_8}{dt} &= U_2; & \phi_8 = 0; & \frac{dy_{14}}{dt} &= U_4; & \phi_{14} = 0. \end{split}$$

С этой моделью объекта управления связаны следующие векторные поля:

Поскольку вектора \boldsymbol{Y}_1^* , \boldsymbol{Y}_2^* , \boldsymbol{Y}_3^* , \boldsymbol{Y}_4^* постоянны, то распределение $\boldsymbol{M}^{0^*}=\mathrm{span}\{\boldsymbol{Y}_1^*$, \boldsymbol{Y}_2^* , \boldsymbol{Y}_3^* , $\boldsymbol{Y}_4^*\}$ инволютивно.

Так как производные $\underline{\Pi}_{u}$ вдоль векторного поля Y векторных полей Y_{k}^{*} ($k=\overline{1,4}$) являются постоянными векторами:

то распределение M^{1*} для расширенной системы является инволютивным.

Проверка инволютивности распределения $\boldsymbol{M}^{2*} = \operatorname{span}\{\boldsymbol{Y}_{1}^{*},\boldsymbol{Y}_{2}^{*},\boldsymbol{Y}_{3}^{*},\boldsymbol{Y}_{4}^{*},\boldsymbol{L}_{y}\boldsymbol{Y}_{1}^{*},\boldsymbol{L}_{y}\boldsymbol{Y}_{2}^{*},\boldsymbol{L}_{y}\boldsymbol{Y}_{3}^{*},\boldsymbol{L}_{y}\boldsymbol{Y}_{4}^{*},\boldsymbol{L}_{y}^{2}\boldsymbol{Y}_{1}^{*},$ $\boldsymbol{L}_{y}^{2}\boldsymbol{Y}_{2}^{*},\boldsymbol{L}_{y}^{2}\boldsymbol{Y}_{3}^{*},\boldsymbol{L}_{y}\boldsymbol{Y}_{4}^{*},\boldsymbol{L}_{y}^{2}\boldsymbol{Y}_{1}^{*},$ $\boldsymbol{L}_{y}^{2}\boldsymbol{Y}_{2}^{*},\boldsymbol{L}_{y}^{2}\boldsymbol{Y}_{3}^{*},\boldsymbol{L}_{y}^{2}\boldsymbol{Y}_{3}^{*},\boldsymbol{L}_{y}^{2}\boldsymbol{Y}_{4}^{*}\}$, где $\boldsymbol{L}_{y}^{2}\boldsymbol{Y}_{k}$ $(k=\overline{1,4})$ – производные Ли второго порядка, показывает, что оно не является инволютивным.

Однако инволютивными являются подраспределения распределения ${\pmb M}^{2^*}$:

$$\begin{split} \boldsymbol{M}_{1}^{2*} &= \operatorname{span}\{\boldsymbol{Y}_{1}^{*}, \boldsymbol{Y}_{2}^{*}, \boldsymbol{Y}_{3}^{*}, \boldsymbol{Y}_{4}^{*}, \boldsymbol{L}_{\boldsymbol{Y}}\boldsymbol{Y}_{1}^{*}, \boldsymbol{L}_{\boldsymbol{Y}}\boldsymbol{Y}_{2}^{*}, \boldsymbol{L}_{\boldsymbol{Y}}\boldsymbol{Y}_{3}^{*}, \\ & \boldsymbol{L}_{\boldsymbol{Y}}\boldsymbol{Y}_{4}^{*}, \boldsymbol{L}_{\boldsymbol{Y}}^{2}\boldsymbol{Y}_{1}^{*}\}; \\ \boldsymbol{M}_{2}^{2*} &= \operatorname{span}\{\boldsymbol{Y}_{1}^{*}, \boldsymbol{Y}_{2}^{*}, \boldsymbol{Y}_{3}^{*}, \boldsymbol{Y}_{4}^{*}, \boldsymbol{L}_{\boldsymbol{Y}}\boldsymbol{Y}_{1}^{*}, \boldsymbol{L}_{\boldsymbol{Y}}\boldsymbol{Y}_{2}^{*}, \boldsymbol{L}_{\boldsymbol{Y}}\boldsymbol{Y}_{3}^{*}, \\ & \boldsymbol{L}_{\boldsymbol{Y}}\boldsymbol{Y}_{4}^{*}, \boldsymbol{L}_{\boldsymbol{Y}}^{2}\boldsymbol{Y}_{2}^{*}\}; \\ \boldsymbol{M}_{3}^{2*} &= \operatorname{span}\{\boldsymbol{Y}_{1}^{*}, \boldsymbol{Y}_{2}^{*}, \boldsymbol{Y}_{3}^{*}, \boldsymbol{Y}_{4}^{*}, \boldsymbol{L}_{\boldsymbol{Y}}\boldsymbol{Y}_{1}^{*}, \boldsymbol{L}_{\boldsymbol{Y}}\boldsymbol{Y}_{2}^{*}, \boldsymbol{L}_{\boldsymbol{Y}}\boldsymbol{Y}_{3}^{*}, \\ & \boldsymbol{L}_{\boldsymbol{Y}}\boldsymbol{Y}_{4}^{*}, \boldsymbol{L}_{\boldsymbol{Y}}^{2}\boldsymbol{Y}_{3}^{*}\}; \\ \boldsymbol{M}_{4}^{2*} &= \operatorname{span}\{\boldsymbol{Y}_{1}^{*}, \boldsymbol{Y}_{2}^{*}, \boldsymbol{Y}_{3}^{*}, \boldsymbol{Y}_{4}^{*}, \boldsymbol{L}_{\boldsymbol{Y}}\boldsymbol{Y}_{1}^{*}, \boldsymbol{L}_{\boldsymbol{Y}}\boldsymbol{Y}_{2}^{*}, \boldsymbol{L}_{\boldsymbol{Y}}\boldsymbol{Y}_{3}^{*}, \\ & \boldsymbol{L}_{\boldsymbol{Y}}\boldsymbol{Y}_{4}^{*}, \boldsymbol{L}_{\boldsymbol{Y}}^{2}\boldsymbol{Y}_{4}^{*}\}. \end{split}$$

Это оказывается достаточным для осуществления динамической линеаризации и получения системы линейных дифференциальных уравнений в форме Бруновского. На основании теории о линейных эквивалентах для нелинейных аффинных систем с т уравнениями получим математическую модель объекта управления в форме Бруновского в пространстве «входсостояние»:

$$\frac{dz_{i}}{dt} = z_{i+1}, \ i = \overline{1,13}, \ i \neq 4, \ 8, \ 11;$$

$$\frac{dz_{4}}{dt} = v_{1}; \ \frac{dz_{8}}{dt} = v_{2}; \ \frac{dz_{11}}{dt} = v_{3}; \ \frac{dz_{14}}{dt} = v_{4},$$
 где v_{i} ($j = \overline{1,4}$) – управления.

Поскольку модель объекта в форме Бруновского имеет четыре клетки, то необходимо определить четы-

ре функции $T_j(y)$ ($j=\overline{1,4}$), преобразующие переменные расширенной модели объекта управления в переменные модели в форме Бруновского:

$$z_1 = T_1(y); \quad z_5 = T_2(y); \quad z_9 = T_3(y); \quad z_{12} = T_4(y).$$

Методика определения этих функций известна, в

данном случае они являются однокомпонентными составляющими вектора $\mathbf{y}=(y_1,y_2,...,y_{14})$. Из этих функций путем последовательного дифференцирования вдоль векторного поля $\mathbf{Y}^*=\mathbf{Y}+\mathbf{U}_1\mathbf{Y}_1^*+\mathbf{U}_2\mathbf{Y}_2^*+\mathbf{U}_3\mathbf{Y}_3^*+\mathbf{U}_4\mathbf{Y}_4^*$ можно получить выражения для определения соответственно $\mathbf{z}_2,\mathbf{z}_3,\mathbf{z}_4$ (из функции $T_1(\mathbf{y})$), $\mathbf{z}_6,\mathbf{z}_7,\mathbf{z}_8$ (из функции $T_2(\mathbf{y})$), $\mathbf{z}_{10},\mathbf{z}_{11}$ (из функции $T_3(\mathbf{y})$) и $\mathbf{z}_{13},\mathbf{z}_{14}$ (из функции $T_4(\mathbf{y})$). В качестве примера рассмотрим получение зависимостей для определения $\mathbf{z}_2,\mathbf{z}_3,\mathbf{z}_4$ с помощью функции $T_1(\mathbf{y})$. Для исследуемого объекта управления имеем: $T_1(\mathbf{y})=\mathbf{y}_1$, поэтому $\mathbf{z}_1=\mathbf{y}_1$. Дифференцируя функцию $T_1(\mathbf{y})$ вдоль векторного поля \mathbf{Y}^* и учитывая, что $\mathbf{z}_2,\mathbf{z}_3$ и их производные не зависят от управлений, получим:

$$z_{2} = \frac{dz_{1}}{dt} = L_{Y} T_{1}(y) =$$

$$= L_{Y} T_{1}(y) = \sum_{i=1}^{14} \frac{\partial T_{1}(y)}{\partial y_{i}} \varphi_{i} = a_{12} y_{2};$$

$$z_{3} = \frac{dz_{2}}{dt} = L_{Y} (L_{Y} T_{1}(y)) =$$

$$= L_{Y} (a_{12} y_{2}) = \sum_{i=1}^{14} \frac{\partial (L_{Y} T_{1}(y))}{\partial y_{i}} \varphi_{i} = a_{12} \varphi_{2} =$$

$$= a_{12} (a_{235} y_{3} y_{6} - a_{246} y_{5} y_{7} + a_{289} y_{10} y_{12} -$$

$$- a_{2,7,10} y_{9} y_{13} - a_{20} - a_{21} y_{2} - a_{22} y_{2}^{2});$$

$$z_{4} = \frac{dz_{3}}{dt} = L_{Y} (L_{Y}^{2} T_{1}(y)) =$$

$$= L_{Y} (a_{12} \varphi_{2}) = \sum_{i=1}^{14} \frac{\partial (L_{Y} (a_{12} \varphi_{2}))}{\partial y_{i}} \varphi_{i} =$$

$$= a_{12} [(-a_{220} - 2a_{222} y_{2}) \varphi_{2} + a_{235} y_{6} \varphi_{3} -$$

$$- a_{246} y_{7} \varphi_{5} + a_{235} y_{3} \varphi_{6} - a_{246} y_{5} \varphi_{7} -$$

$$- a_{2,7,10} y_{13} \varphi_{9} + a_{289} y_{12} \varphi_{10} +$$

$$+ a_{289} y_{10} \varphi_{12} - a_{2,7,10} y_{9} \varphi_{13}].$$

Аналогичным образом могут быть получены соотношения для определения остальных переменных модели Бруновского. Параллельное моделирование объекта управления в различных режимах с помощью исходной математической модели и модели в форме Бруновского показали полное совпадение процессов в обеих моделях при разгонах и движении состава по перегонам.

Заключение

Таким образом, впервые средствами геометрической теории управления получена работоспособная линейная математическая модель в канонической форме Бруновского, которая позволяет исследовать и оптимизировать процессы управления дизель-поездом в режимах разгона и ведения состава по перегонам с известным профилем пути с учетом параллельной работы двигателей.

Список литературы

- 1. Ковальский А.Н. Синтез системы автоматического управления поездом метрополитена (САУ-М) и ее модернизация // Труды МИИЖТ. Вып. 276. М.: МИИЖТ, 1968. С. 3-13
- 2. Петров Ю.П. Оптимальное управление движением транспортных средств. Л.: Энергия, 1969. 96 с.
- 3. Шинская Ю.В. Расчет оптимальных режимов ведения поездов метрополитена методом динамического прогнозирования // Труды ЛИИЖТ. Вып. 315. Л.: ЛИИЖТ, 1970. С. 18-23.
- 4. Легостаев Е.Н., Исаев И.П., Ковальский А.Н. Автоматизация управления движением поездов на метрополитенах. М.: Транспорт, 1976. 96 с.
- 5. Кудрявцев Я.Б. Принцип максимума и оптимальное управление движением поезда // Вісник ВНИИЖТ. 1977. № 1. С. 57-61.
- 6. Костромин А.М. Оптимизация управления локомотивом. М.: Транспорт, 1979. 119 с.
- 7. Моделирование и оптимизация систем управления и контроля локомотивов / В.И. Носков, В.Д. Дмитриенко, Н.И. Заполовский, С.Ю. Леонов. Харьков: ХФИ «Транспорт Украины», 2003. 248 с.
- 8. Дмитриенко В.Д., Носков В.И., Липчанский М.В. Математическое моделирование и оптимизация системы управления тяговым электроприводом // Системи обробки інформації. Харків: ХУПС. 2004. Вип. 11 (39).С. 55-62.
- 9. Определение оптимальных режимов ведения дизельпоезда с использованием нейронных сетей АРТ / В.Д. Дмитриенко, В.И. Носков, М.В. Липчанский, А.Ю. Заковоротный // Вісник НТУ "ХПІ". Харків: НТУ "ХПІ", 2004. № 46. С. 90-96.
- 10. Дмитриенко В.Д., Заковоротный А.Ю. Синтез оптимальных законов управления тяговым электроприводом методами дифференциальной геометрии и принципа максимума // Системи обробки інформації. Харків: ХУПС, 2009. Вип. 4 (78). С. 42-51.
- 11. Методы классической и современной теории автоматического управления: учебник в 5 т. Т.4: Теория оптимизации систем автоматического управления; под ред. К.А. Пупкова и И.Д. Егунова. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. 744 с.
- 12. Методы классической и современной теории автоматического управления: учебник в 5 т. Т. 5: Методы современной теории управления; под ред. К.А. Пупкова, Н.Д. Егупова. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. 784 с.
- 13. Дмитриенко В.Д., Заковоротный А.Ю., Мезенцев Н.В. Синтез оптимальных законов управления движением дизель-поезда с помощью математической модели в форме Бруновского // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. Харків: УкрДАЗТ, 2010. Вип. 5-6. С. 7–13.
- 14. Краснощёченко В.И., Грищенко А.П. Нелинейные системы: геометрический метод анализа и синтеза. М.: Издво МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2005. 520 с.
- 15. Qiang Lu, Yuangzhang Sun, Shengwei Mei Nonlinear control systems and power system dynamics. 2001. 376 p.

INFORMATION IN ENGLISH

MATHEMATICAL MODEL FOR RESEARCH AND OPTIMISATION OF DIESEL TRAIN ELECTRIC DRIVE

Dmitrienko V.D., Zakovorotnyj A.Yu.

A synthesis of linear mathematical model of a diesel train with an asynchronous traction drive based on the dynamic object of model linearization control by means of geometric control theory is considered. On the basis of the sequence of involutive distributions the authors obtained the linear mathematical model in the form of Brunovski nonlinear model.

Keywords: linear mathematical model, asynchronous traction drive, geometric control theory, involutive distributions.

REFERENCES

- 1. Kovalskij A.N. Sintez sistemi avtomaticheskogo upravleniya poezdom metropolitena (SAU-M) i eyo modernizatsiya [Synthesis of subway train automatic control (SAU-M) and its modernization] // Proceedings of MIIZhT Conference. Issue 276. M.: MIIZhT, 1968, pp. 3-13.
- 2. Petrov Ju.P. Optimalnoe upravlenie dvizheniem transportnyh sredstv [Optimal control of vehicles movement]. L.: Energiya, 1969. 96 p.
- 3. Shinskaja Ju.V. Raschet optimalnyh rezhimov vedeniya poezdov metropolitena metodom dinamicheskogo prognozirovaniya [Calculation of optimal mode of conducting underground trains using dynamic forecasting]. Proceedings of LIIZhT Conference. Issue 315. L.: LIIZhT, 1970, pp. 18-23.
- 4. Legostaev E.N., Isaev I.P., Kovalskij A.N. Avtomatizatsiya upravleniya dvizheniyem poezdov na metropolitenah [Automation of train control in subways] M.: Transport, 1976. 96 p.
- 5. Kudrjavtsev Ja.B. Printsip maksimuma i optimalnoe upravlenie dvizheniem poezda [Maximum principle and optimal train control]. Bulletin of VNIIZhT. 1977. no. 1, pp. 57-61.
- 6. Kostromin A.M. Optimizatsiya upravleniya lokomotivom [Optimization of locomotive control]. M.: Transport, 1979. 119 p.
- 7. Noskov V.I., Dmitrienko V.D., Zapolovskij N.I., Leonov S.Ju. *Modelirovanie i optimizatsiya sistem upravleniya i kontrolya lokomotivov* [Simulation and optimization of locomotive management and control systems]. Harkiv: HFI "Transport Ukrainy", 2003. 248 p.
- 8. Dmitrienko V.D., Noskov V.I., Lipchanskij M.V. Matimaticheskoye modelirovanie i optimizatsiya sistemy

upravleniya tyagovym elektroprivodom [Mathematical modeling and optimization of traction electric drive control]. Information processing systems. Harkiv: HUPS. 2004. Issue 11(39), pp. 55–62.

- 9. Dmitrienko V.D., Noskov V.I., Lipchanskij M.V., Zakovorotnyj A.Ju. Opredelenie optimalnyh rezhimov vedeniya dizel-poezda s ispolzovaniem neironnyh setey ART [Determination of optimal modes of diesel train operation using ART neural networks]. Bulletin of NTU "HPI". Harkiv: NTU "HPI". 2004. No. 46, pp. 90- 96.
- 10. Dmitrienko V.D., Zakovorotnyj A.Ju. Sintez optimalnyh zakonov upravleniya tyagovym elektroprivodom metodami differentsialnoy geometrii i printsipa maksimuma [Synthesis of optimal laws of traction electric drive control using methods of differential geometry and the maximum principle]. Information processing systems. Harkiv: HUPS. 2009. Issue 4(78), pp. 42–51.
- 11. Metody klassicheskoi i sovremennoi teorii avtomaticheskogo upravleniya [Methods of classical and modern automatic control theory]: Tutorial in 5 volumes. Vol. 4: Optimization Theory of Automatic Control Systems; edited by K.A. Pupkova and I.D. Egunova. M.: Bauman MGTU, 2004. 744 p.
- 12. Metody klassicheskoi i sovremennoi teorii avtomaticheskogo upravleniya [Methods of classical and modern automatic control theory]: Tutorial in 5 volumes. Vol. 5: Methods of modern control theory; edited by K.A. Pupkova, N.D. Egupova. M.: Bauman MGTU, 2004. 784 p.
- 13. Dmitrienko V.D., Zakovorotnyj A.Ju., Mezentsev N.V. Sintez optimalnyh zakonov upravleniya dvizheniem dizel-poezda s pomoschyu matematicheskoi modeli v forme Brunovskogo [Synthesis of optimal control laws of diesel train movement using mathematical model in the form of Brunovsky]. Information management system for rail transport. Harkiv: UkrDAZT. 2010. Issues 5-6, pp. 7–13.
- 14. Krasnoshhjochenko V.I., Grishhenko A.P. *Nelineinye sistemy: geometricheskii metod analiza i sinteza* [Nonlinear systems: geometry method of analysis and synthesis]. Moscow: Bauman MGTU, 2005. 520 p.
- 15. Qiang Lu, Yuangzhang Sun, Shengwei Mei Nonlinear control systems and power system dynamics. 2001. 376 p.

УДК 621.313.333

Мещеряков В.Н., Диденко Е.Е.

РЕГУЛИРОВАНИЕ НАТЯЖЕНИЯ ПОЛОСЫ В ЧИСТОВОЙ ГРУППЕ НЕПРЕРЫВНОГО ШИРОКОПОЛОСНОГО СТАНА ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ ПО КОСВЕННОМУ ПРИНЦИПУ

В статье содержится общее описание работы системы автоматического регулирования натяжения (САРН) чистовой группы непрерывного широкополосного стана горячей прокатки, построенной на основе «безразличных» петледержателей с косвенным измерением натяжения. Также сравнивается прокатка на примере одного межклетевого промежутка с применением петледержателей и без.

Ключевые слова: система автоматического регулирования натяжения (САРН), петледержатель, натяжение полосы, регулятор петли.

При прокатке в непрерывных листовых станах полоса на участке между клетями находится в упругонапряжённом состоянии, что является одной из главных особенностей технологического процесса. Основ-

ная причина, определяющая необходимость прокатки с натяжением, заключается в том, что без натяжения полосы процесс прокатки в непрерывном листовом стане осуществить невозможно, так как при прокатке

без натяжения полоса теряет устойчивость в валках, что приводит к аварийному режиму. В то же время чрезмерное натяжение полосы в промежутке между клетями приводит к «утяжкам» металла и потере качества проката [1, 2].

Представим условно (рис. 1), что имеются две клети непрерывного стана, прокатывающие раздельно полосу, причём толщина полосы, выходящей из первой клети равна h_i , а скорость выхода V_i , толщина полосы, входящей во вторую клеть, равна H_{i+1} , а скорость входа металла во вторую клеть V_{i+1} . Если режимы подобрать так, чтобы $h_i = H_{i+1}$, а $V_i = V_{i+1}$ и мысленно соединить полосу, выходящую из первой клети с полосой, входящей во вторую клеть, то в полосе на участке между клетями не возникает каких-либо напряжений. Если теперь увеличить скорость вращения валков клети i+1, воздействуя соответствующим образом на её привод, то количество металла, входящего во вторую клеть, будет больше, чем количество металла, выходящего из первой клети, так как скорость \vec{V}_{i+1} стала больше скорости V_i . Это приведёт к возникновению напряжений растяжения в полосе на участке между клетями.

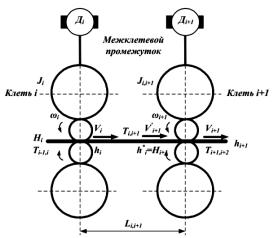


Рис. 1. Структура межклетевого промежутка

На основе свойств стана, определяемых зависимостью опережения металла от натяжения и упругостью клетей, наступит новый установившийся режим, при котором скорость $V_i = V_{i+1}$, но при другом их абсолютном значении, а на участке полосы между клетями будет действовать постоянное натяжение $T_{i,i+1}$.

Рассмотрим пример прокатки стальной полосы марки 08Ю в межклетевом промежутке, состоящим из двух клетей с основными параметрами прокатки: длина межклетевого промежутка $L_{i,i+1} = 6$ м; радиус рабочих валков R = 0.4 м; радиус опорных валков $R_{\rm on} = 0.8 \, {\rm M};$ толщина прокатываемого в межклетевом промежутке металла $h_i = 24,57$ мм; ширина прокатываемого металла B = 1,6 м; средняя температура металла t = 850°C. Кроме этого, примем, что прокатка ведётся без ускорения, т.е. рассмотрим захват металла клетями и прокатку на «заправочной» скорости клетей. Допустим, заданное удельное натяжение $\sigma_{i,i+1} = 3,166 \text{ M}$ Па. Также примем, что заправочная линейная скорость рабочих валков i-й клети $V_i = 2,64$ м/с. С помощью математического моделирования, данных параметров прокатки и методике, изложенной в [3], получим, что для обеспечения вышеуказанного заданного натяжения линейная скорость рабочих валков клети i+1 должна быть равна $V_{i+1}=3,93$ м/с.

На **рис. 2** время t1 — разгон клетей до своих заправочных скоростей, t2 — вход металла в клеть i, t3 — вход металла в клеть i+1 (появление натяжения), t4 — изменение скорости клети i+1, t5 — изменение скорости клети i.



Рис. 2. Графики удельного натяжения и скоростей двух смежных клетей при прокатке без ускорения и без петледержателей

Из рис. 2 видно, что возмущения в электромеханической системе двух клетей, связанных прокатываемой полосой (в частности, изменение скоростей приводов клетей), влияют на натяжение полосы металла и отклонения его от заданного. То есть для регулирования натяжения необходимо воздействовать на скорости смежных клетей соответствующим образом для поддержания заданного натяжения — в этом заключается работа САРН.

Системы регулирования натяжения за период своего развития прошли ряд этапов. Одно время на непрерывных широкополосных станах применялись «моментные» петледержатели, а прокатка производилась с «силовой» петлёй [2]. В таком режиме петледержатель используется в качестве индикатора натяжения. Величиной, индицирующей межклетевое натяжение, является угол подъёма петледержателя. Большому углу подъёма петледержателя соответствует малое натяжение, и наоборот. В данном режиме регулирование натяжения в автоматическом режиме не производится. Натяжение регулируется вручную оператором прокатки путём коррекции скорости клетей с пульта управления. Точность регулирования натяжения очень низкая (рис. 3). На рис. 3 время t1 – разгон клетей до своих заправочных скоростей, t2 – вход металла в клеть i, t3 – вход металла в клеть i+1 (появление натяжения при подъёме «моментного» петледержателя и появления «силовой» петли), t4 – изменение скорости клети i+1.

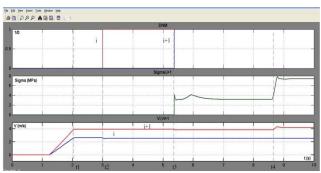


Рис. 3. Графики удельного натяжения и скоростей двух смежных клетей при прокатке без ускорения с «моментным» петледержателем

Схематично прокатка металла в межклетевом промежутке с петледержателем показана на рис. 4.

Здесь v_i — скорость выхода металла из клети i; v_{i+1} — скорость входа металла в клеть i+1; α — угол подъёма петледержателя; β_i — угол наклона касательной к восходящей ветви петли в сечении выхода металла из валков клети i; β_{i+1} — угол наклона касательной к нисходящей ветви петли в сечении входа металла в клеть i+1; $T_{i,i+1}$ — натяжение полосы в промежутке ($\sigma_{i,i+1} = T_{i,i+1}/(B \cdot H_{i,i+1})$ — удельное натяжение); P и $M_{\rm дв}$ — сила и момент, развиваемые приводом петледержателя, действующие на полосу в промежутке (для состояния покоя петледержателя — уравновешены воздействием со стороны полосы); R — радиус рычага петледержателя; $L_{i,i+1}$ — длина межклетевого промежутка [4].

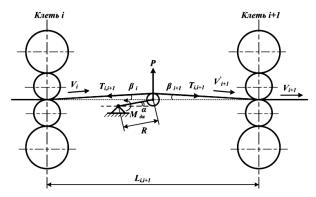


Рис. 4. Схема межклетевого промежутка при работе петледержателя

Теперь рассмотрим прокатку металла в межклетевом промежутке с применением «плавающего» или «безразличного» электромеханического петледержателя. На применении такого рода петледержателя основана работа САРН по косвенному принципу регулирования натяжения, которая до сих пор широко распространена на отечественных непрерывных широкополосных станах горячей прокатки [5]. На рис. 5 показана упрощённая структура САРН, работающая по косвенному принципу регулирования натяжения полосы с применением «плавающего» или «безразличного» петледержателя. В такой системе электромеханический (как правило) петледержатель развивает момент на своём валу, рассчитываемый системой автоматики и соответствующий нагрузке при фактическом угле подъёма. При неравенстве моментов электропривода петледержателя и момента нагрузки со стороны прокатываемой полосы (из-за несоответствия заданного и фактического натяжения) рама петледержателя отклоняется в ту или иную сторону. Сигнал рассогласования заданного и фактического угла и сигнал скорости петледержателя подаётся на регулятор петли, который, в свою очередь, выдаёт корректирующий сигнал в задание на скорость прокатной клети, стоящей до петледержателя (в некоторых САРН может быть по ходу прокатки, после петледержателя). Воздействуя, таким образом, на скорость этой клети, регулируется натяжение металла в межклетевом промежутке. На рис. 6 показаны графики переходных процессов при работе САРН по косвенному принципу регулирования натяжения для одного межклетевого промежутка. В качестве возмущающих воздействий в системе приняты

увеличение скорости последующей и предыдущей клети

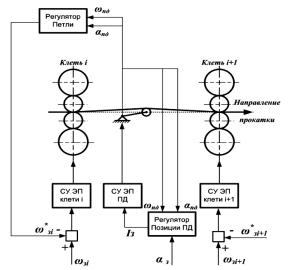


Рис. 5. Упрощённая структурная схема САРН с применением «безразличного» электромеханического петледержателя

На **рис. 6** время t1 — разгон клетей до своих заправочных скоростей, t2 — вход металла в клеть i, t3 — вход металла в клеть i+1, подъём петледержателя до заданного рабочего угла, отработка САРН возмущения при входе металла в клеть i+1, регулирование заданного натяжения $\sigma_{i,i+1} = 3,166$ МПа. t4 — увеличение скорости клети (по скачкообразному заданию на скорость) i+1, отработка САРН данного возмущения, t5 — увеличение скорость i, отработка САРН данного возмущения.

Графики переходных процессов в электромеханической системе, состоящей из двух смежных клетей, связанных прокатываемой полосой, с применением петледержателя (как силового, так и «плавающего») и без такового, показанные на рис. 2,3,6, получены в результате математического моделирования с применением пакета MathLab 6.0. Как видно из вышеприведённых графиков, регулирование и поддержание заданного натяжения может быть осуществлено только с применением системы автоматического регулирования натяжения (САРН), один из вариантов САРН, осуществляющий регулирование натяжения по косвенному принципу, изложен выше.

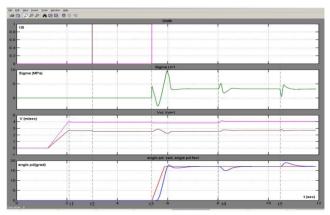


Рис. 6. Графики удельного натяжения и скоростей двух смежных клетей при прокатке без ускорения с «плавающим» петледержателем и работой САРН

Список литературы

- 1. Стефанович В.Л. Автоматизация непрерывных и полунепрерывных широкополосных станов горячей прокатки. М.: Металлургия, 1975. 208 с.
- 2. Дружинин Н.Н. Непрерывные станы как объект автоматизации. М.: Металлургия, 1975. 336 с.
- 3. Зайцев В.С., Третьяков В.А. Проектирование параметров и режимов работы оборудования листопрокатных
- цехов: учеб. пособие Липецк: ЛГТУ, 2009. 660 с.
- 4. Мещеряков В.Н., Диденко Е.Е. Математическое описание сил и моментов нагрузки петледержателя // Электротехнические комплексы и системы. 2010. №4. С. 18-23.
- 5. Фомин Г.Г., Дубейковский А.В., Гринчук П.С. Механизация и автоматизация широкополосных станов горячей прокатки. М.: Металлургия, 1979. 232 с.

INFORMATION IN ENGLISH

ADJUSTMENT OF STRIP TENSION IN FINISHING TRAIN OF CONTINUOUS HOT-ROLLING MILL ON INDIRECT PRINCIPLE

Mescheryakov V.N., Didenko E.E.

The article contains the general description of the automatic control system operation of strip tension in the finishing train of a continuous hot-rolling mill constructed on the basis of "indifferent" loopers with the indirect tension measurement. Rolling processes with looper application and without it are compared.

Keywords: the system of automatic tension control, looper, strip tension, loop regulator.

REFERENCES

- 1. Stefanovich V.L. Avtomatizatsiya nepreryvnyh i polynepreryvnyh shirokopolosnyh stanov goryachei prokatki [Automation of continuous and semicontinuous wide strip hot rolling mills]. Moscow: Metallurgy, 1975. 208 p.
 - 2. Druzhinin N.N. Nepreryvnye stany kak object

avtomatizatsii [Continuous rolling mills as the automation object]. Moscow: Metallurgy, 1975. 336 p.

- 3. Zaitsev V.S., Tretyakov V.A. *Proektirovanie parametrov i regimov raboty oborudovaniya listoprokatnyh tsehov* [Development of operating conditions and modes for sheet rolling mill facilities]: a tutorial. Lipetsk: LGTU, 2009, 660 p.
- 4. Mescheryakov V.N., Didenko E.E. Matematicheskoe opisanie sil i momentov nagruzki petlederzhatelya [Mathematical description of forces and load torques of looper]. Electrical complexes and systems, 2010, no.4. pp. 18-23.
- 5. Fomin G.G., Dubeikovskii A.V., Grinchuk P.S. *Mehanizatsiya i avtomatizatsiya shirokopolosnyh stanov goryachei prokatki* [Mechanization and automation of wide strip hot rolling mills]. Moscow: Metallurgy, 1979. 232 p.

УДК 669.013.6

Омельченко Е.Я., Козин А.Н., Маколов В.Н., Бовшик П.А., Попов С.Н.

ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ЦЕХОВ ОАО «ММК»

Приведены основные характеристики по мощностям и производителям систем электроснабжения, систем электропривода, системам управления и крановому электрооборудованию электросталеплавильного цеха, листопрокатных цехов горячей и холодной прокатки ОАО «ММК».

Ключевые слова: электрооборудование, электропривод переменного тока, микропроцессорное управление.

Введение

В сентябре 2004 г. в г. Магнитогорске под эгидой ОАО «ММК», МЭИ и МГТУ им. Г.И. Носова проведена IV Международная (XV Всероссийская) конференция по автоматизированному электроприводу АЭП-2004. На конференции был сделан анализ состояния силового электрооборудования на ОАО «ММК» [1]. Намечены перспективы развития систем электропривода [2-4]. За эти 10 лет в ОАО «ММК» произошли существенные перемены в технологии производства, выведено из схемы мартеновское производство, существенно расширено конверторное производство стали и запущено электросталеплавильное производство, построены и введены в работу мощные листопрокатные станы горячей и холодной прокатки, на новый уровень вышли системы управления электрооборудованием. В связи с этим в статье приводятся краткие основные характеристики силового электрооборудования новых цехов ОАО «ММК», по которым можно определить тенденции развития систем электроснабжения, систем электропривода и управляющих систем, как составляющие современного технологического оборудования.

Электросталеплавильный цех (ЭСПЦ)

Создан на основе Мартеновского цеха №2. Предназначен для выплавки стали электродуговым способом и получения стальных заготовок для сортопрокатного передела и листопрокатных цехов.

Основное технологическое оборудование:

- дуговые сталеплавильные печи ДСП-1,2 (запущены в работу 03.09.06 и 24.04.06);
- агрегаты «печь-ковш» АПК-1,2,3 (запущены в работу 02.07.04, 11.07.06 и 10.12.08 соответственно);
- машины непрерывного литья заготовок МНЛЗ-1,2 сортовые и МНЛЗ-5 слябовая двухручьевая (запущены в работу 30.09.04, 2.07.04 и 27.08.06).

Мартеновский цех в 1988 г. выпустил 8345 тыс. т мартеновской стали. Переименован в электросталеплавильный 01.03.06. ЭСПЦ выдал 10.12.06 первый миллион тонн электростали, а в 2007 году выдал 3185 тыс. т стали при плане 3410 тыс. т. Проектная

мощность ЭСПЦ – 4 млн т стали в год. Текущая производительность зависит от заказов.

Общая характеристика системы электроснабжения:

- − 2 прямых ввода 110 кВ на питающие трансформаторы АПК-1,2 суммарной мощностью 26 МВА;
- − 3 ввода 35 кВ на питающие трансформаторы ДСП-1,2 и АПК-3 суммарной мощностью 175 МВА;
- 6 кабельных вводов 10 кВ от ЦЭСиП на суммарный ток 4730 А.

Общая характеристика систем электропривода:

- суммарная установленная мощность двигателей 84,23 MBт;
- двигатели постоянного тока на 220 В 490 шт.;
- двигатели переменного тока на 0,4 кВ 1910 шт.;
- двигатели переменного тока на 10 кВ 20 шт.;
- двигатели до 10 кВт 1357 шт. суммарной мощностью 4,51 МВт;
- двигатели до 100 кВт 900 шт. суммарной мощностью 29 МВт;
- двигатели свыше 100 кВт 170 шт. суммарной мощностью 40,7 МВт;
- двигатели 1000 и 2000 кВт 2 и 4 шт. суммарной мощностью 10 МВт;
- основная система электропривода «преобразователь частоты асинхронный двигатель» (ПЧ-АД).

Фирмы-производители преобразователей частоты:

- Siemens (Simoreg, Micromaster, Simovert, Sinamics);
- Konecranes, Danfoss, Emotron, Control Techniques;
- ЗАО «Обнинск энерготех», Березовский опытный завод БОЗ «ОЦМ».

Фирмы-производители контроллеров (более 130 шт.) для управления технологическими режимами:

- Siemens (Simatic S7-200, S7-300, S7-400);
- OMRON (CJ1M), ABB;
- Веспер Проект (КВ-007).

Общая характеристика кранового электрообору-

- краны с питанием на постоянном токе 25 шт., установленная мощность двигателей 9,05 МВт (400 т 1 шт., 300 т 2 шт., 125 т 6 шт., 2 крана по системе ТП-Д, преобразователи Simoreg);
- краны с питанием на переменном токе 20 шт., установленная мощность двигателей 11,35 МВт (300 т 6 шт., 225 т 4 шт., 65+65 тн 2 шт., 14 кранов по системе ПЧ-АД, преобразователи Sinamics и др.).

Листопрокатный цех горячей прокатки (ЛПЦ-9)

Начало строительства цеха: 1.12.2006.

Получение первого проката: 16.07.2009.

Генеральный подрядчик, разработчик технологического проекта и поставщик основного оборудования – SMS DEMAG.

Выход на проектную мощность: 120 тыс. т/месяц, 1,44 млн. τ /год 16.07.2010.

Максимальная достигнутая производительность: 135 тыс. т/месяц.

Средняя загрузка производственных мощностей в 2013 г. – 86 тыс. т/месяц.

Основное технологическое оборудование:

- 2 нагревательные печи с шагающим подом;
- система гидросбива окалины;
- прокатная клеть стана 5000;

- машина предварительной правки листа;
- участок ламинарного и спрейерного охлаждения;
- машина горячей правки листа;
- холодильник с участком противоплотенной обработки:
- инспекционный стол с кантователем и стол зачистки;
- 2 установки ультразвукового контроля;
- концевые ножницы, сдвоенные кромкообрезные ножницы, ножницы с продольным резом и делительные ножницы;
- термические печи (закалки и нормализации);
- машина холодной правки листа;
- 4 стола-штабилера готовой продукции.

Схема электроснабжения цеха предусматривает два ввода напряжением 110 кВ и один ввод напряжением 10 кВ для обеспечения надежности электроснабжения особой группы электроприемников (насосов, подающих воду на охлаждение шагающих балок нагревательных печей, а также трансформаторов аварийного освещения).

Трансформаторное оборудование:

– головные трансформаторы – 2 шт. масляных трансформаторов 110/10-10 кВ мощностью 100/63-63 МВА; – понижающие трансформаторы 79 шт., из них масляные 10 шт., остальные сухие с цельнолитой изоляцией.

Мощности трансформаторов 500, 1000, 1600, 2000, 3150, 3600 и 5700 кВА (для стана 5000).

Напряжения трансформаторов 10/3,15, 10/0,69 и 10/0,4 кВ.

Производители трансформаторов: ABB Шанхай (Китай), ASA TRAFOBAU GMBH (Германия), Hochspannungstechniku. Transformatorbau Gmbh (Германия), STARKSTORM-GERATEBAU Gmbh (Германия), РосЭнергоТранс (Россия, Екатеринбург).

Электродвигатели:

- электродвигатели переменного тока 3 427шт., суммарная установленная мощность 122,73 МВт;
- электродвигатели на напряжение $10~\mathrm{kB}-4~\mathrm{шт}.$ по $2500~\mathrm{kBr},~2~\mathrm{шт}.$ по $740~\mathrm{kBr},~5~\mathrm{шт}.$ по $450~\mathrm{kBr},~4~\mathrm{шт}.$ по $400~\mathrm{kBr},~7~\mathrm{шт}.$ по $220~\mathrm{kBr}.$
- электродвигатели мощностью свыше 100 кВт 183 шт.;
- -2 синхронных электродвигателя клети стана 5000 мощностью 12000 кВт, 2900 В, 2460 А (6000 А max), 10 Γ ц (19,2 Γ ц max), 60 об/мин (150 об/мин max). Охлаждение принудительное жидкостное.

Производители электродвигателей: VEM Sachsenwerk GmbH (Германия), SEW Eurodrive Gmbh (Германия), Baumuller Nurnberg Gmbh (Германия).

Основная система регулируемого электропривода ПЧ-АД на основе активных выпрямителей, питающих автономные инверторы напряжения.

Преобразователи частоты:

- главный привод клети стана 5000 Converteam серии MV7000 [5]. Для реализации восемнадцатипульсной схемы применены три трансформатора 10/3,15кВ 5700 кВА с углами сдвига векторов вторичных напряжений на +200, 00, -200 . Преобразователь частоты состоит из двух частей — активного выпрямителя и трехуровневого инвертора напряжения, построенных на базе IGCT тиристоров на ток 2100 А 24 класса. Охлаждение силовой части преобразователей принудительное жидкостное, где в качестве охлаждающей

жидкости используется деионизированная вода;

– главные и вспомогательные приводы механизмов и рольгангов: Converteam серии LV7000 (55 шт. AFE-выпрямителей на напряжение 0,4 и 0,69 кВ и 278 шт. инверторов на напряжение 0,4 и 0,69 кВ, диапазон номинальных токов инверторов от 9 до 2250 A).

Производители преобразователей: Siemens (Micromaster, Simovert, Sinamics – 294 шт.); Baumuller (5 шт.); SEW Eurodrive (4 шт.); Dunfoss (3 шт.); Lenze (12 шт.); Schneider Electric (2 шт.).

Мостовые грузоподъемные краны производства DHI (Китай) – 26 шт., из них 15 шт. магнитных. Грузоподъемность кранов от 25 до 400 т.

Крановые электроприводы построены по системе ПЧ-АД на базе преобразователей частоты Siemens (Micromaster, Simovert производства Китай) и электродвигателей DALIAN TIAN YUAN ELECTRIC MACHINE CO (Китай).

Основные отказы электрооборудования:

- 1. Выход из строя статора нижнего двигателя главного привода клети (разрыв шпилек, стягивающих магнитопровод статора, затягивание обломков в воздушный зазор электрической машины и механическое повреждение изоляции секций обмотки статора с выгоранием железа статора).
- 2. Образование трещин в литой изоляции обмоток сухих трансформаторов (РосЭнергоТранс в течение гарантийного периода эксплуатации, STARKSTORM-GERATEBAU Gmbh спустя четыре года эксплуатации).
- 3. Низкая эксплуатационная надежность AFEвыпрямителей и инверторов Converteam серии LV7000 (выход из строя управляющей электроники, пробой изоляции в звене постоянного тока с выгоранием силовых транзисторов, малая наработка на отказ вентиляторов охлаждения силовой части преобразователей).

Листопрокатный цех холодной прокатки (ЛПЦ-11)

Окончание проектирования 1993 г.

Получение первого проката: июль 2011 г. – первая очередь, июль 2012 г. – окончательный пуск.

Генеральный подрядчик, разработчик технологического проекта и поставщик основного оборудования – SMS DEMAG.

Проектная производительность:

- непрерывный травильный агрегат и стан 2000 2,1 млн т/год;
- фактическая производительность по заказам до 150 тыс. т/мес.

Основное технологическое оборудование:

- непрерывный травильный агрегат (НТА);
- 5-клетьевой стан холодной прокатки 2000;
- агрегат непрерывного горячего цинкования (АНГЦ);
- агрегат непрерывного отжига с агрегатом непрерывного горячего цинкования (АНОАНГЦ);
- вальцешлифовальное отделение;
- агрегат инспекции и перемотки полосы;
- линия упаковки рулонов.

Схема электроснабжения цеха выполнена по аналогии с ЛПЦ-9, предусматривает два ввода напряжением 110 кВ и один ввод напряжением 10 кВ для обеспечения надежности электроснабжения особой группы электроприемников.

Трансформаторное оборудование:

- головные трансформаторы 2 шт. масляных трансформаторов 110/10-10 кВ мощностью 100/63-63 МВА; понижающие трансформаторы 99 шт.;
 - Мощности трансформаторов:
- для стана 2000 4,85 MBA (10 шт.), 4,2 MBA (2 шт.);
- для остальных потребителей 1,0, 1,6, 2,5, 3,15 MBA.

Электродвигатели:

- 7 синхронных двигателей с водяным охлаждением по 5 МВт для стана 2000. Питание по системе ПЧ-СД на основе полностью запираемых тиристоров [5].
- асинхронные короткозамкнутые двигатели 3277 шт.

Основная система регулируемого электропривода ПЧ-АД на основе IGBT транзисторов. Преобразователи частоты фирмы ABB тип ACS-800 подключены по модульному принципу (несколько пассивных или активных блоков выпрямителей питают серию автономных инверторов напряжения (АИН) до 32 шт., объединенных одной технологической задачей). Рекуперация энергии между механизмами выполняется через автономные инверторы по цепи постоянного напряжения.

Система управления электрооборудованием — трехуровневая. Верхний уровень управления — технологический. Средний уровень управления реализован на программируемых логических контроллерах (122 шт.) фирмы Siemens (Simatic S7-200, S7-300, S7-400) для управления технологическими режимами. Нижний уровень — электрические, технологические датчики, электро, пневмо- и гидроприводы.

Мостовые грузоподъемные краны 31 шт. Грузоподъемность кранов от 15 до 63 т. Крановые электроприводы построены по системе ПЧ-АД на базе преобразователей частоты фирмы ABB.

Выводы

- 1. Рассмотренные цеха являются крупными предприятиями с высокой степенью энерговооруженности.
- 2. Электрооборудование в основном импортного изготовления фирмами Siemens, ABB, Converteam и др. Большая доля в изготовлении электрооборудования по лицензиям принадлежит Китаю.
- 3. Электроприводы, в основном, переменного тока. Мощные установки более 1 МВт выполнены по системе ПЧ-СД. Меньшей мощности установки выполняются по системе ПЧ-АД.
- 4. Все преобразователи частоты выполнены на основе микроконтроллеров. Управление комплексом электрооборудования и технологией цеха выполнено трехуровневым. Нижний уровень электрические, технологические датчики, электро-, пневмо- и гидроприводы. Средний уровень управления реализован на программируемых логических контроллерах. Верхний уровень управления управление технологическим процессом.
- 5. Преобразователи частоты, работающие на общий технологический процесс, выполнены по модульному принципу, объединяющему активные или пассивные выпрямители с автономными инверторами напряжения с рекуперацией энергии между механизмами по звену постоянного напряжения.
- 6. Регулирование переменными ЭП (скорость, момент и т.д.), выполняемое с помощью АИН: скалярное с компенсацией скольжения; датчиковое или без-

датчиковое векторное регулирование; прямое управление моментом. Управление ПЧ выполняется по локальной сети от программируемого контроллера среднего уровня.

- 7. Крановое электрооборудование выполнено по системе АДФ с реостатным регулированием или для мощных кранов по системе ПЧ-АД с общим выпрямителем.
- 8. Диагностика работы электроприводов выполняется с помощью микроконтроллера ПЧ и объединяется на среднем уровне управления. Большая часть ПЧ допускают расширение алгоритмов регулирования с помощью свободно программитруемых блоков в памяти контроллера.

Список литературы

1. Осипов О.И., Славгородский В.Б. Состояние и перспективы модернизации автоматизированного электропривода прокатных станов в черной металлургии. // Труды IV Международной (XV Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу «Автоматизированный электропривод в XXI веке: пути развития». Магнитогорск, 2004. С. 16-23.

- 2. Кочетков В.Д., Козырев С.К. Состояние и перспективы развития автоматизированного электропривода в XXI веке // Труды IV Международной (XV Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу «Автоматизированный электропривод в XXI веке: пути развития». Магнитогорск, 2004. С. 5-8.
- 3. Никифоров Г.В. Энерго- и ресурсосбережение основные направления развития электроприводов ОАО «ММК» в условиях рыночной экономики. // Труды IV Международной (XV Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу «Автоматизированный электропривод в XXI веке: пути развития». Магнитогорск, 2004. С. 9-15.
- 4. Козаченко В.Ф. Микроконтроллерные системы управления электроприводами: современное состояние и перспективы развития // Труды IV Международной (XV Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу «Автоматизированный электропривод в XXI веке: пути развития». Магнитогорск, 2004. С.52-65.
- 5. Bordignon Paolo. Многоуровневые преобразователи источников напряжения для мощных приводов и управления электропотреблением // Труды IV Международной (XV Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу «Автоматизированный электропривод в XXI веке: пути развития». Магнитогорск, 2004. С. 90-101.

INFORMATION IN ENGLISH

ELECTRICAL EQUIPMENT OF MODERN SHOPS OF MAGNITOGORSK IRON AND STEEL WORKS

Omelchenko E.Ya., Kozin A.N., Makolov V.N., Bovshik P.A., Popov S.N.

The authors listed the main characteristics of power supply systems and electrical equipment from different suppliers as well as electrical drives, control systems of electrical steel-making shop and sheet hot and cold rolling shops of «Magnitogorsk Iron and Steel Works".

Keywords: electrical equipment, alternating current drives, microprocessor control.

REFERENCES

- 1. Osipov O.I., Slavgorodskiy V.B. Sostoyanie i perspektivy modernizatsii avtomatizirovannogo elektroprivoda prokatnyh stanov v cheprnoy metallurgii [State and prospects of automatic drive modernization of rolling shops of iron making industry]. Proceedings of the IV International (XV All-Russian) conference on automatic electric drive. Magnitogorsk, 2004, pp. 16-23.
- 2. Kochetkov V.D., Kozirev S.K. Sostoyanie i perspektivy modernizatsii avtomatizirovannogo elektroprivoda v XXI veke. [State and prospects of automatic electric drive development in

XXI century]. Proceedings of the IV International (XV All-Russian) conference on automatic electric drive. Magnitogorsk, 2004, pp. 5-8

- 3. Nikiforov G.V. Energo i resursosberezhenie osnovnye napravleniya pazvitiya elektroprivodov OAO "MMK" v usloviyah rynochnoy ekonomiki. [Energy and Resource saving are main prospects of electric drive development at Magnitogorsk Iron and Steel Works operating in market economy conditions]. Proceedings of the IV International (XV All-Russian) conference on automatic electric drive. Magnitogorsk, 2004, pp. 9-15
- 4. Kozachenko V.F. Mikrokontrollernye sistemy upravleniya elektroprivodami: sovremennoye sostoyanie i perspektivy razvitiya. [Intelligent controller control systems of electric drives: current state and prospects]. Proceedings of the IV International (XV All-Russian) conference on automatic electric drive. Magnitogorsk, 2004, pp. 52-65.
- 5. Bordignon Paolo. Multilevel voltage converters for high power electric drives and controlled energy consumption. Proceedings of the IV International (XV All-Russian) conference on the automatic electric drive. Magnitogorsk, 2004, pp. 90-101.

УДК 621.314

Брылина О.Г., Гельман М.В.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОГО АКТИВНОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ

Статья посвящена исследованию активного выпрямителя напряжения (ABH). Приведена его принципиальная схема и виртуальная модель. Показаны временные диаграммы работы ABH в выпрямительном и инверторном режиме. Проведен спектральный анализ осциллограмм напряжения и тока сети.

Ключевые слова: активный выпрямитель напряжения, виртуальная модель, выпрямительный и инверторный режим, временные диаграммы, спектральный анализ.

Трехфазные активные выпрямители напряжения (АВН) относятся к сравнительно новому классу преобразователей, которые могут работать в выпрямительном и инверторном режиме, передавая энергию из сети переменного тока в цепь постоянного и обратно, то есть меняя направление потока мощности. При этом изменяется направление тока при неизменной полярности напряжения [1, 2].

В этих преобразователях улучшен гармонический состав тока, потребляемого из сети, а также имеется возможность получения желаемого значения коэффициента мощности, в том числе близкого к единице.

АВН могут применяться, по крайней мере, в трех случаях [1-4]:

- 1) для получения стабильного постоянного напряжения от сети переменного с возможностью рекуперации энергии;
- 2) в качестве первого звена в двухзвенных преобразователях для питания двигателей постоянного тока с возможностью регулирования скорости и рекуперативного торможения;
- 3) в качестве первого звена в двухзвенных преобразователях для питания асинхронных двигателей с возможностью регулирования скорости и рекуперативного торможения.

Для исследования схем силовой электроники широко применяется имитационное моделирование с помощью комплекса программ Matlab+Simulink [5-7].

На кафедре электропривода и автоматизации ЮУрГУ (НИУ) в развитие существующего комплекса виртуальных лабораторных работ [8, 9] поставлены новые работы для магистров, изучающих специальные разделы курса «Силовая электроника», в частности поставлена работа по изучению трехфазного АВН.

Цель работы – исследование энергетических показателей и характеристик АВН, а также влияния изменения параметров схемы на энергетические показатели и качество напряжения сети. Поэтому в исследуемом АВН отсутствует обратная связь по выпрямленному напряжению и входные токи задаются от независимого источника трехфазного синусоидального напряжения.

Принципиальная схема и виртуальная модель для исследования АВН показана на **рис. 1**. В ее состав входят следующие блоки:

- сеть (Set) блок, имитирующий работу источника трехфазного синусоидального напряжения;
- сетевой фильтр СФ (F) обеспечивает защиту сети от ШИМ сигнала;

- индуктивный накопитель ИН (IN) блок, имитирующий активно-индуктивное сопротивление реактора в цепи переменного тока;
- система управления СУ (SU) обеспечивает логику работы транзисторов вентильного блока ВБ (WB(kom)) активного выпрямителя напряжения в выпрямительном и инверторном режиме;
- вентильный блок ВБ (WB(kom)) содержит вентильный блок (WB) в комплекте с блоком коммутационных потерь, позволяющим учесть коммутационные потери в транзисторах;
- фильтр (Cd) и нагрузка Rd+E, представляющая собой противо-ЭДС с внутренним активным сопротивлением (Rd, PEDS);
- датчики тока ДТ и напряжения (Datch I2, Dat_idi2, Dat_idi3, Dat U_AB) позволяют измерять токи и напряжение в схеме и передавать их значения на осциллограф;
- блок измерительных преобразователей (ВІР) позволяет определять мгновенные, средние и действующие величины токов и напряжений в схеме (uAb, uA, iA, iv, uv, id, id1, ud1, Ud, Id, Ulin,), мощности (Pd, P1, Q, S), действующие значения первых гармоник тока и напряжения (I1(1), Ulin(1)) и коэффициенты гармоник (Кі, Ки), энергетические показатели схемы (η , χ , $\cos \phi$); осциллографы (Scope1, Scope2) блоки, позволяющие наблюдать осциллограммы токов и напряжений (uAB, uA, iv, uv, id, id1, ud), а также мощностей (Pd, P1, Q, S);
- дисплей (Display) блок, предназначенный для цифрового отображения числа включений одного транзистора (n_kom) и значений напряжений и токов, снимаемых с блока ВІР;
- графопостроители (Ud = f(Id); KPD = f(Id)) блоки, предназначенные для построения внешних характеристик Ud = f(Id), а также зависимостей η = f(Id) в автоматическом режиме.

Временные диаграммы, иллюстрирующие процессы, происходящие в АВН в выпрямительном и инверторном режиме, приведены на рис. 2 и 3 соответственно. Из осциллограмм наглядно видна синусоидальность напряжений сети и потребляемого тока. Видно, что в выпрямительном режиме потребляемый ток находится в фазе с фазным напряжением, а в инверторном — в противофазе.

На **рис. 4** изображены осциллограммы и спектральный состав напряжения сети uAB и тока iA, потребляемого из сети (в выпрямительном режиме).

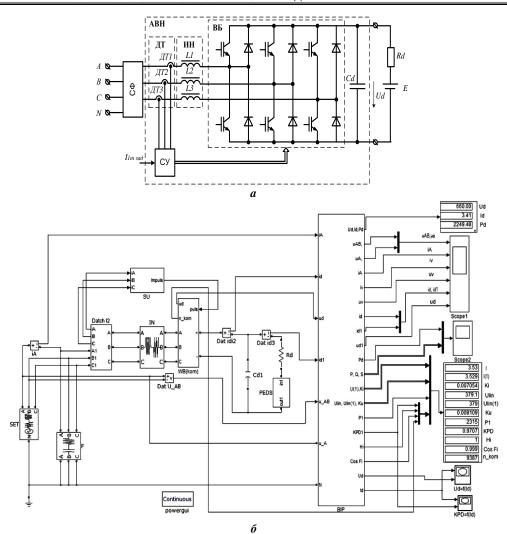


Рис. 1. Принципиальная схема (a) и виртуальная модель (b) для исследования активного выпрямителя напряжения

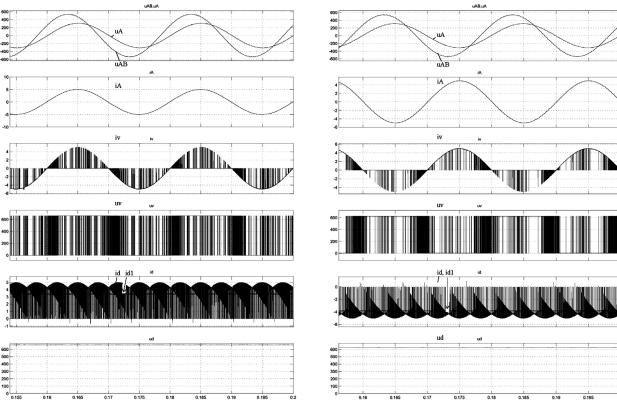


Рис. 2. Осциллограммы процессов ABH, работающего в выпрямительном режиме

Рис. 3. Осциллограммы процессов ABH, работающего в инверторном режиме

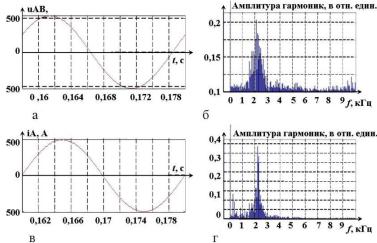


Рис. 4. Осциллограмма и спектральный состав напряжения сети uAB (a, δ) и тока iA на входе ABH (a, ϵ)

Исследования приведены для случая формирования фазных токов с помощью релейной обратной связи. При формировании токов с помощью ШИМ были получены аналогичные результаты по энергетическим показателям и содержанию гармоник в токе и напряжении сети. Как видно из **рис. 4**, доля гармоник в токе и напряжении сети составляет доли процента.

Выводы

- 1. Проведенные эксперименты подтверждают, что главное достоинство ABH это возможность рекуперации энергии и высокий коэффициент мощности в выпрямительном и инверторном режимах ($\chi \approx 1$).
- АВН мало влияет на качество напряжения питающей сети.
- 3. Малые динамические потери в IGBT транзисторах нового поколения позволяют существенно повысить КПД АВН (до 97-98%) и уменьшить габариты индуктивного накопителя, сетевого фильтра и выходного конденсатора за счет повышения частоты импульсной модуляции.
- 4. Моделирование позволило оптимизировать параметры элементов АВН.
- 5. По внешнему виду осциллограмм и результатам спектрального анализа можно наглядно судить о высокой синусоидальности тока, потребляемого из сети и малых искажениях синусоидальности сетевого напряжения.

Список литературы

- 1. Зиновьев Г.С. Основы силовой электроники. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. 672 с.
- 2. Siemens simovert masterdrives AFE catalogue. 2005. $117 \,\mathrm{p}$.
- 3. Гельман М.В., Дудкин М.М., Преображенский К.А. Преобразовательная техника: учеб. пособие. Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2009. 424 с.
- 4. Усынин Ю.С., Григорьев М.А., Шишков А.Н. Вентильный электропривод с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения // Электротехника. 2013. № 3. С 37-43
- 5. Герман-Галкин С.Г. Силовая электроника: лабораторные работы на ПК. СПб.: КОРОНА принт, 2007. 300 с.
- 6. Герман-Галкин С.Г. Matlab&Simulink. Проектирование механотронных систем на ПК. СПб.: КОРОНА-Век, 2008 368 с.
- 7. Совместное применение физического и виртуального моделирования при изучении устройств преобразовательной техники / М.В. Гельман, Р.З. Хусаинов, М.М. Дудкин, О.Г. Терещина // Изв. вузов. Электромеханика. 2007. Вып. 5. С. 62-65.
- 8. Гельман, М.В., Брылина О.Г., Дудкин М.М. Комплекс виртуальных лабораторных работ по преобразовательной технике // Электротехнические системы и комплексы: межвуз. сб. науч. тр. Вып. 18 / под ред. Радионова А.А. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2010. С. 41-49.
- 9. Брылина О.Г., Гельман М.В. Исследование двухзвенных преобразователей частоты // Электротехнические системы и комплексы: междунар. сб. науч. трудов. Вып. 21. / под ред. Корнилова Г.П., Пановой Е.А. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2013. С. 270 278.

INFORMATION IN ENGLISH

STUDY OF THREE-PHASE ACTIVE RECTIFIER

Brylina O.G., Gelman M.V.

An active voltage rectifier is considered in this article. The block diagram and virtual model of the active voltage rectifier are given. Time characteristics of active voltage rectifier operation for the rectifier and inverter mode are given. Spectral analysis of voltage and current oscillograms is made.

Keywords: active voltage rectifier, virtual model, rectifier and inverter mode, timing diagrams, spectral analysis.

REFERENCES

- 1. Zinovyev G.S. Osnovy silovoi elektroniki [Fundamentals of power electronics]. Novosibirsk: Publishing house of NGTU, 2004. 672 p.
- 2. Siemens simovert masterdrives AFE catalogue. 2005. $117 \,\mathrm{p}.$
- 3. Gelman M.V., Dudkin M.M., Preobrazhenskii K.A.Preobrazovatelnaya tehnika [Converting equipment]: a tutorial. Chelyabinsk: Publishing house of SUSU, 2009. 424 p.
 - 4. Usynin Yu. S., Grigoryev M.A., Shishkov A.N. Ventilnyi

elektroprivod s sinhronnoi reaktivnoi mashinoi nezavisimogo vozbuzhdeniya [Rectifier electric drive with induction reluctance separately exited motor]. Electrical engineering. 2013. No.3, pp. 37-43.

- 5. German-Galkin S.G. Silovaya elektronika: laboratornye raboty na PK [Power electronics: laboratory works for PC]. Saint Petersburg: KORONA print, 2007. 300 p.
- 6. German-Galkin S.G. Matlab & Simulink. Proektirovanie mehanotronnyh sistem na PK [Computer-aided design of mechatronic systems]. Saint Petersburg: KORONA-Vek, 2008. 368 p.
- 7. Gelman M.V., Khusainov R.Z., Dudkin M.M., Tereschina O.G. Sovmestnoye primeneniye fizicheskogo i virtualnogo pri modelirovaniya izuchenii ustroisty preobrazovatelnoi tehniki [Application of physical and virtual

modeling in the study of converting devices]. Proceedings of universities. Electrical engineering. 2007, issue 5, pp. 62-65.

- 8. Gelman M.V., Brylina O.G., Dudkin M.M. Kompleks virtualnyh laboratornyh rabot po preobrazovatelnoi tehnike [Virtual laboratory works on converting equipment]. Electrical systems and complexes: Interuniversity collection of scientific papers. Issue 18. Ed. Radionov A.A. Magnitogorsk: MSTU, 2010, pp. 41-49.
- 9. Brylina O.G., Gelman M.V. Issledovanie dvuhzvennyh preobrazovatelei chastoty [Study of two-section converters]. Electrical systems and complexes: International collection of scientific papers. Issue 21. Ed. Kornilov G.P., Panova E.A. Magnitogorsk: Publishing house of Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2013, pp. 270-278.

УДК 62-83: 621.313

Косматов В.И., Зиновьев А.М., Кочергин Г.Г., Карпова У.В.

СТРУКТУРНАЯ СХЕМА И ДИНАМИКА ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИМ АСИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ ПРИ ПРОИЗВОЛЬНОЙ ОРИЕНТАЦИИ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ СИСТЕМЫ КООРДИНАТ

В работе рассматривается математическое описание электромеханических и электромагнитных процессов в переходных режимах электропривода на основе энергосберегающего асинхронного двигателя (ЭАД) с индивидуальной компенсацией реактивной мощности. Математическое описание выполнено методом пространственных векторов с использованием теории определителей. Составлена структурная схема электропривода, произведены расчеты переходных процессов, получены осциллограммы зависимостей скорости и электромагнитного момента ЭАД при прямом пуске и набросе нагрузки.

Ключевые слова: компенсированный, асинхронный, двигатель, метод пространственных векторов, определители, структурная схема, математическая модель, осциллограммы.

Применение электропривода с энергосберегающим асинхронным двигателем обеспечивает экономию электрической энергии, снижение потерь и увеличение в целом энергетического КПД. Динамические режимы таких электроприводов изучены недостаточно, в связи с чем в работе предлагается рассматривать переходные процессы в таких электроприводах методами пространственных векторов с моделированием в среде MATLAB Simulink.

Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором и дополнительной компенсационной обмоткой на статоре (рис. 1) рассматривается как система взаимосвязанных обмоток, причем взаимное положение этих обмоток в пространстве при вращении ротора непрерывно меняется. В [1] дано математическое описание электромагнитных процессов традиционных и компенсированных двигателей в стационарных режимах. Там же приводится схема замещения компенсированного двигателя и векторные диаграммы.

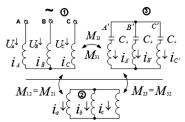


Рис. 1. Система магнитосвязанных обмоток компенсированного двигателя

Для асинхронного двигателя с компенсационной обмоткой на статоре справедливы уравнения для мгновенных значений напряжений, токов и потокосцеплений для трех обмоток вида:

для трех оомоток вида:
$$U_{1A} = R_1 i_{1A} + \frac{d\Psi_{1A}}{dt};$$

$$0 = R_2 i_{2a} + \frac{d\Psi_{2a}}{dt};$$

$$0 = R_3 i_{3A} + \frac{d\Psi_{3A}}{dt} + \frac{1}{C_\kappa} \int_{3A} dt.$$

$$\Psi_{1A} = (L_{m\phi} + L_{1\sigma}) i_{1A} \quad 0.5 L_{m\phi} i_{1B} \quad 0.5 L_{m\phi} i_{1C}$$

$$0.5 L_{m\phi} i_{3A} \quad 0.5 L_{m\phi} i_{3B} + 0.5 L_{m\phi} i_{3C} +$$

$$+ L_{m\phi} [i_{2a} \cos \Theta_2 + i_{2b} \cos(\Theta_2 + \frac{2\pi}{3}) +$$

$$+ i_{2c} \cos(\Theta_2 \quad \frac{2\pi}{3})];$$

$$\Psi_{2a} = (L_{m\phi} + L_{2\sigma}) i_{2a} \quad 0.5 L_{m\phi} (i_{2b} + i_{2c}) +$$

$$+ L_{m\phi} [i_{1A} \cos \Theta_2 + i_{1b} \cos(\Theta_2 \quad \frac{2\pi}{3}) +$$

$$+ i_{1c} \cos(\Theta_2 + \frac{2\pi}{3}) + i_{3C} \cos(\Theta_2 + \frac{2\pi}{3});$$

$$\Psi_{3A} = (L_{m\phi} + L_{2\sigma}) i_{3A} \quad 0.5 L_{m\phi} i_{3B} \quad 0.5 L_{m\phi} i_{3C} \quad$$

$$0.5 L_{m\phi} i_{1A} \quad 0.5 L_{m\phi} i_{1B} \quad 0.5 L_{m\phi} i_{1C} +$$

$$+ L_{m\phi} [i_{2a} \cos \Theta_2 + i_{2b} \cos(\Theta_2 + \frac{2\pi}{3}) +$$

$$+ i_{2c} \cos(\Theta_2 \quad \frac{2\pi}{3})].$$

Аналогично записываются уравнения равновесия вида (1) и потокосцеплений вида (2) для фаз обмоток статора B, C, B', C' и ротора b, c.

Параметры обмотки 3 статора и обмотки 2 ротора приведены к рабочей обмотке 1 статора.

Девять уравнений равновесия вида (1), девять уравнений для потокосцеплений вида (2) образуют первый вид уравнений, входящих в систему дифференциальных уравнений короткозамкнутого асинхронного двигателя с компенсационной обмоткой на статоре.

Электрическая энергия обмоток двигателя [2]:

$$\begin{split} W_{\Im M} &= \frac{1}{2} (\Psi_{A} i_{A} + \Psi_{B} i_{B} + \Psi_{C} i_{C} + \Psi_{a} i_{a} + \\ &+ \Psi_{b} i_{b} + \Psi_{c} i_{c} + \\ \Psi_{3A} i_{3A} + \Psi_{3B} i_{3B} + \Psi_{3C} i_{3C}). \end{split} \tag{3}$$

Электромагнитный момент определяется как частная производная по геометрическому углу от общего запаса электромагнитной энергии

$$M_{\rm 3M} = \frac{\partial W_{\rm 3M}}{\partial \varphi_{\rm au}},\tag{4}$$

где P_n - число пар полюсов двигателя.

Уравнение движения электродвигателя в условиях абсолютно жесткого приведенного звена при $J={
m const}$ запишется в виде

$$M_{\rm 3M} - M_C = \frac{J}{P_n} \frac{d\omega_{\rm 3M}}{dt},$$

где $\omega_{_{33}}=\omega P_{_{n}}$ - угловая скорость вращения ротора в электрическом пространстве, эл. рад/с; ω - угловая скорость вращения ротора в физическом пространстве, рад/с.

Полученная система дифференциальных уравнений трудоемка при аналитических расчетах, она высокого порядка, содержит нелинейные уравнения с периодическими коэффициентами. В связи с этим систему дифференциальных уравнений трехфазного асинхронного двигателя, записанную в реальных фазных величинах токов и потокосцеплений, необходимо преобразовать в систему с постоянными коэффициентами и меньшего порядка.

Одним из методов, приводящих к системе уравнений с постоянными коэффициентами, является метод пространственных векторов, подробно изложенный в [2]. На основании этого метода исходные уравнения (1) и (2) могут быть представлены в векторной форме

$$\begin{vmatrix}
\dot{U}_{1} = R_{1} \dot{I}_{1} + \frac{d \dot{\Psi}_{1}}{dt}; \\
0 = R_{2} \dot{I}_{2} + \frac{d \dot{\Psi}_{2}}{dt}; \\
0 = R_{3} \dot{I}_{3} + \frac{d \dot{\Psi}_{3}}{dt} + \dot{U}_{C}; \\
\dot{\Psi}_{1} = L_{1} \dot{I}_{1} + L_{12}(\Theta) \dot{I}_{2} + L_{13} \dot{I}_{3}; \\
\dot{\Psi}_{2} = L_{21}(\Theta) \dot{I}_{1} + L_{2} \dot{I}_{2} + L_{23}(\Theta) \dot{I}_{3}; \\
\dot{\Psi}_{3} = L_{31} \dot{I}_{1} + L_{32}(\Theta) \dot{I}_{2} + L_{3} \dot{I}_{3}.$$
(5)

где L_1 , L_2 , L_3 , - собственные индуктивности обмоток (1), (3) статора и (2) ротора; $\dot{U_C} = \frac{1}{j\omega_{0_{33}}C}\dot{I_3} = -jx_c\dot{I_3}$ - вектор напряжения на конденсаторе C обмотки (3) статора; $L_{12} = L_{21} = L_{23} = L_{32} = L_m = f(\Theta)$ - взаимные индуктивности между обмотками статора и ротора; $L_{13} = L_{31} = 1.5L_{m\phi} = L_m$ - взаимные индуктивности между обмотками статора (1),(3).

В системе уравнений (5) все векторы статорных величин записаны в неподвижной статорной системе координат x-y, а векторы роторных величин - во вращающейся роторной системе координат d-q. Переменные коэффициенты $L_m = f(\theta)$ являются результатом этого.

Метод пространственного вектора позволяет записать эти уравнения в одной системе координат α - β , вращающейся с синхронной скоростью $\omega_{0_{3n}}$. Переход от систем координат x-y и d-q в систему α - β осуществляется по формулам [2]:

$$\begin{cases} \dot{U}_{1\alpha-\beta}e^{j\Theta c} = R_{1}\dot{I}_{1\alpha-\beta}e^{j\Theta c} + \frac{d}{dt}(\dot{\Psi}_{1\alpha-\beta}e^{j\Theta c}); \\ 0 = R_{2}\dot{I}_{2\alpha-\beta}e^{j(\Theta c - \Theta 2)} + \frac{d}{dt}(\dot{\Psi}_{2\alpha-\beta}e^{j(\Theta c - \Theta 2)}); \\ 0 = R_{3}\dot{I}_{3\alpha-\beta}e^{j\Theta c} + \frac{d}{dt}(\dot{\Psi}_{3\alpha-\beta}e^{j\Theta c}) - jx_{c}\dot{I}_{3\alpha-\beta}e^{j\Theta c}; \\ \dot{\Psi}_{1\alpha-\beta}e^{j\Theta c} = L_{1}\dot{I}_{1\alpha-\beta}e^{j\Theta c} + L_{m}\dot{I}_{2\alpha-\beta}e^{j(\Theta c - \Theta 2)} + L_{m}\dot{I}_{3\alpha-\beta}e^{j\Theta c}; \\ \dot{\Psi}_{2\alpha-\beta}e^{j(\Theta c - \Theta 2)} = L_{m}e^{-j\Theta 2}\dot{I}_{1\alpha-\beta}e^{j\Theta c} + L_{2}\dot{I}_{2\alpha-\beta}e^{j(\Theta c - \Theta 2)} + \\ + L_{m}e^{-j\Theta 2}\dot{I}_{3\alpha-\beta}e^{j\Theta c}; \\ \dot{\Psi}_{3\alpha-\beta}e^{j\Theta c} = L_{m}\dot{I}_{1\alpha-\beta}e^{j\Theta c} + L_{m}e^{-j\Theta 2}\dot{I}_{2\alpha-\beta}e^{j(\Theta c - \Theta 2)} + \\ + L_{3}\dot{I}_{3\alpha-\beta}e^{j\Theta c}. \end{cases}$$

Углы Θ_C и Θ_2 являются функциями времени, в связи с чем их производные, входящие в уравнения (6), определяются следующим образом:

$$\begin{cases}
\frac{d}{dt} \left(\dot{\Psi}_{1\alpha-\beta} e^{j\Theta_C} \right) = \frac{d\dot{\Psi}_{1\alpha-\beta}}{dt} e^{j\Theta_C} + \dot{\Psi}_{1\alpha-\beta} e^{j\Theta_C} j \frac{d\Theta_C}{dt}; \\
\frac{d}{dt} \left(\dot{\Psi}_{2\alpha-\beta} e^{j(\Theta_C - \Theta_2)} \right) = \frac{d\dot{\Psi}_{2\alpha-\beta}}{dt} e^{j(\Theta_C - \Theta_2)} + \\
+ \dot{\Psi}_{2\alpha-\beta} e^{j(\Theta_C - \Theta_2)} j \frac{d(\Theta_C - \Theta_2)}{dt}; \\
\frac{d}{dt} \left(\dot{\Psi}_{3\alpha-\beta} e^{j\Theta_C} \right) = \frac{d\dot{\Psi}_{3\alpha-\beta}}{dt} e^{j\Theta_C} + \dot{\Psi}_{3\alpha-\beta} e^{j\Theta_C} j \frac{d\Theta_C}{dt}; \\
\frac{d\Theta_C}{dt} = \omega_{0ss}; \quad \frac{d\Theta_2}{dt} = P_n \omega; \\
\frac{d(\Theta_C - \Theta_2)}{dt} = \omega_{0ss} - P_n \omega = \omega_p,
\end{cases} \tag{7}$$

где $\omega_{_{0_{31}}}$ - угловая скорость вращающейся системы координат α - β , равная $\omega_{_{0_{31}}}=2\pi f_{_1}$; $P_{_n}\omega$ - угловая скорость ротора, эл. рад/с; $\omega_{_{\rm P}}$ - частота роторной ЭДС.

Подставляя (7) в (5), после соответствующих пре-

ЭСиК. №1(22). 2014 51

образований, опуская для упрощения записи индексы α - β , можно получить уравнения для описания электромагнитных процессов в пространственных векторах, вращающихся с синхронной скоростью вместе с вращающейся системой координат.

В этой системе уравнений фигурируют пространственный вектор напряжения $\dot{U}_{_1}$, приложенный к обмотке I статора, векторы падений напряжения в активных сопротивлениях обмоток статора и ротора $R_1\dot{I}_{_1}$, $R_2\dot{I}_{_2}$, $R_3\dot{I}_{_3}$ и падения напряжения на конденсаторе $jx_c\dot{I}_{_3}$, векторы ЭДС вращения $\omega_{_{031}}\dot{\Psi}_{_1}$, $\omega_{_p}\dot{\Psi}_{_2}$, $\omega_{_{031}}\dot{\Psi}_{_3}$, а также векторы трансформаторных ЭДС самоиндукции $\frac{d\dot{\Psi}_{_1}}{dt}$, $\frac{d\dot{\Psi}_{_2}}{dt}$, $\frac{d\dot{\Psi}_{_3}}{dt}$, появляющиеся в переходных процессах и связанные с изменением потокосцеплений.

$$\begin{cases} \dot{U}_{1} = R_{1}\dot{I}_{1} + \frac{d\dot{\Psi}_{1}}{dt} + j\omega_{0\infty}\dot{\Psi}_{1}; \\ 0 = R_{2}\dot{I}_{2} + \frac{d\dot{\Psi}_{2}}{dt} + j\omega_{p}\dot{\Psi}_{2}; \\ 0 = R_{3}\dot{I}_{3} + \frac{d\dot{\Psi}_{3}}{dt} + j\omega_{0\infty}\dot{\Psi}_{3} - jx_{c}\dot{I}_{3}; \\ \dot{\Psi}_{1} = L_{1}\dot{I}_{1} + L_{m}\dot{I}_{2} + L_{m}\dot{I}_{3}; \\ \dot{\Psi}_{2} = L_{m}\dot{I}_{1} + L_{2}\dot{I}_{2} + L_{m}\dot{I}_{3}; \\ \dot{\Psi}_{3} = L_{m}\dot{I}_{1} + L_{m}\dot{I}_{2} + L_{3}\dot{I}_{3}. \end{cases}$$
(8)

Четвертое, пятое и шестое уравнения системы (8) показывают связь пространственных векторов потокосцеплений обмоток статора и ротора с векторами токов \dot{I}_1 , \dot{I}_2 , \dot{I}_3 . В системе уравнений (8) внешними воздействиями являются вектор напряжения \dot{U}_1 на обмотке I статора и частота этого $\omega_{03}=2\pi f_1$.

В качестве выходных могут рассматриваться векторы токов или потокосцеплений в зависимости от требований к математическому описанию.

Для определения токов \dot{I}_1 , \dot{I}_2 , \dot{I}_3 через потокосцепления системы уравнений (8) воспользуемся методом Крамера. Главный определитель:

$$\Delta = \begin{vmatrix} L_1 & L_m & L_m \\ L_m & L_2 & L_m \\ L_m & L_m & L_3 \end{vmatrix} =$$

$$= L_1 L_2 L_3 + L_m^2 (2L_m - L_1 - L_2 - L_3).$$

Определители неизвестного x_i получаются из определителя Δ путем замены i-го столбца столбцом свободных членов:

$$\Delta_{1} = \begin{vmatrix} \dot{\Psi}_{1} & L_{m} & L_{m} \\ \dot{\Psi}_{2} & L_{2} & L_{m} \\ \dot{\Psi}_{3} & L_{m} & L_{3} \end{vmatrix} = \dot{\Psi}_{1}L_{2}L_{3} - \dot{\Psi}_{1}L_{m}^{2} +$$

$$+ \dot{\Psi}_{2}L_{m}^{2} - \dot{\Psi}_{3}L_{2}L_{m} - \dot{\Psi}_{2}L_{3}L_{m} - \dot{\Psi}_{3}L_{2}L_{m};$$

$$\Delta_{2} = \begin{vmatrix} L_{1} & \dot{\Psi}_{1} & L_{m} \\ L_{m} & \dot{\Psi}_{2} & L_{m} \\ L_{m} & \dot{\Psi}_{3} & L_{3} \end{vmatrix} = \dot{\Psi}_{2}L_{1}L_{3} + \dot{\Psi}_{1}L_{m}^{2} + + \dot{\Psi}_{3}L_{m}^{2} - \dot{\Psi}_{2}L_{m}^{2} - \dot{\Psi}_{1}L_{3}L_{m} - \dot{\Psi}_{3}L_{1}L_{m};$$

$$\Delta_{3} = \begin{vmatrix} L_{1} & L_{m} & \dot{\Psi}_{1} \\ L_{m} & L_{2} & \dot{\Psi}_{2} \\ L_{m} & L_{m} & \dot{\Psi}_{3} \end{vmatrix} = \dot{\Psi}_{3}L_{1}L_{2} + \dot{\Psi}_{2}L_{m}^{2} + + \dot{\Psi}_{1}L_{m}^{2} - \dot{\Psi}_{3}L_{m}^{2} - \dot{\Psi}_{1}L_{2}L_{m} - \dot{\Psi}_{2}L_{1}L_{m}.$$

Искомые токи обмоток:

$$\begin{split} \dot{I}_{_{1}} &= \dot{\Psi}_{_{1}} \frac{L_{_{2}}L_{_{3}} - L_{_{m}}^{\ 2}}{\Delta} - \dot{\Psi}_{_{2}} \frac{L_{_{3}}L_{_{m}} - L_{_{m}}^{\ 2}}{\Delta} - \\ &- \dot{\Psi}_{_{3}} \frac{L_{_{2}}L_{_{m}} - L_{_{m}}^{\ 2}}{\Delta}; \\ \dot{I}_{_{2}} &= \dot{\Psi}_{_{2}} \frac{L_{_{1}}L_{_{3}} - L_{_{m}}^{\ 2}}{\Delta} - \dot{\Psi}_{_{3}} \frac{L_{_{1}}L_{_{m}} - L_{_{m}}^{\ 2}}{\Delta} - \\ &- \dot{\Psi}_{_{1}} \frac{L_{_{3}}L_{_{m}} - L_{_{m}}^{\ 2}}{\Delta}; \\ \dot{I}_{_{3}} &= \dot{\Psi}_{_{3}} \frac{L_{_{1}}L_{_{2}} - L_{_{m}}^{\ 2}}{\Delta} - \dot{\Psi}_{_{2}} \frac{L_{_{1}}L_{_{m}} - L_{_{m}}^{\ 2}}{\Delta} - \\ &- \dot{\Psi}_{_{1}} \frac{L_{_{2}}L_{_{m}} - L_{_{m}}^{\ 2}}{\Delta}; \\ \text{ГДе} & L_{_{m}} &= 1,5L_{_{m\phi}}; \qquad L_{_{1}} &= L_{_{m}} + L_{_{\sigma1}}; \qquad L_{_{1}} &= L_{_{m}} + L_{_{\sigma2}}; \\ L_{_{1}} &= L_{_{m}} + L_{_{\sigma3}}. \end{split}$$

Тогда математическое описание динамических процессов в асинхронном двигателе с короткозамкнутым ротором и дополнительной обмоткой на статоре может быть представлено системой уравнений в следующем виде:

$$P\dot{\Psi}_{1} = \dot{U}_{1} - R_{1} \left(\dot{\Psi}_{1} \frac{L_{2}L_{3} - L_{m}^{2}}{\Delta} - \dot{\Psi}_{2} \frac{L_{3}L_{m} - L_{m}^{2}}{\Delta} - \dot{\Psi}_{3} \frac{L_{2}L_{m} - L_{m}^{2}}{\Delta} - \dot{\Psi}_{3} \frac{L_{2}L_{m} - L_{m}^{2}}{\Delta} \right) - j\omega_{033}\dot{\Psi}_{1};$$

$$P\dot{\Psi}_{2} = -R_{2} \left(\dot{\Psi}_{2} \frac{L_{1}L_{3} - L_{m}^{2}}{\Delta} - \dot{\Psi}_{3} \frac{L_{1}L_{m} - L_{m}^{2}}{\Delta} - \dot{\Psi}_{3} \frac{L_{2}L_{m} - L_{m}^{2}}{\Delta};$$

$$\dot{I}_{1} = \dot{\Psi}_{1} \frac{L_{2}L_{3} - L_{m}^{2}}{\Delta} - \dot{\Psi}_{2} \frac{L_{3}L_{m} - L_{m}^{2}}{\Delta} - \dot{\Psi}_{3} \frac{L_{2}L_{m} - L_{m}^{2}}{\Delta};$$

$$\dot{I}_{2} = \dot{\Psi}_{2} \frac{L_{1}L_{3} - L_{m}^{2}}{\Delta} - \dot{\Psi}_{3} \frac{L_{1}L_{m} - L_{m}^{2}}{\Delta} - \dot{\Psi}_{1} \frac{L_{2}L_{m} - L_{m}^{2}}{\Delta};$$

$$\dot{I}_{3} = \dot{\Psi}_{3} \frac{L_{1}L_{2} - L_{m}^{2}}{\Delta} - \dot{\Psi}_{2} \frac{L_{1}L_{m} - L_{m}^{2}}{\Delta} - \dot{\Psi}_{1} \frac{L_{2}L_{m} - L_{m}^{2}}{\Delta}.$$

Обозначим постоянные коэффициенты в формулах системы (10):

$$\begin{split} a_1 &= \frac{L_2 L_3 - L_m^2}{\Delta}; \quad a_2 = \frac{L_1 L_3 - L_m^2}{\Delta}; \quad a_3 = \frac{L_1 L_2 - L_m^2}{\Delta}; \\ a_4 &= \frac{L_3 L_m - L_m^2}{\Delta}; \quad a_5 = \frac{L_1 L_m - L_m^2}{\Delta}; \quad a_6 = \frac{L_2 L_m - L_m^2}{\Delta}; \\ \Delta &= L_1 L_2 L_3 + L_m^2 (2L_m - L_1 - L_2 - L_3). \end{split}$$

Для перехода от системы уравнений (10) к описанию электромеханических процессов в асинхронном электроприводе с энергосберегающим двигателем в пространственных векторах через их проекции на оси координат α - β проделаем следующее:

- введем коэффициенты $a_1 a_6$ и Δ в уравнения (10);
- разделим вещественные и мнимые части равенств системы (10);
- добавим выражение для электромагнитного момента;
- запишем уравнения движения электропривода для абсолютно жесткой механической части;
- добавим выражение скорости ротора в электрическом пространстве.

Тогда получим систему уравнений для построения структурной схемы в виде:

$$\begin{split} & \left\{ P\Psi_{1\alpha} = u_{1\alpha} + \omega_{03\pi} \Psi_{1\beta} - a_1 R_1 \Psi_{1\alpha} + a_4 R_1 \Psi_{2\alpha} + a_6 R_1 \Psi_{3\alpha}; \right. \\ & \left. P\Psi_{1\beta} = u_{1\beta} - \omega_{03\pi} \Psi_{1\alpha} - a_1 R_1 \Psi_{1\beta} + \right. \\ & \left. + a_4 R_1 \Psi_{2\beta} + a_6 R_1 \Psi_{3\beta}; \right. \\ & \left. P\Psi_{2\alpha} = a_4 R_2 \Psi_{1\alpha} + a_5 R_2 \Psi_{3\alpha} - \right. \\ & \left. - a_2 R_2 \Psi_{2\alpha} + \omega_p \Psi_{2\beta}; \right. \\ & \left. P\Psi_{2\beta} = a_4 R_2 \Psi_{1\beta} + a_5 R_2 \Psi_{3\beta} - a_2 R_2 \Psi_{2\beta} - \omega_p \Psi_{2\alpha}; \right. \\ & \left. P\Psi_{3\alpha} = -a_3 R_3 \Psi_{3\alpha} - a_3 x_c \Psi_{3\beta} + a_5 R_3 \Psi_{2\alpha} + \right. \\ & \left. + a_5 x_c \Psi_{2\beta} + a_6 x_c \Psi_{1\beta} + \right. \\ & \left. + a_6 R_3 \Psi_{1\alpha} + \omega_{03\pi} \Psi_{3\beta}; \right. \\ & \left. P\Psi_{3\beta} = -a_3 R_3 \Psi_{3\beta} + a_3 x_c \Psi_{3\alpha} + a_5 R_3 \Psi_{2\beta} - \right. \\ & \left. - a_5 x_c \Psi_{2\alpha} - a_6 x_c \Psi_{1\alpha} + \right. \\ & \left. + a_6 R_3 \Psi_{1\beta} - \omega_{03\pi} \Psi_{3\alpha}; \right. \\ & \left. i_{1\alpha} = a_1 \Psi_{1\alpha} - a_4 \Psi_{2\alpha} - a_6 \Psi_{3\alpha}; \right. \\ & \left. i_{1\beta} = a_1 \Psi_{1\beta} - a_4 \Psi_{2\beta} - a_6 \Psi_{3\beta}; \right. \\ & \left. i_{2\alpha} = a_2 \Psi_{2\alpha} - a_5 \Psi_{3\alpha} - a_4 \Psi_{1\alpha}; \right. \\ & \left. i_{2\beta} = a_2 \Psi_{2\beta} - a_5 \Psi_{3\beta} - a_4 \Psi_{1\beta}; \right. \\ & \left. i_{3\alpha} = a_3 \Psi_{3\alpha} - a_5 \Psi_{2\alpha} - a_6 \Psi_{1\beta}; \right. \\ & \left. i_{3\beta} = a_3 \Psi_{3\beta} - a_5 \Psi_{2\beta} - a_6 \Psi_{1\beta}; \right. \\ & \left. i_{3\beta} = a_3 \Psi_{3\beta} - a_5 \Psi_{2\beta} - a_6 \Psi_{1\beta}; \right. \\ & \left. M_{3M} = \frac{3}{2} P_n \frac{k_1}{\sigma L_2} (\Psi_{1\beta} \Psi_{2\alpha} - \Psi_{1\alpha} \Psi_{2\beta}); \right. \\ & \left. p\omega = \frac{1}{J} (M_{3M} - M_C); \qquad \omega_p = \omega_{03\pi} - P_n \omega, \end{split}$$

где J - момент инерции электропривода; $M_{\rm C}$ - момент статической нагрузки; $k_{\rm l}=L_{\!\!\!m}\,/\,L_{\!\!\!\!l}$, $\sigma=\!1\!-\!L_{\!\!\!\!l}L_{\!\!\!2}$.

Значения модулей векторов токов и потокосцеплений обмоток статора и ротора можно рассчитать по формулам:

$$\begin{split} I_{1m} &= \sqrt{i_{1\alpha}^2 + i_{1\beta}^2} \, ; \ \, I_{2m} = \sqrt{i_{2\alpha}^2 + i_{2\beta}^2} \, ; \ \, I_{3m} = \sqrt{i_{3\alpha}^2 + i_{3\beta}^2} \, ; \\ \Psi_{1m} &= \sqrt{\Psi_{1\alpha}^2 + \Psi_{1\beta}^2} \, ; \ \, \Psi_{2m} = \sqrt{\Psi_{2\alpha}^2 + \Psi_{2\beta}^2} \, ; \ \, \Psi_{3m} = \sqrt{\Psi_{3\alpha}^2 + \Psi_{3\beta}^2} \, , \end{split}$$

и действующие значения токов и потокосцеплений

$$I = I_{m} / \sqrt{2}; \qquad \Psi = \Psi_{m} / \sqrt{2},$$

Структурная схема асинхронного электропривода с энергосберегающим двигателем представлена на **рис. 2**. В ней можно выделить блоки определения проекций векторов потокосцеплений обмоток I, J статора и обмотки 2 ротора, блоки вычисления проекций векторов токов обмоток, блок формирования электромагнитного момента двигателя с реализацией уравнения движения электропривода. Входными воздействиями являются проекции вектора напряжения на статоре $\dot{U}_1 = u_{1\alpha} + ju_{1\beta}$, а выходными величинами - электромагнитный момент двигателя и скорость ротора ω в физическом пространстве. Схема описывает процессы, происходящие в асинхронной машине, в которой действуют трехфазные переменные величины синусоидальной формы.

Следует особо отметить, что в результате описания динамики асинхронного электропривода в системе пространственных векторов вместе с системой осей координат α - β , вращающихся со скоростью $\omega_{0_{33}}$, все переменные и входные воздействия в блоке формирования момента представляют собой сигналы постоянного тока. В стационарном режиме эти сигналы остаются неизменными и изменяются при возникновении переходных процессов, вызванных изменением входных воздействий (напряжения, частоты, напряжения и частоты), и возмущающих воздействий (момента статических сопротивлений, момента инерции электропривода).

При использовании структурной схемы в качестве объекта управления возможны два случая:

- 1. Система векторного управления, в которой регулирование осуществляется путем изменения частоты с одновременным воздействием на модуль и фазу напряжения на статоре \dot{U}_1 . В этом случае на вход системы надо подавать обе проекции вектора $\dot{U}_1 = u_{1\alpha} + ju_{1B}$.
- 2. Система управления разомкнутая или замкнутая, в которых при изменении частоты изменяется только модуль напряжения $\dot{U}_{\scriptscriptstyle 1}$. В этом случае следует направить ось α вращающейся системы координат по вектору напряжения статора. При этом $\dot{U}_{\scriptscriptstyle 1}=u_{\scriptscriptstyle 1\alpha}$, $u_{\scriptscriptstyle 18}=0$.

Для иллюстрации использования разработанной структурной схемы асинхронного электропривода с энергосберегающим двигателем (рис. 2) приводятся результаты расчета прямого пуска двигателя вхолостую от нуля до скорости ω =157 рад/с при ступенчатом задании частоты $\omega_{0 \text{эл}}$ =314 рад/с и напряжения $\dot{U}_1 = u_1 \omega = \sqrt{2} \cdot 220$ =311 В, u_{18} =0 с последующим набросом мо-

мента нагрузки $M_c=M_H$ (рис. 3). Основные параметры энергосберегающего асинхронного двигателя, реконструированного на основе двигателя 4A225M4V3, следующие:

 $P_{
m H}$ =55 кВт, номинальное фазное напряжение $U_{
m 1H}$ =220 В; $I_{
m 1H}$ =100,1 А; $f_{
m 1H}$ =50 Гц; $\omega_{
m 0_{
m 3H}}$ =314 1/c; чило пар полюсов $P_{
m II}$ =2; $\omega_{
m 0}$ =157 1/c; $L_{
m m}$ =0,065509 Гн;

 L_1 =0,065828 Гн; L_2 =0,066019 Гн; L_3 =0,065764 Гн; R_1 =0,055 Ом; R_2 =0,065 Ом; R_3 =0,042 Ом; x_C =10 Ом. $L_{\sigma 1}$ =0,00031 Гн; $L_{\sigma 2}$ =0,00051 Гн; $L_{\sigma 3}$ =0,00025 Гн;

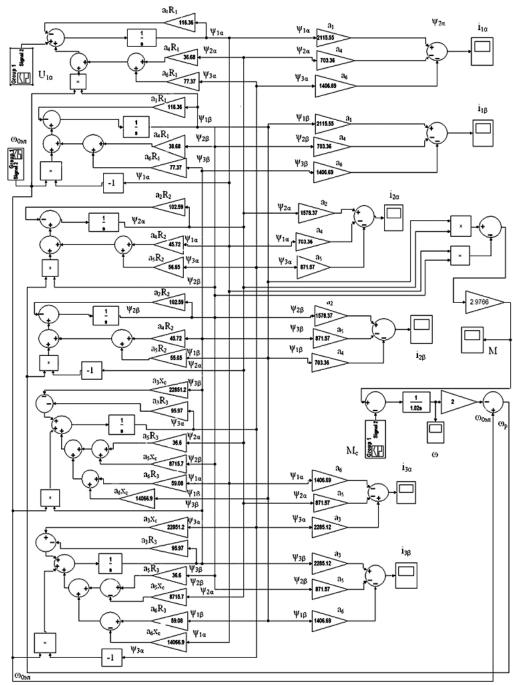


Рис. 2. Структурная схема асинхронного электропривода с энергосберегающим двигателем

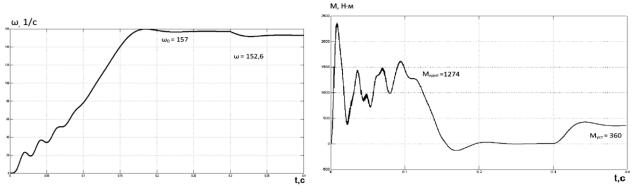


Рис. 3. Осциллограммы переходных процессов пуска и наброса нагрузки асинхронного электропривода с энергосберегающим двигателем

Выводы

- 1. Для системы асинхронного электропривода с энергосберегающим двигателем получено математическое описание динамических режимов с использованием метода пространственных векторов.
- 2. Предложена структурная схема электропривода для расчета переходных процессов в разомкнутой системе в режиме прямого пуска и наброса нагрузки.

Список литературы

- 1. Математическое описание стационарного режима работы электропривода с энергосберегающим асинхронным двигателем / В.И. Косматов, Р.Г. Мугалимов, Е.А. Провоторов, В.В. Танич // Электротехнические системы и комплексы: междунар. сб. науч. трудов. Вып. 20. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. тех. ун-та им. Г.И. Носова, 2012.
- 2. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием: учебник для студ. высш. учеб. заведений. М.: Издательский центр «Академия», 2006. 272 с.

INFORMATION IN ENGLISH

THE BLOCK DIAGRAM AND DYNAMICS OF THE ELECTRIC DRIVE WITH THE ENERGY SAVING INDUCTION MOTOR AT THE ARBITRARIEST ORIENTATION OF ROTATING COORDINATE SYSTEM

Kosmatov V.I., Zinoviev A.M., Kochergin G.G., Karpova U.V.

In the work the mathematical description of electromechanical and electromagnetic processes transient regimes of the electric drive on the basis of the energy saving induction motor (ESIM) with individual compensation of a wattless power is considered. The mathematical description is executed with the method of space vectors with use of the continuants theory. The block diagram of the electric drive is made, calculations of transient phenomenons are made, oscillograms of dependences of speed and the electromagnetic moment of ESIM are received at direct start-up and loadings.

Keywords: Compensated, asynchronous, the engine, a method of space vectors, continuants, the block diagram, mathematical model, oscillograms.

REFERENCES

- 1. Kosmatov V.I., Mugalimov R.G., Provorotov E.A., Tanich V.V. Matematicheskoe opisanie statsionarnogo regima raboty electroprivoda s energosberegayushim asinkhronnim dvigatelem [Mathematical description of the steady-state operation of the electric induction motor with energy saving]. *Elektrotekhnicheskie sistemy i kompleksy* [Electrical systems and complexes]: intern. collection of scientific papers. Issue 20. Magnitogorsk: Publishing house of Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2012.
- 2. Sokolovsky G.G. Elektroprivody peremennogo toka s chastotnim regulirovaniem [AC drives with frequency control]: a textbook for the institutions of higher education. Moscow: Publishing Center "Academy", 2006. 272 p.

ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ

УДК 681.518.5

Ишметьев Е.Н., Панов А.Н., Романенко А.В., Васильев Е.Ю., Коробейников С.М.

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СТАЦИОНАРНЫХ СИСТЕМ ВИБРОКОНТРОЛЯ И ВИБРОЛИАГНОСТИКИ

Потребность в стационарых системах контроля и анализа вибрации различных машин и агрегатов неуклонно растет. Компания ЗАО «КонсОМ СКС», обладая собственной технической и научной базой в области неразрушающего контроля и технической диагностики, внедряет системы виброконтроля и вибродиагностики в различных отраслях промышленности. Системами виброконтроля оснащены планетарные редукторы, шестеренные клети приводов прокатных станов, опоры промежуточных валов, опоры двигателей, опоры насосов.

По результатам работы систем виброконтроля эксплутационные службы существенно увеличивают межремонтные интервалы, отслеживают фактическое техническое состояние оборудования, обоснованно планируют ремонтные работы. Внедренные системы оценивают как уровень среднеквадратичного значения виброскорости согласно ГОСТ 10816-1-1997, так и амплитудные значения виброскорости на частотах, рассчитываемых для характерных дефектов объектов контроля.

Ключевые слова: стационарная система виброконтроля, датчик вибрации, вибродиагностика, дефект, мониторинг, мнемосхема, среднеквадратическое значение.

Стационарные системы виброконтроля и вибродиагностики являются востребованными и необходимыми для предприятий различных отраслей промышленности: энергетики, нефтяной и газовой промышленности, химических и металлургических производств, транспорта.

Компания ЗАО «КонсОМ СКС», обладая собственной лабораторией неразрушающего контроля и специалистами с большим опытом работы по данному профилю, внедряет стационарные системы контроля и анализа вибрации на промышленных предприятиях последние пять лет. Подобные системы предназначены для контроля вибрационного состояния оборудования и его вращающихся частей. В системах данного вида датчики вибрации, согласующие усилители, устройства обработки и хранения данных установлены постоянно, а сбор данных осуществляется в непрерывном режиме.

Цель систем виброконтроля и вибродиагностики — своевременное распознавание отклонения состояния оборудования от нормального, чтобы выполнить корректирующие действия до того, как дефекты в различных частях оборудования приведут к ухудшению качества его работы, сокращению срока службы или аварийному останову.

Основными функциями системы виброконтроля

- сбор данных с датчиков вибрации и сигналов смежных АСУ ТП, таких как токи, скорости, температура, давление масла;
- контроль любых вибрационных параметров в режиме on-line (например, среднеквадратичное значение скорости, среднеквадратичное значение ускорения и перемещения, пиковое значение и размах перемещения и лр.);
- формирование архива значений вибрационных и других технологических параметров оборудования (базы данных):
- предупредительная сигнализация при регистрации аномальных вибрационных состояний в соответствии с требованиями ПТЭ и ГОСТ;
- построение текущих и архивных графиков вибропа-

раметров и сигналов АСУТП (трендов);

- отображение данных на APM пользователей в удобном для восприятия виде (мнемосхемы);
- интеграция с существующими системами АСУ ТП.

В состав системы входят:

- датчики вибрации, установленные стационарно в «узких местах» объекта контроля;
- программируемый контроллер;
- сервер и рабочие станции пользователей;
- программное обеспечение системы.

АРМ вибромониторинга обеспечивает визуализацию вибрационных и других технологических параметров состояния оборудования на мнемосхеме. АРМ реализуется с использованием Flash-технологии и технологии «тонкий клиент», поэтому не требует установки дополнительных программных средств — все экранные формы открываются в виде обычных webстраниц с помощью стандартных браузеров, например Microsoft Internet Explorer.

Наиболее распространенными объектами контроля вибрационного состояния являются элементы электропривода, в частности редукторы, двигатели, опоры промежуточных валов, подшипники качения и скольжения.

Датчики вибрации постоянно регистрируют виброускорение на невращающихся частях объектов контроля (частота работы преобразователя 100 кГц). Электронные диагностические приборы принимают эти сигналы и рассчитывают амплитуды диагностируемых объектов на частотах, характерных для различных видов дефектов, которые автоматически корректируются в зависимости от скорости вращения двигателей. Дальнейшая обработка, хранение и представление информации осуществляется на сервере. Передача информации об уровне вибрации осуществляется с электронных диагностических приборов на сервер опроса посредством интерфейса Ethernet по технологии OPC.

Работа с тегами (вычисление, формирование событий, архивирование данных.) осуществляется на сервере опроса посредством специализированного программного комплекса разработки ЗАО «КонсОМ СКС».

Для количественной оценки механических колебаний можно использовать различные параметры: размах, пиковое значение, среднее значение, среднеквадратическое значение. Среднеквадратическое значение (СКЗ) является самым важным параметром, так как в нем учитывается временное развитие исследуемых колебаний, и оно непосредственно отображает значение, связанное с энергией сигнала и, следовательно, разрушающей способностью этих колебаний. Согласно ГОСТ ИСО 10816-1-1997 среднеквадратичное значение (СКЗ) виброскорости, измеряемое в частотном диапазоне 10 – 1000 Гц, наиболее точно отображает опасность механических колебаний. Данный стандарт является базовым документом для разработки руководств по измерению и оценке вибрации машин. В нем приведены примерные критерии оценки для машин различных классов. В большинстве случаев контролируемое металлургическое оборудование относится ко 2 классу по ГОСТ ИСО 10816-1-1997.

В ГОСТ ИСО 10816-1-1997 для второго класса оборудования установлены предельные уровни вибрации, превышение которых в установившемся режиме работы машины приводит к подаче сигналов «ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ» или «РЕКОМЕНДУЕТСЯ ОСТАНОВ». Графическое отображение состояния оборудования на мнемосхеме (элементы агрегата подсвечиваются различными цветами в зависимости от уровня вибрации), регистрируемого системой:

- 1) зеленый уровень вибрации (0-1,8) в допустимых пределах;
- 2) желтый уровень вибрации (1,8-4,5) соответствует режиму «ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ» о превышении уровня вибрации выше допустимых;
- 3) красный уровень вибрации (более 4,5) соответствует режиму «РЕКОМЕНДУЕТСЯ ОСТАНОВ».

На **рис. 1** представлена действующая мнемосхема стационарной системы виброконтроля планетарных редукторов привода агломашины №8 аглофабрики №2 ОАО «ММК». Датчики вибрации установлены для контроля входного и выходного подшипников, а также для контроля всех четырех планетарных передач. Отслеживается СКЗ виброскорости согласно ГОСТ ИСО 10816-1-1997 и СКЗ виброскорости на частоте дефектов подшипников сателлитов.

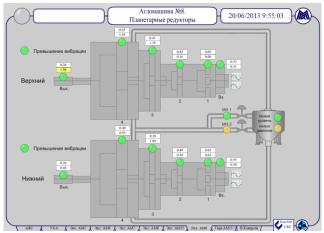


Рис. 1. Мнемосхема системы виброконтроля планетарных редукторов привода агломашины №8 аглофабрики №2 ОАО «ММК»

После запуска в работу стационарной системы виброконтроля планетарных редукторов обслуживающим персоналом был увеличен межремонтный интервал с шести до восьми месяцев на основании собранных данных в течение полугода.

На **рис. 2** представлена мнемосхема системы виброконтроля шестеренной клети №1 стана-тандем холодной прокатки ЛПЦ №11 OAO «ММК».

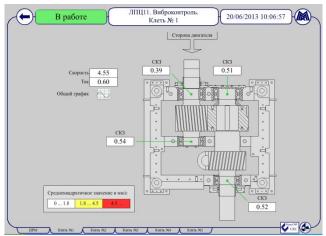


Рис. 2. Мнемосхема системы виброконтроля шестеренной клети №1 стана-тандем холодной прокатки ЛПЦ №11 OAO «ММК»

На клети №1-5 стана-тандем холодной прокатки ЛПЦ №11 ОАО «ММК» были установлены двадцать датчиков вибрации, контролирующих уровень вибрации на подшипниковых узлах, из расчета четыре датчика вибрации на одну шестеренную клеть.

Одним из способов оперативной оценки состояния механизма по среднеквадратичному значению виброскорости является комплексный анализ трендов СКЗ виброскорости, токов и скорости привода. Совмещенные графики этих параметров представлены на рис. 3.

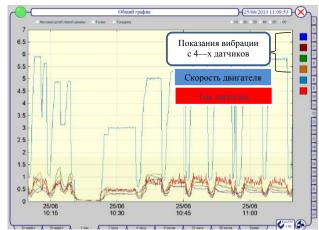


Рис. 3. Совмещенные графики СКЗ виброскорости, скорости двигателя и тока нагрузки

На **рис. 4** представлена мнемосхема системы виброконтроля привода изгибо-растяжной машины ЛПЦ №11 OAO «ММК».

Четыре датчика вибрации установлены на двигателях, по три датчика располагаются на корпусе согласующего редутора (контроль состояния входного и двух выходных подшипников качения), а также по одному датчику на опорах валов. Регистриуются только

СКЗ виброскорости согласно ГОСТ ИСО 10816-1-1997.

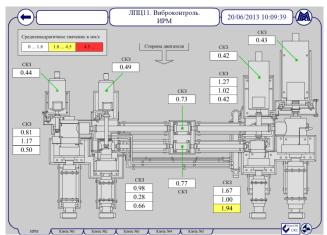


Рис. 4. Мнемосхема системы виброконтроля привода изгибо-растяжной машины ЛПЦ №11 OAO «ММК»

На рис. 5-6 представлены мнемосхемы системы виброконтроля привода чистовой группы клетей №5-11 стана 2500 горячей прокатки ОАО «ММК». Датчиками вибрации оборудованы опоры двигателей, опоры промежуточных валов, редукторы клетей №5-6, шестеренные клети. Также для осуществления мониторинга состояния подшипников скольжения в опорах, шестеренных клетях, опорах двигателей установлены датчики температуры. Предусмотрена возможность одновременного отображения параметров вибрации, токов нагрузки, температуры и скоростей приводов.

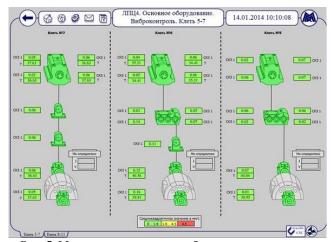


Рис. 5. Мнемосхема системы виброконтроля привода чистовой группы клетей №5-№7 стана 2500 горячей прокатки ОАО «ММК»

Также хорошо поддается контролю и диагностике по сигналам вибрации оборудование горнообогатительного производства. На **рис. 7** представлена мнемосхема стационарной системы виброконтроля землесоса «ССГПО» (г. Рудный, Казахстан).

Датчики вибрации установлены на опорах двигателя и насоса. Также один датчик вибрации расположен на внешнем корпусе самого насоса. Стационарной

системой виброконтроля регистрируются уровни СКЗ вибкросокорсти согласно ГОСТ ИСО 10816-1-1997 и СКЗ виброскорости на частоте дефекта «дисбаланс» и несоосность.

Для повышения достоверности информации о техническом состоянии машины или механизма необходимо применять дополнительные инструменты. Примером такого инструмента может быть характеристика прецессии вала в подшипниках скольжения, так называемая «Орбита». Для построения графика орбиты вала проводится измерение вибрации вала относительно неподвижной части подшипника в двух взаимноперпендикулярных направлениях. Тенденция изменения орбиты будет говорить о степени износа вкладышей подшипников

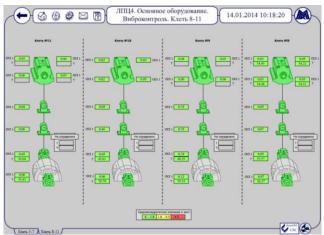


Рис. 6. Мнемосхема системы виброконтроля привода чистовой группы клетей №8-№11 стана 2500 горячей прокатки ОАО «ММК»

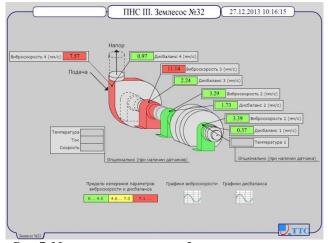


Рис. 7. Мнемосхема системы виброконтроля землесоса

В настоящее время специалистами ЗАО «КонсОМ СКС» ведется разработка стационарной системы измерения и отображения графика орбиты вала. Данная система, в совокупности с системой измерения абсолютной вибрации, позволит однозначно определять состояние подшипниковых узлов. Внедрений этой системы планируется в 2014 году в ЛПЦ-4 ОАО «ММК».

INFORMATION IN ENGLISH

PRACTICAL EXPERIENCE OF AUTOMATED STATIONARY VIBRATION CONTROL AND VIBRATION DIAGNOSTICS SYSTEM APPLICATION

Ishmetyev E.N., Panov A.N., Romanenko A.V., Vasilyev E.Yu., Korobeynikov S.M.

The demand for automated stationary vibration control and vibration diagnostics systems of various machines and units is growing steadily. CJSC «KonsOM SKS» has its own technical and scientific base in the field of Non-Destructive testing and Technical diagnostics and introduces the systems of vibration control and vibration diagnostics to various industries. Vibration control systems are implemented into planetary gears, gear drives of rolling mill stands, intermediate shaft bearings, engine mounts and bearing pumps.

After the introduction of vibration control systems opera

tional services significantly increased maintenance intervals. Now they can monitor actual technical condition of the equipment and plan repairs reasonably. The implemented system evaluate both the level of RMS velocity according to ISO 10816-1-1997 and peak values of vibration velocity at frequencies calculated for characteristic defects of the controlled objects.

Keywords: stationary vibration control system, vibration sensor, vibration diagnostics, defect, monitoring, mnemocircuit, mean square root.

УДК 621.313.2

Завьялов А.С., Завьялов Е.А., Сарваров А.С., Петушков М.Ю.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИГНАТУРНОГО АНАЛИЗА В ДИАГНОСТИКЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА

В статье рассматриваются существующие способы диагностики электродвигателей постоянного тока. Описаны требования к способу диагностики электродвигателя постоянного тока. Предлагается использовать сигнатурный анализ в сочетании с классическими способами диагностики.

Ключевые слова: двигатель постоянного тока, сигнатурный анализ, диагностика, полином.

Актуальность работы

Несмотря на то, что на текущий день в промышленности электродвигатели постоянного тока постепенно уступают место асинхронным двигателям с частотным регулированием, в распоряжении предприятий по экономическим причинам в эксплуатации остаётся значительное количество двигателей постоянного тока. В процессе эксплуатации электродвигателей неизбежно возникают отказы, что приводит к нарушению технологического процесса, а следовательно, к экономическим потерям предприятия. Для того чтобы снизить количество отказов электродвигателя постоянного тока, требуется постоянный мониторинг технического состояния электродвигателя с последующим использованием полученной информации для проведения диагностики.

Введение

Выделяют два вида диагностирования: тестовый и функциональный. Тестовая диагностика характеризуется тем, что проводится на отключенном от сети электродвигателе. Недостатками такого метода являются низкая эффективность, связанная, прежде всего, с тем, что тестовое диагностирование по определению определяет работоспособное состояние. И не может выявить неисправности, свойственные рабочему режиму. Автоматизация процесса также не высока. Напротив, функциональная диагностика выполняется на работающем электродвигателе, что позволяет определять

его ресурс и проводить техническое обслуживание электродвигателя по состоянию вместо планового обслуживания.

Можно выделить несколько видов диагностики электродвигателей постоянного тока: вибрационная диагностика, тепловизионный контроль, поиск частичных разрядов при помощи специализированных датчиков, изучение спектра тока якоря. Вибродиагностика и изучение спектра тока якоря позволяют диагностировать наибольшее количество дефектов из перечисленных методов. Данные методы могут применять совместно с целью выявления наибольшего количества дефектов.

В общем случае в токе якоря могут присутствовать ряды гармонических составляющих с частотами kf_n , $2kpf_n$, kf_{z_n} , kf_{z_v} и, в зависимости от наличия разных дефектов электромагнитной системы электродвигателя постоянного тока, с боковыми составляющими, отличающимися на частоты $\pm kf_n$, $\pm 2kpf_n$, $\pm kf_{z_n}$.

Недостатком этих методов является использование больших объёмов информации, что не всегда удовлетворяет требованиям технологического процесса относительно быстрого поиска неисправности и последующего её устранения [2].

Диагностические признаки основных дефектов МПТ при их диагностике по спектрам вибрации и/или тока якоря сведены в **таблицу**. В ней приведены частоты тех составляющих вибрации и тока якоря, которые растут при появлении и росте указанных дефектов.

Частоты составляющих вибраций и тока якоря, как диагностических признаков дефектов электродвигателя постоянного тока и пульсаций

напряжения	и питания
	D

Название дефекта	Рост гармоник вибрации	Рост гармоник тока	Примечание
Статический эксцентриситет зазора, перекос полюсов	$f_{Z_R}, f_{Z_V} $ (R, T)	$f_{\scriptscriptstyle Z_{\!\scriptscriptstyle R}}, f_{\scriptscriptstyle Z_{\!\scriptscriptstyle V}}$	Рост вибрации при смене нагрузки
Дефекты обмоток якоря, обрыв пластины коллектора	$ 2pf_{r} \\ kf_{zs} \pm k_{1}f_{r} \\ kf_{zv} \pm 2pf_{r} \\ (R, T) $	$ 2 p f_n k f_{z_n} \pm k_1 f_n k f_{z_v} \pm 2 p f_n $	
Дефекты обмоток возбуждения	kf _{zv} (R, T)	$k\!f_{_{Z u}}$	Слабая зависимость от нагрузки
Дефекты коммутации	$kf_{z_{V}}$ (R, T)	$k\!f_{\scriptscriptstyle Z_{\scriptscriptstyle u}}$	Рост при смене на- грузки
Износ щеток коллектора, бой коллектора	$k_1 f_{Zv} \pm k_2 f_{rt}$ (R, T)	$k_{\scriptscriptstyle 1} f_{\scriptscriptstyle Z\nu} \pm k_{\scriptscriptstyle 2} f_{\scriptscriptstyle rt}$	
Пульсации напряжения питания	kf ₁ (R, T)	$k\!f_{\scriptscriptstyle 1}$	

Примечание: f_1 — частота в сети питания выпрямителя, Γ ц; f_n — частота вращения якоря, Γ ц; $f_{Z_8}=f_nZ_{_8}$ — зубцовая частота, Γ ц; $Z_{_8}$ — число пазов якоря; $f_{Z_9}=f_nZ_{_9}$ — коллекторная частота, Γ ц; $Z_{_9}$ — число пластин коллектора; p — число пар полюсов k_1,k_2,k_3 … — целые числа; R,T — радиальное и тангенциальное направления возбуждения вибрации [1].

Диагностируемые параметры

Диагностика электромагнитных систем электрических машин может вестись по целому ряду электрических, магнитных, тепловых, шумовых и вибрационных параметров, однако параметры магнитного поля и возбуждаемого машиной воздушного шума используются для диагностики крайне редко. Магнитное поле машины экранировано корпусом, и для достоверной диагностики необходимо встраивать датчики поля внутрь корпуса, что не всегда экономически оправдано.

Тем не менее, достоверная информация об актуальных электромагнитных параметрах представляет ценность, поскольку позволяет судить о его техническом состоянии и при необходимости вносить коррективы в технологический процесс. К тому же, при работе электродвигателя текущие значения параметров определяются режимом нагрузки и, следовательно, тепловым состоянием электродвигателя постоянного тока. Поэтому знание текущих значений координат двигателя необходимо, чтобы проводить диагностику электродвигателя, а также управлять им.

Требования, предъявляемые к системе диагностики электродвигателя постоянного тока:

- 1. Достоверная диагностика распространённых дефектов электродвигателя постоянного тока.
- 2. Возможность адаптации системы под конкретный электропривод постоянного тока с учётом параметров технологического процесса.
- 3. Достоверный подсчёт внутренних параметров электродвигателя.
- 4. Быстродействие вычислений.
- 5. Удобство работы с большим объёмом диагностических данных.
- 6. Сжатие данных с целью оптимизации процесса об-

работки данных.

Исходя из данных требований, была разработана схема системы диагностики, представленная на **рис. 1**.

Структура комплекса диагностики электродвигателя постоянного тока мощностью 90 кВт

В представленной схеме используется электродвигатель постоянного тока с независимым возбуждением. Электродвигатель питается от напряжения $U_{\text{пит}}$, снимаются следующие его координаты: ток якоря (с помощью датчиков тока ДТ с пределом измерения 2000 А), напряжения (с помощью датчиков напряжения ДН с пределом измерения 1500 В), угловая скорость (с помощью датчика угловой скорости ДС), электромагнитные параметры (с помощью электромагнитного регистратора ЭМР).

С датчиков данные поступают на входы соответствующих согласующих блоков. Значения угловой скорости поступают на вход блока формирования импульсов Б1, данные электромагнитных измерений поступают на вход масштабирующего усилителя Б2, значения токов и

напряжений поступают на вход масштабирующего усилителя БЗ. С выходов блоков Б2 и БЗ данные поступают на вход аналого-цифрового преобразователя АЦП. Поскольку на выходе блока Б1 мы имеем последовательность импульсов, то аналого-цифрового преобразования для угловой скорости не требуется. После АЦП данные поступают в устройство ввода-вывода УВВ. Работой АЦП и УВВ управляет микропроцессор, в состав которого входит тактовый генератор. По интерфейсу USВ с устройства ввода-вывода данные поступают в персональный компьютер ПК, на котором установлено специализированное программное обеспечение.

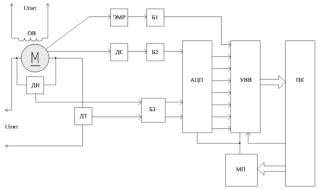


Рис. 1. Функциональная схема диагностики двигателя постоянного тока

Программное обеспечение осуществляет приём обработанных данных с датчиков и регистратора с выхода устройства ввода-вывода, обработку информации методом сигнатурного анализа. После обработки входных данных методом сигнатурного анализа происходит сравнение данных с работающего электродвигателя с эталонными данными исправного электродвигате-

ля. Кроме того, ПК передаёт микропроцессору необходимые команды для управления режимом работы АЦП и УВВ. Также в ПК хранится база данных неисправностей, на основании которой выполняется анализ входной последовательности данных и принимается решение о наличии или отсутствии дефекта в диагностируемом электродвигателе.

Сигнатурный анализ

Для сложных вычислительных систем, обладающих большим объемом памяти и разветвленной логикой, объемы диагностической информации могут оказаться очень большими и потребовать неприемлемых аппаратурных и временных затрат. В этом случае применяется сжатие диагностической информации. Основным методом сжатия является сигнатурный анализ.

Сжатие информации заключается в том, что *п*-разрядный вектор выходных сигналов с устройства формирования последовательности по какому-то правилу (алгоритму) заменяется вектором с существенно меньшим числом разрядов. Такая же операция производится и с эталонным вектором. Уменьшение числа разрядов сравниваемых векторов существенно уменьшает аппаратурные и временные затраты. Однако при этом имеет место потеря некоторой информации, в результате чего ряд неисправностей электродвигателя не будут обнаружены. На практике применяются такие способы сжатия информации, которые лишь незначительно уменьшают вероятность обнаружения неисправности.

Входящие данные с устройства формирования последовательности можно представить как двоичный вектор выходных сигналов разрядностью n, которые можно преобразовать в многочлен f(x) степени (n-1) относительно переменной x, расположенный по убывающим степеням с коэффициентами 0 и 1, т.е. полином. При делении многочлена f(x) на g(x) справедливо равенство

$$f(x) = g(x) \cdot q(x) + p(x),$$

где f(x) — делимое; g(x) — делитель; q(x) — частное; p(x) - остаток.

Если степень f(x) равна n, степень g(x) равна r, то степень частного q(x) равна n-r, а степень остатка p(x) меньше, чем r.

Таким образом, операция деления уменьшает степень многочлена, т.е. уменьшает число разрядов соответствующих двоичных векторов. Поэтому она применяется для сжатия двоичной информации. При этом в качестве «сжатого» вектора используется остаток p(x), который называется сигнатурой.

Если многочлен f(x) соответствует эталонному вектору выходных сигналов, то при делении его на некоторый делитель g(x) формируется строго определенный остаток p(x), который принимается за эталонную сигнатуру.

Выходная последовательность f(x) при помощи схемы делителя сжимается, например, в 16-разрядный вектор. Полученная сигнатура — реакция сравнивается с эталонной сигнатурой. Неисправности в электродвигателе искажают последовательность f(x) и, следовательно, сигнатуру p(x).

Применение метода сигнатурного анализа для диагностики электродвигателей постоянного тока

Сигнатурный анализ возможно использовать как для методов тестовой диагностики, так и для методов функциональной диагностики, поскольку использование сигнатурного анализа позволяет сократить время проведения диагностики оборудования, а следовательно, выявить дефект до наступления необратимых последствий. Сигнатурный анализ осуществляется программным методом с применением специализированного программного обеспечения. Для использования метода сигнатурного анализа первоначально необходимо использовать заведомо исправный электродвигатель постоянного тока, для того чтобы составить базу данных эталонных входных последовательностей и соответствующих им сигнатур. За эталонные принимаются не только сигнатуры мгновенных последовательностей, но и изменения сигнатур на определённых промежутках времени, а также производные сигнатур по времени. Данные промежутки времени определяются типовыми режимами работы электродвигателя, которые определяются действующим технологическим процессом. Например, в базу данных записываются сигнатуры, полученные на заведомо исправно электродвигателе в пусковом режиме через строго определённые промежутки времени. Пример представлен на рис. 2.

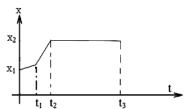


Рис. 2. Пример записи эталонных сигнатур в пусковом режиме

Аналогичным образом возможно получить сигнатуры последовательностей для неисправных электродвигателей с заведомо известными неисправностями, которые также заносятся в базу данных программного обеспечения.

В процессе работы электродвигателя на вход программно реализованного сигнатурного анализатора непрерывно поступают входные последовательности данных, которые обрабатываются, записываются в базу данных, анализируются и программное обеспечение принимает решение о наличии или отсутствии определенного дефекта в электродвигателе.

Поскольку полученные сигнатуры значительное время хранятся в базе данных, то целесообразно использовать данную информацию для ведения статистики возникновения дефектов электродвигателей постоянного тока и анализа полученной информации с целью планирования своевременного ремонта оборудования. Следовательно, применение сигнатурного анализа позволяет не только значительно ускорить процесс функционального диагностирования электродвигателей, но и в долгосрочной перспективе оптимизировать расходы промышленного предприятия на ремонт электродвигателя и составить соответствующий график плановых ремонтов.

Список литературы

- 1. Барков А.В., Баркова Н.А., Борисов А.А. Вибрационная диагностика электрических машин в установившихся режимах работы. СПб., 2006. 36 с.
- 2. Купцов В.В., Петушков М.Ю., Сарваров А.С. Современные методы диагностирования асинхронных двигателей и их развитие: монография. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2010. 247 с.
- 3. Петушков М.Ю. Развитие спектрального анализа тока асинхронного двигателя для диагностирования // Главный

энергетик. 2013. №9. С.60-65.

- 4. Kuptsov V.V., Sarvarov A.S., Petushkov M.Y. A new approach to analysis of induction motors with rotor faults during startup based on the finite element method // Progress In Electromagnetics Research B, Vol.45, 269-290, 2012. http://www.jpier.org/pierb/pier.php?paper= 12082916.
- 5. Petushkov M. Analysis of defects in the rotor asynchronous motor during start // International Journal Of Applied And Fundamental Research. 2013. №1. URL: www.science-sd.com/452-24043.

INFORMATION IN ENGLISH

SIGNATURE ANALYSIS APPLICATION FOR DC MOTOR DIAGNOSTICS

Zaviyalov A.S., Zaviyalov E.A., Sarvarov A.S., Petushkov M.Y.

The article is concerned with the existing methods of DC motor diagnostics. The requirements to the method of DC motor diagnostics are described. The authors believe that the signature analysis can be used in combination with the classical methods of diagnostics.

Keywords: DC motor, signature analysis, diagnostics, polynom.

REFERENCES

- 1. Barkov A.V., Barkova N.A., Borisov A.A. vibratsionnaya diagnostika elektricheskih mashin v ustanovivshihsya rezhimah raboty [Vibration diagnostics of electrical machinery in steady state operation]. St. Petersburg, 2006, 36 p.
- 2. Kuprtsov V.V., Petushkov M.Y., Sarvarov A.S. Sovremennye metody diagnostirovaniya asinhronnyh dvigatelei i

ih razvitie [Current methods of induction motors diagnostics and their development]: monograph. Magnitogorsk: Publishing house of Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2010. 247 p.

- 3. Petushkov M.Y. Razvitiye spektralnogo analiza toka asinhronnogo dvigatelya dlya diagnostirovaniya [Development of current spectrographic analysis of induction motor for diagnostics purposes. *Glavniy energetic* [Chief power engineer]. 2013, no. 9, pp. 60-65.
- 4. Kuptsov V. V., Sarvarov A. S., Petushkov M. Y. A new approach to analysis of induction motors with rotor faults during startup based on the finite element method. Progress In Electromagnetics Research B, Vol. 45, 269-290, 2012. http://www.jpier.org/pierb/pier.php?paper=12082916.
- 5. Petushkov M. Analysis of defects in the rotor asynchronous motor during start. International Journal Of Applied And Fundamental Research. 2013, no. 1. URL: www.sciencesd.com/452-24043.

УДК 621.746.27

Павлов В.В., Логунова О.С., Каландаров П.И., Искандаров Б.П. угли

ВЫБОР СООТНОШЕНИЯ ШИХТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ ПЛАВКИ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ ДЛЯ РАБОТЫ В ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕМ РЕЖИМЕ

В работе представлена необходимость научного обоснования выбора соотношения шихтовых материалов плавки дуговой сталеплавильной печи для работы в энергосберегающем режиме. Методика содержит шесть шагов, включающих сбор и структурирование технологической информации, построение причинно-следственных диаграмм, описание процесса электропотребления с помощью многокритериальной задачи оптимизации, содержащей систему ограничений с эмпирическими коэффициентами

Ключевые слова: энергосберегающий режим, дуговая сталеплавильная печь, соотношение шихтовых материалов, многокритериальная задача оптимизации, структурированная информация.

Анализ энергетических режимов работы дуговой сталеплавильной печи переменного тока

Одним из самых затратных в металлургической промышленности, с точки зрения потребления электрической энергии, является сталеплавильное производство, использующее электрические печи переменного тока. С 2006 года в условиях ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (ОАО «ММК») эксплуатируются две дуговые сталеплавильные печи с общим объемом производства до 4,0 млн т стали в год. Потребление электроэнергии на эти агрегаты составляет 235 – 365 кВт·ч/т в зависимости от доли чугуна в металлошихте.

Исследование динамики цены на электроэнергию,

используемой в условиях ОАО «ММК» для электродуговых сталеплавильных печей, показало устойчивый возрастающий тренд со средней скоростью 0,0087 руб. в месяц начиная с 2010 года и до настоящего времени.

При полученном темпе роста цены на электроэнергию к концу 2014 года она достигнет 2,5273 руб. за 1 кВт·ч и к концу 2015 - 2,6317 руб. за 1 кВт·ч, что составит прирост в 11% в декабре 2014 года и 16% в декабре 2015 к ценам на электрическую энергию в январе 2013 года. Пропорционально росту цен на электрическую энергию возрастает и себестоимость 1 т стали, получаемой в электродуговых сталеплавильных печах, так как статья затрат на электрическую энергию в себестоимости стали составляет почти 40% [1].

Технология выплавки стали в дуговых печах

ОАО «ММК» предусматривает три режима работы в зависимости от структуры шихтовых материалов, приведенные в **таблице** [2].

Согласно технологической инструкции [2] при выплавке стали в дуговых печах переменного тока в качестве шихтовых материалов используются металлический лом и жидкий передельный чугун.

Для каждого такого режима разработаны системы автоматического управления. Электрическая дуга в электродуговых печах переменного тока является основным источником тепловой энергии и контур управления электрическим режимом печи является основным в структуре системы управления электродуговой печи. В качестве управляющих воздействий при регулировании электрического режима электродуговой печи применяются:

- 1) переключение ступеней напряжения печного трансформатора;
- 2) перемещение электродов при выбранной ступени напряжения.

Нормативные показатели расхода электрической энергии

на т стали					
	Соотношение		Удельный расход		
Режим	материалов, %		электроэнергии,		
	Лом	Чугун	кВт∙ч/т		
I	100	0	365		
II	75	25	290		
III	60	40	235		

При переключении ступеней трансформатора изменяется напряжение питания электродов. Данное воздействие вызывает к скачкообразные изменения подводимого напряжения к электродам, что приводит к изменению тока дуги при одном и том же положении электрода. При перемещении электродов изменяется длина дуги, а следовательно, происходит изменение падения напряжения на дуге, и таким образом изменяется ток в фазах печи [3].

Однако образующийся дефицит металлического лома в регионах его активной переработки приводит к использованию альтернативных составляющих шихты, таких как твердый чугун (ТЧ), горячебрикетированное железо (ГБЖ), или к проведению плавки с использованием только жидкого чугуна (ЖЧ) или металлического лома (МЛ).

При изменении состава шихты появляются новые условия ведения плавки: изменение насыпной плотности шихты при использовании горячебрикетированного железа или чушкового чугуна; увеличение (или уменьшение) количества теплоты при использовании большей (или меньшей) массы жидкого чугуна в плавке. Поступление в составе шихтовых материалов примесей приводит к формированию внутренних дефектов в заготовке и готовой продукции, устранение которых требует разработки дополнительных рекомендаций по ведению технологических процессов на этапе внепечной обработки стали и последующей непрерывной разливки [4-6].

Учитывая существующие проблемы и опыт по разработке методик и моделей по оптимизации состава шихты [7-10], авторами работы была поставлена цель разработки рекомендаций по ведению плавки в дуговых сталеплавильных печах в энергосберегающем ре-

жиме при изменении состава шихтовых материалов. Для достижения цели были решены следующие задачи: осуществление мониторинга за технологическими показателями работы дуговой электросталеплавильной печи при использовании альтернативных материалов в металлозавалке в условиях сталеплавильного цеха для печей переменного тока; обработка результатов мониторинга и выявление эмпирических закономерностей, позволяющих научно обосновать изменение удельных расходов электроэнергии при использовании альтернативных материалов в металлозавалке.

Технология текущего мониторинга за технологическими показателями работы ДСП

С целью контроля и управления производством стали в дуговой сталеплавильной печи (ДСП) в условиях ОАО «ММК» производится сплошной мониторинг технологических параметров плавки на основе корпоративного Хранилища данных. Для оценки энергопотребления ДСП в Хранилище данных размещаются сведения, приведенные на рис. 1.

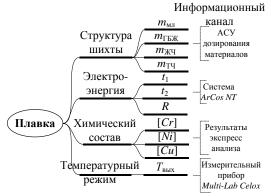


Рис. 1. Фрагмент структуры данных для оценки энергопотребления ДСП

На **рис. 1** введены обозначения: $m_{\text{мл}}$, $m_{\text{ГБЖ}}$, $m_{\text{ЖЧ}}$, $m_{\text{ТЧ}}$ — масса составляющих шихтовых материалов: металлического лома, ГБЖ, ЖЧ и ТЧ соответственно, т; t_1 — время цикла плавки, мин; t_2 — время нахождения дуги под током, мин; R — удельный расход электроэнергии, кВт/т; [Cr], [Ni], [Cu] — процентное содержание остаточных элементов в готово стали, %; $T_{\text{вых}}$ — температура готовой стали на выходе из ДСП, 0 С.

Дополнительно на основе представленной информации рассчитываются: общая масса шихты в металлозавалке, т; доля каждого компонента шихты в общей массе; доля твердой фазы в металлозавалке.

Значения всех показателей фиксируется в реальном времени, передаются в корпоративное Хранилище ERP и выгружается службами контроля и диагностики по мере формирование локальной базы данных для проведения статистического исследования процесса выплавки стали.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ ЭМПИРИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О РАБОТЕ ДУГОВОЙ ЭЛЕКТРОСТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ

В 2013 году по причине дефицита металлического лома в условиях электросталеплавильного цеха ОАО «ММК» в металлозавалке ДСП были использованы такие материалы, как ГБЖ и ТЧ в дополнение к традиционным МЛ и ЖЧ. Были составлены комбина-

ции в соотношении указанных компонентов в металлозавалке, приведенные на рис. 2.

Для каждой комбинации (рис. 3) варьирование доли составляющих металошихты не превышало 5% для каждой плавки. Были обработаны результаты наблюдений за соблюдением технологии выплавки для 230 плановых плавок. Таким образом, требованиям [2] отвечают комбинации МЛ+ТЧ, МЛ+ГБЖ+ТЧ и МЛ+ГБЖ, которые могут соответствовать режиму I (см. таблицу), и комбинация МЛ+ГБЖ+ЖЧ, приближенная к режиму II (см. таблицу). Комбинации МЛ+ЖЧ и МЛ+ТЧ+ЖЧ не соответсвуют требованиям [2] и для них должно быть выполнено обоснование выбора удельного расхода электроэнергии.

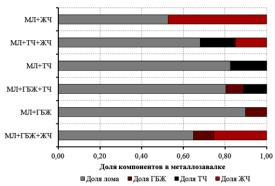


Рис. 2. Комбинации и соотношения компонентов металлошихты для ведения плавки в ДСП

Для оценки зависимости значения удельного расхода электроэнергии и состава компонентов металлозавалки была построена зависимость среднего удельного расхода электроэнергии и средней доли твердой составляющей в металлошихте (рис. 4). На рис. 3 введены обозначения: 1 – МЛ+ГБЖ+ЖЧ; 2 – МЛ+ГБЖ; 3 – МЛ+ГБЖ+ТЧ; 4 – МЛ+ТЧ; 5 – МЛ+ТЧ+ЖЧ; 6 – МЛ+ЖЧ. Точки 2, 3 и 4, соответствующие режиму I из таблицы, показали существенные расхождения по среднему удельному расходу электроэнергии как в большую, так и в меньшую сторону, составляющие соответственно Δ_2 =-6,84 кВт·ч/т; $\Delta_3 = -21,1 \text{ kBt} \cdot \text{y/t};$ $\Delta_4 = +13,73 \text{ кВт·ч/т}.$ Комбинации МЛ+ТЧ+ЖЧ МЛ+ЖЧ не соответствуют ни одному из рекомендованных режимов по таблице. При прогнозе по квадратичному тренду с коэффициентом детерминации, равным 1, для рекомендуемых режимов наблюдается заниженный удельный расход электроэнергии Δ_5 =-28,66 кВт·ч/т и Δ_6 =-12,35 кВт·ч/т. Комбинация МЛ+ГБЖ+ЖЧ выполняется при экономном энергорежиме, соответствующим рекомендации в таблице по режиму II.

Результаты корреляционного анализа показали наличие интекорреляции и мультиколлинеарности между показателями, выбранными для исследования, и позволили выявить причинно-следственные взаимосвязи между ними (см. **рис. 4**).

В работе [4] авторами предлагается стратегия постановки многокритериальной задачи оптимизации для выбора режимов работы электросталеплавильной печи с учетом количества остаточных элементов в стали, таких как хром, никель и медь. Приведенная методика может быть расширена дополнительным критерием энергосбережения и составом альтернативных мате-

риалов в металлошихте.

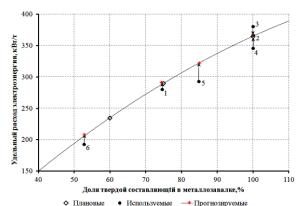


Рис. 3. Зависимость среднего удельного расхода электроэнергии и средней доли твердой составляющей в металлошихте

На **рис. 5**, *а* представлена причинно-следственная диаграмма для удельного расхода электроэнергии, по-казывающая многоуровневость эмпирических взаимосвязей с другими величинами и требующая построения системы критериев для достижения минимального значения энергозатрат:

$$t_1 = a_1 \cdot m_{\text{ГБЖ}} + a_2 \cdot m_{\text{ЖЧ}} + a_3 \rightarrow \min, \qquad (1)$$

$$t_{2} = b_{1} \cdot m_{\text{TY}} + b_{2} \cdot m_{\text{MJI}} + b_{3} \cdot t_{1} (m_{\text{TEW}}, m_{\text{MY}}) + b_{4} \rightarrow \min,$$
(2)

$$R = c_1 \cdot t_2 \left(m_{\text{TY}}, m_{\text{MJI}}, t_1 \left(m_{\text{TEXK}}, m_{\text{XY}} \right) \right) + c_2 \rightarrow \min,$$
(3)

где a_i , b_j , c_k — эмпирические коэффициенты, $i=\overline{1,3}$; $j=\overline{1,4}$; $k=\overline{1,2}$.

Причинно-следственные диаграммы, приведенные на **рис.** 5, δ - δ , позволяют определить ограничения к задаче оптимизации состава шихты при энергосберегающем режиме работы ДСП:

$$\begin{cases}
[Cr]_{\min} \leq [Cr] \leq [Cr]_{\max}, \\
[Ni]_{\min} \leq [Ni] \leq [Ni]_{\max}, \\
[Cu]_{\min} \leq [Cu] \leq [Cu]_{\max}.
\end{cases} (4)$$

где минимальное и максимальное значения процентного содержания остаточных элементов и температуры стали на выходе из ДСП определены для каждой марки стали, а значения для выбранного состава шихты определяются по эмпирическим соотношениям:

$$\begin{aligned} & [Cr] = d_{11} \cdot m_{\text{MI}} + d_{12} \cdot m_{\text{XM}} + d_{13} \cdot m_{\text{TEЖ}} + \\ & + d_{14} \cdot m_{\text{TM}} + d_{15}, \\ & [Ni] = d_{21} \cdot m_{\text{MII}} + d_{22} \cdot m_{\text{XM}} + \\ & + d_{24} \cdot m_{\text{TM}} + d_{25}, \\ & [Cu] = d_{31} \cdot m_{\text{MII}} + d_{32} \cdot m_{\text{XM}} + \\ & + d_{34} \cdot m_{\text{TM}} + d_{45}, \\ & T_{\text{BBJK}} = d_{41} \cdot m_{\text{MII}} + d_{42} \cdot m_{\text{XM}} + \\ & + d_{43} \cdot m_{\text{TEЖ}} + d_{45}, \end{aligned}$$
 (5)

где d_{ij} – эмпирические коэффициенты, $i=\overline{1,4}$; $j=\overline{1,5}$.

Дополнительно вводятся ограничения на запасы

ресурсов, составляющих металлозавалку:

$$\begin{cases} 0 \leq m_{\text{MJI}} \leq S_{1}, 0 \leq m_{\text{ЖЧ}} \leq S_{2}, \\ 0 \leq m_{\text{TБЖ}} \leq S_{3}, 0 \leq m_{\text{TЧ}} \leq S_{4}, \\ M_{\text{min}} \leq m_{\text{MJI}} + m_{\text{ЖЧ}} + m_{\text{TБЖ}} + m_{\text{TЧ}} \leq M_{\text{max}}, \end{cases}$$
(6)

где $S_{_1}$ — ограничения на запасы ресурсов по видам компонентов в металлозавалке, т; $M_{_{\min}}$ и $M_{_{\max}}$ — ограничения на суммарную массу загрузки ДСП, т.

Для задачи (1)-(6) является достаточным использование линейных эмпирических уравнений при значимости коэффициентов парной корреляции, используемых при построении причинно-следственных диаграмм (см. **рис. 4**).

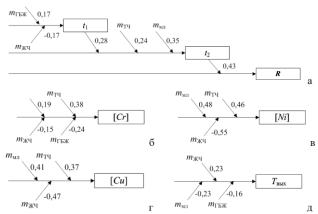


Рис. 4. Причинно-следственные диаграммы показателей, характеризующих процесс выплавки стали в ДСП

МЕТОДИКА ВЫБОРА СООТНОШЕНИЯ ШИХТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ ПЛАВКИ ДУГОВОЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ ДЛЯ РАБОТЫ В ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕМ РЕЖИМЕ

Таким образом, процесс выбора соотношения составляющих шихтовых материалов можно сформулировать в виде методики, приведенной на **рис.** 5.

Методика содержит шесть основных этапов. На этапе 1 выполняется выбор информации о технологических показателях плавок, проведенных при использовании альтернативных материалов и их структурирование по схеме, приведенной на рис. 1. Для выбора исходных данных используются фильтры, предлагаемые пользовательским диалогом автоматизированного рабочего места технолога. Результаты выбора информации размещаются в таблице для дальнейшей обработки. Для выбранной информации на этапе 2 выполняется построение причинно-следственных диаграмм на основе результатов корреляционного анализа, позволяющего выполнить определение целевых функций при выполнении этапа 3. Этап 4 по идентификации эмпирических параметров модели выполняется на основе методики, приведенной в [4] и построенной на основе теории идентификации системы эмпирических уравнений. На этапе 5 методом уступок выполняется решение многокритериальной задачи оптимизации, в результате которого получается вектор количественных оценок для соотношения компонентов металлошихты при применении альтернативных материалов. Полученные результаты используются для оценки времени дуги под током, продолжительности цикла и удельного расхода электроэнергии при найденных соотношениях по уравнениям (1)-(3).

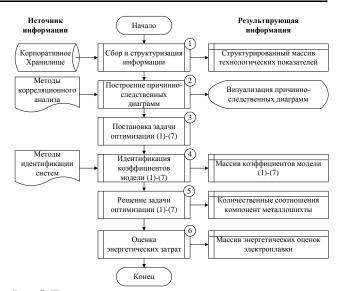


Рис. 5. Причинно-следственные диаграммы показателей, характеризующих процесс выплавки стали в ДСП

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, анализ тенденции по динамике цен на энергоносители показал, что в настоящее время существует острая необходимость в условиях изменения рынка сырья разработки новых экономных энергорежимов при эксплуатации агрегатов с высокими затратами электрической энергии. Ряд промышленных наблюдений продемонстрировал изменение условий эксплуатации дуговых сталеплавильных печей при изменении состава шихты и необходимость в изменении существующих энергорежимов. В ходе исследования результатов наблюдения была предложена методика для постановки многокритериальной задачи оптимизации, которая сочетает в себе аналитические и эмпирические методы исследования с сохранением физического смысла протекания процессов при ведении плавки в дуговой сталеплавильной печи.

Перспективными направлениями развития исследований авторы считают анализ математической модели выбора шихтовых материалов при работе дуговой сталеплавильной печи в энергосберегающем режиме, разработку рекомендаций по совершенствованию системы управления ArCos NT новой схемы системы адаптивного управления для реализации гибкой системы управления, способной реализовывать более трех режимов работы ДСП.

Список литературы

- 1. Влияние фракционного состава металолома на показатели работы дуговой сталеплавильной печи / В.В. Павлов, Ю.А. Ивин, С.В. Пехтерев, О.С. Логунва, И.И. Мацко // Электрометаллургия. 2011. №11. С. 2-7.
- 2. ТИ 101-СТ-ЭСПЦ-64-2007. Выплавка стали в электропечах. Магнитогорск: ОАО «ММК», 2007. 43 с.
- 3. Парсункин Б.Н., Андреев С.М., Логунова О.С. Автоматизация и оптимизация управления выплавкой стали в электродуговых печах. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2012. 304 с.
- 4. Logunova O.S. Internal-defect formation and the thermal state of continuous-cast billet // Steel in Translation. 2008. T.38. N_2 10. P. 849-852.
- 5. Matsko I.I., Snegirev Y.V., Logunova O.S. Data acquisition and preparation methods for continuously cast billets quality analysis software // Applied Mechanics and Materials. 2012.

T.110-116. C. 3557-3562.

- 6. Vdovin K.N., Gorostkin S.V., Kiselev V.D. Effect of the secondary cooling zone of a continuous-casting machine on the quality of slabs // Steel in Translation. 1996. T.26. № 12. P. 28-30
- 7. Logunova O.S., Filippov E.G., Pavlov I.V., Pavlov V.V. Multicriterial optimization of the batch composition for steelsmalting arc furnace // Steel in Translation, 2013. V.43. №1. P. 34-38.
 - 8. Сёмин А.Е., Смирнов Н.А. От лома до качественной

- стали // Электрометаллургия, 2008. №5. С. 44-46.
- 9. Особенности работы дуговых сталеплавильных печей с применением жидкого чугуна / Ю.А. Ивин, А.Б. Великий, Н.В. Саранчук, А.Х. Валиахметов, Л.В. Алексеев // Сталь. 2008. № 7. С. 49.
- 10. Кудрин В.А., Боборыкина Е.Н. Новые материалы и технологии в процессе роста производства стали в мире // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2012. №10. С. 14-24.

INFORMATION IN ENGLISH

ARC FURNACE TAP CHARGING MATERIAL RATION CHOICE FOR ITS WORK IN POWER SAVING MODE

Pavlov V.V., Logunova O.S., Kalandarov P.I., Iskandarov B.P. ugli

The article is concerned with the scientific approach to the choice of the charge materials ratio for the electric arc steel-making furnace to provide its energy saving operation. The method consists of six steps including obtaining and structuring of technological data, development of cause-effect relations and description of the power consumption process using the multifactor optimization problem containing the constraint system with empirical coefficients.

Keywords: power saving mode, electric arc steel-making furnace, charge materials ratio, multifactor optimization problem, structured data.

REFERENCES

- 1. Pavlov V.V., Ivin Yu.A., Pekhterev S.V., Logunova O.S., Matsko I.I. Vliyanie fraktsionnogo sostava metalloloma na pokazateli raboty dugovoi staleplavilinoi pechi [Influence of scrap metal fractional makeup on electric arc furnace performance]. *Elektrometallurgiya* [Electrometallurgy], 2011, no. 11. pp. 2-7.
- 2. TI 101-ST-ESPTs-64-2007. Viplavka stali ν elektropechakh [Steelmaking in electric arc furnaces]. Magnitogorsk: OJSC «MMK», 2007. 43 p.
- 3. Parsunkin B.N., Andreev S.M., Logunova O.S. Avtomatizatsiya i optimizatsiya upravleniya viplavkoi stali v elektrodugovikh pechakh [Automation and optimization of steel making process in arc furnaces]. Magnitogorsk: Publishing house of Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2012. 304 p.
 - 4. Logunova O.S. Internal-defect formation and the thermal

- state of continuous-cast billet. Steel in Translation. 2008, vol.38. no. 10, pp. 849-852.
- 5. Matsko I.I., Snegirev Y.V., Logunova O.S. Data acquisition and preparation methods for continuously cast billets quality analysis software. Applied Mechanics and Materials. 2012, vol.110-116, pp. 3557-3562.
- 6. Vdovin K.N., Gorostkin S.V., Kiselev V.D. Effect of the secondary cooling zone of a continuous-casting machine on the quality of slabs. Steel in Translation. 1996, vol.26, no. 12, pp. 28-30
- 7. Logunova O.S., Filippov E.G., Pavlov I.V., Pavlov V.V. Multicriterial optimization of the batch composition for steelsmalting arc furnace. Steel in Translation. 2013, vol.43, no.1, pp. 34-38.
- 8. Siomin A.E., Smirnov N.A. Ot loma do kachestvennoi stali [From scrap metal to high-quality steel]. *Elektrometallurgiya* [Electrometallurgy]. 2008, no.5, pp. 44-46.
- 9. Ivin Yu.A., Velikii A.B., Saranchuk N.V., Valiakhmetov A.Kh, Alekseev L.V. Osobennosty raboty dugovikh staleplavilnikh pechey s primeneniem zhidkogo cguguna [Performance characteristics of electric steel-making furnaces using liquid iron]. *Stal* [Steel]. 2008, no. 7, pp. 49.
- 10. Kudrin V.A., Boborikina E.N. Novie materiali i tekhnologii v protsesse rosta proizvodstva stali v mire [New materials and technologies in the process of world steel-making production growth]. *Vse materialy. Entsiklopedicheskyi spravochnik* [All the materials. Encyclopedic reference book]. 2012, no.10, pp. 14-24.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Бовшик Павел Александрович – гл. инженер ООО «Электроремонт», г. Магнитогорск, Россия.

Брылина Олеся Геннадьевна – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок», Национальный исследовательский Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия. Тел.: (351)2 67-93-21. Email: teolge@mail.ru.

Бычков Михаил Григорьевич – д-р техн. наук, проф., Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, Россия.

Васильев Александр Евгеньевич – канд. техн. наук, доцент кафедры электроники и микроэлектроники, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия.

Васильев Евгений Юрьевич — начальник отдела АСУТП ЗАО «КонсОМ СКС», г. Магнитогорск, Россия

Васильев Богдан Юрьевич – канд. техн. наук, кафедра «Электротехники, электроэнергетики, электромеханики», Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», г. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: vasilev.bu@mail.ru.

Гельман Морис Владимирович — канд. техн. наук, проф. кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок», Национальный исследовательский Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия. Тел.: (351)267-93-21. E-mail: mwg@mail.ru.

Диденко Евгений Евгеньевич – аспирант кафедры электропривода, Липецкий государственный технический университет, г. Липецк, Россия.

E-mail: didenko_ee@mail.ru.

Дмитриенко Валерий Дмитриевич – д-р техн. наук, проф., Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», г. Харьков, Украина.

Завьялов Александр Станиславович – ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: a-zavyalov@list.ru.

Завьялов Евгений Альбертович — канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры электроники и микроэлектроники, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия.

Заковоротный Александр Юрьевич — канд. техн. наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», г. Харьков, Украина. E-mail: arcade@i.ua.

Зиновьев Артем Михайлович — студент, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия.

Искандаров Ботирбек Полвон угли – студент бакалавриата, Азиатский тихоокеанский университет технологии и инновации (UCTI), Малайзия.

Ишметьев Евгений Николаевич – д-р техн. наук, директор по стратегическому развитию ЗАО «КонсОМ СКС», г. Магнитогорск, Россия.

Карандаев Алесандр Сергеевич — д-р техн. наук, проф. кафедры электротехники и электротехнических систем, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия.

Каландаров Палван Искандарович – д-р техн. наук, проф., кафедра «Автоматизация производственных процессов», Ташкентский государственный технический университет, г. Ташкент, Узбекистан.

Карпова Ульяна Вячеславовна — студент, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия.

Козин Алексей Николаевич — начальник цеха эксплуатации электрооборудования ЭСПЦ НПО «Автоматика», г. Магнитогорск, Россия.

E-mail: kozin_an@mail.ru.

Козярук Анатолий Евтихиевич – д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой электротехники, электроэнергетики, электромеханики, Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», г. Санкт-Петербург, Россия.

Коробейников Станислав Михайлович – инженер ЗАО «КонсОМ СКС», г. Магнитогорск, Россия.

Косматов Валерий Иванович – канд. техн. наук, профессор, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. Тел.: 20-74-48.

Кочергин Геннадий Геннадьевич – студент, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия.

Кузнецова Валентина Николаевна – с.н.с., Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, Россия.

Логунова Оксана Сергеевна – д-р техн. наук, доц., зав. кафедрой вычислительной техники и программирования, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия.

Лукьянов Сергей Иванович – д-р техн. наук, проф., директор института энергетики и автоматизированных систем, зав. кафедрой электроники и микроэлектроники, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия.

Маколов Владимир Николаевич — канд. техн. наук, электрик цеха ЛПЦ-9 OAO «ММК», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: makolov.vn@mmk.ru.

Мещеряков Виктор Николаевич – д-р техн. наук, зав. кафедрой электропривода, Липецкий государственный технический университет, г. Липецк, Россия. E-mail: mesherek@stu.lipetsk.ru.

Омельченко Евгений Яковлевич — д-р техн. наук, доц. кафедры автоматизированного электропривода и мехатроники, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. Е-mail: momentum2@yandex.ru. Павлов Владимир Викторович — ведущий инженертехнолог, ОАО «Магнитогорский металлургический

комбинат», г. Магнитогорск, Россия.

Панов Александр Николаевич – канд. техн. наук, доц., начальник отдела АСУП ЗАО «КонсОМ СКС», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: panov.a@konsom.ru.

Петушков Михаил Юрьевич – канд. техн. наук, доц. кафедры электроники и микроэлектроники, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия.

Попов Сергей Николаевич — и.о. зам. начальника цеха «Электросервис 2» ООО «Электроремонт», г. Магнитогорск, Россия.

Романенко Алексей Валерьевич — технический директор ЗАО «КонсОМ СКС», г. Магнитогорск, Россия. Сарваров Анвар Сабулханович — д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой автоматизированного электропривода и мехатроники, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия.

E-mail: anvar@magtu.ru.

Соловьев Вячеслав Алексеевич — д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой электропривода и автоматизации промышленных установок, ФГБОУ ВПО «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет», г. Комсомольск-на-Амуре, Россия. E-mail: kepapu@knastu.ru.

Сухоруков Сергей Иванович – аспирант кафедры электропривода и автоматизации промышленных ус-

тановок, ФГБОУ ВПО «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет», г. Комсомольск-на-Амуре, Россия.

E-mail: sergei.svan@gmail.com

Таранов Сергей Игоревич – аспирант, Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», г. Санкт-Петербург, Россия.

Фомин Николай Владимирович – ст. преподаватель кафедры автоматизированного электропривода и мехатроники, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия.

Хлыстов Алексей Иванович – старший менеджер ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат», г. Магнитогорск, Россия.

Храмшин Вадим Рифхатович — канд. техн. наук, проф. кафедры электротехники и электротехнических систем, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия.

Черный Сергей Петрович – канд. техн. наук, доц. кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок, ФГБОУ ВПО «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет», г. Комсомольск-на-Амуре, Россия.

E-mail: kepapu@knastu.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Bichkov Mikhail Grigoievich – D.Sc. (Eng.), Professor, National Research University "MPEI", Moscow, Russia.

Bovshik Pavel Aleksandrovich – Chief engineer of «Electroremont» ltd., Magnitogorsk, Russia.

Brilina Olesya Gennadievna – PhD (Eng.), associate professor of Electric Drive and Industrial Plant Automation department, "South Ural State University" (National Research University), Chelyabinsk, Russia. Tel.: (351)2 67-93-21. E-mail: teolge@mail.ru.

Chernyi Sergey Petrovich – Ph.D.(Eng.), Associate Professor, Associate Professor of Electric Drive and Industrial Automation Department, FSBEI HPE «Komsomolsk-on-Amur State Technical University», Komsomolsk-on-Amur, Russia. E-mail: kepapu@knastu.ru.

Didenko Evgeniy Evgenievich – postgraduate student of Electric Drive Department of Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia. E-mail: didenko ee@mail.ru.

Dmitrienko Valeryi Dmitriievich – D.Sc. (Eng.), Professor, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkov, Ukraine.

Fomin Nikolaj Vladimirovich – Assistant Professor of Automated Electrical Drive and Mechatronics Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Gelman Moris Vladimirovich – PhD (Eng.), Professor of Electric Drive and Industrial Plant Automation department, "South Ural State University" (National Research University), Chelyabinsk, Russia. Tel.: (351)267-93-21. E-mail: mwg@mail.ru.

Ishmetyev Evgeny Nikolaevich – D.Sc. (Eng.), Strategic Development director, CJSC «KonsOM SKS», Magnitogorsk, Russia.

Iskandarov Botirbek Polvon ugli – student, Asia Pacific University of Technology and Innovation (UCTI), Malaysia.

Kalandarov Palvan Ickandarovich – D.Sc. (Eng.), Professor, department of Industrial Processes Automation, Tashkent State Technical University, Tashkent, Uzbekistan.

Karandaev Alexander Sergeevich – D.Sc. (Eng.), professor of Electrical and Systems Engineering department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Karpova Uliyana Vyacheslavovna – student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Khlistov Aleksey Ivanovach – senior manager, OJSC "Magnitogorsk Iron and Steel Works", Magnitogorsk, Russia.

Khramshin Vadim Rifkhatovich – Ph.D.(Eng.), Professor of Electrical and Systems Engineering department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Kochergin Gennadyi Gennadievich – student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Korobeynikov Stanislav Mikhailovich – engineer, CJSC «KonsOM SKS», Magnitogorsk, Russia.

Kosmatov Valeryi Ivanovich– PhD (Eng.), professor of Automated Electrical Drive and Mechatronics department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnito-

gorsk, Russia. Tel.: 20-74-48.

Kozin Aleksey Nikolaevich – Manager of Service department of the electric steel-making shop, scientific production association «Automation», Magnitogorsk, Russia. E-mail: kozin_an@mail.ru.

Kozjaruk Anatolyi Evtihievich – D.Sc. (Eng.), Professor, Head of the Department «Electronics, electric power engineering, electronechanics», National Mineral Resources University (University of mines), St. Petersburg, Russia.

Kusnetsova Valentina Nikolaevna – senior researcher, National Research University "MPEI", Moscow, Russia.

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

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

Makolov Vladimir Nikolaevich – PhD (Eng.), manager of service department of electrical equipment, rolling shop № 9 of OJSC "Magnitogorsk Iron and Steel Works", Magnitogorsk, Russia. E-mail: makolov.vn@mmk.ru.

Mesheryakov Viktor Nikolaevich – D.Sc. (Eng.), head of Electric Drive Department of Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia. E-mail: mesherek@stu.lipetsk.ru.

Omelchenko Evgeniy Yakovlevich – D.Sc. (Eng.), Associate Professor of Automated Electrical Drive and Mechatronics Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: momentum2@yandex.ru.

Panov Alexander Nikolaevich – PhD (Eng), Head of process automation department, CJSC «KonsOM SKS», Magnitogorsk, Russia. E-mail: panov.a@konsom.ru.

Pavlov Vladimir Viktorovich – principal processing engineer, OJSC "Magnitogorsk Iron and Steel Works", Magnitogorsk, Russia.

Petushkov Mikhail Yurievich – D.Sc. (Eng.), Associate Professor of Electronics and Microelectronics Engineering department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Popov Sergey Nikolaevich – Acting deputy head of «Electoservice-2» shop, «Electroremont» ltd., Magnitogorsk, Russia.

Romanenko Alexey Valerievich – Technical Director, CJSC «KonsOM SKS», Magnitogorsk, Russia.

Sarvarov Anvar Sabukhanovich – D.Sc. (Eng.), professor, head of Automated Electrical Drive and Mechatronics department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: anvar@magtu.ru.

Solovyev Vyacheslav Alekseevich – Professor, Head of Electric Drive and Industrial Automation Department, FSBEI HPE «Komsomolsk-on-Amur State Technical University», Komsomolsk-on-Amur, Russia. E-mail: kepapu@knastu.ru.

Sukhorukov Sergey Ivanovich – a postgraduate student of Electric Drive and Industrial Automation Department, FSBEI HPE «Komsomolsk-on-Amur State Technical University», Komsomolsk-on-Amur, Russia. E-mail: sergei.svan@gmail.com

Taranov Sergey Igorevich – a postgraduate student, Na-

tional Mineral Resources University (University of mines), St. Petersburg, Russia.

Vasilyev Alexander Evgenyevich – Ph.D. in engineering, associate Professor of Electronics and Microelectronics Engineering department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Vasilyev Bogdan Yurievich – PhD (Eng.), Electrical Engineering, Power Engineering, Electromechanics Department, National Mineral Resources University (University of mines), St. Petersburg, Russia. E-mail: vasilev.bu@mail.ru.

Vasilyev Evgeny Yurievich – Head of process automation department, CJSC «KonsOM SKS», Magnitogorsk, Rus-

sia.

Zakovorotnyi Aleksandr Yurievich – PhD (Eng.), associate professor, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkov, Ukraine. E-mail: arcade@i.ua.

Zaviyalov AleksandrStanislavovich – Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: a-zavyalov@list.ru.

Zaviyalov Evgeniy Albertovich – Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Zinoviev Artem Mikhailovich – student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.