

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

ИЗДАЕТСЯ С ЯНВАРЯ 1996 Г.

№4(25), ДЕКАБРЬ 2014

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

Редакционный совет

Председатель редсовета:

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

Зам. председателя редсовета:

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

Члены редакционного совета:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Редакционная коллегия

Главный редактор:

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

Заместитель главного редактора:

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

Члены редакционной коллегии:

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

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

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

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

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

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

Ответственный редактор:

Е.Г. 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

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

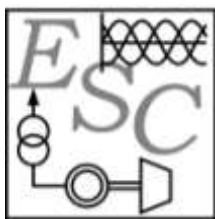
Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-58181 от 29 мая 2014 г.

Адрес редакции:

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

Журнал подготовлен к печати

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



ELECTROTECHNICAL SYSTEMS AND COMPLEXES

PUBLISHED SINCE JAN., 1996

№4(25) DEC., 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, Uzbeki-
stan;

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

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

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

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

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

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

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

Editorial board

Editor-in-chief:

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

Deputy chief editor:

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

Editorial board members:

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

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

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

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

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

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

Executive editor:

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

Typographers:

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

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

© FSBEI HPE NMSTU, 2014

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

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

The publisher:

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

The Publishing House of Nosov Magnitogorsk State Tech-
nical University

e-mail: ecis.red@gmail.com

Prepared for publication by publishing center of NMSTU.

Printed in the Printing MSTU Area

Signed for press.

Order. Circulation – 500 items.

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Омельченко Е.Я.</i> Основные направления развития автоматизированного электропривода	4
Теория и практика автоматизированного электропривода	8
<i>Дмитриенко В.Д., Заковоротный А.Ю.</i> Преобразование нелинейных систем управления к эквивалентным линейным в канонической форме Бруновского	8
<i>Мезенцев Н.В., Гейко Г.В.</i> Идентификация параметров асинхронного привода с использованием генетического алгоритма	14
<i>Зюев А.М., Двойников Д.А.</i> Реализация структуры быстродействующих электромеханических систем с помощью микроконтроллера тиристорного преобразователя постоянного тока Simoreg 6RA70 Siemens	17
<i>Сарваров А.С., Васильев А.Е., Даниленко К.В., Меньщикова Е.В.</i> Сравнительный анализ приводов мехатронных систем	21
Электроэнергетика	26
<i>Конесев С.Г., Мухаметишин А.В., Конев А.А., Шаяхметов И.И.</i> Разработка компьютерной модели процесса испытания жидких электроизоляционных материалов	26
ЭНЕРГО- И РЕСУРСОБЕРЕЖЕНИЕ	28
<i>Парсункин Б.Н., Андреев С.М., Ахметов Т.У., Ахметова А.У.</i> Исследование точности способа контроля температурного состояния нагреваемых непрерывнолитых заготовок перед выдачей	28
<i>Агапитов Е.Б., Тихонов А.В.</i> Энергетические характеристики плазменно-дугового токоподвода при нагреве шлакометаллического расплава	30
<i>Николаев Н.А., Николаев А.А., Леднов Р.А.</i> Диагностирование технического состояния трансформаторного оборудования как основа энергетической безопасности промышленного предприятия	34
<i>Пишнограев Р.С., Суспицын Е.С., Швидченко Д.В., Швидченко Н.В., Апет А.А.</i> Разработка и применение системы раннего детектирования продольных трещин в непрерывнолитых заготовках	41
СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ	45

CONTENT

<i>Omelchenko E.Ya.</i> Main development prospects of automatic electric drive	4
Theory and practise of automated electric drive	8
<i>Dmitrienko V.D., Zakovorotnyj A.Ju.</i> Conversion of nonlinear control systems to equivalent linear ones in canonical brunovsky form	8
<i>Mezentsev N.V., Gejko G.V.</i> Identification parameters of traction induction motor of diesel train using genetic algorithms	14
<i>Zyuzev A.M., Dvoynikov D.A.</i> The realization of high-speed electromechanical system structure using thyristor converter microcontroller of direct current Simoreg 6RA70 Siemens ..	17
<i>Sarvarov A.S., Vasilyev A.E., Danilenko K.V., Menshchikova E.V.</i> Comparative analysis of actuators for mechatronic systems	21
Power engineering	26
<i>Konesev S.G., Muhametshin A.V., Konev A.A., Shayahmetov I.I.</i> Computer model development for liquid electrical insulating materials testing	26
Energy- and resources-economy	28
<i>Parsunkin B.N., Andreev S.M., Akhmetov T.U., Akhmetova A.U.</i> Accuracy investigation of temperature control method for heated continuously cast billets before discharge	28
<i>Agapitov E.B., Tikhonov A.V.</i> Energy characteristics of plasma-arc current lead during slag-metal melt heating	30
<i>Nikolaev N.A., Nikolaev A.A., Lednov R.A.</i> Technical state diagnosis of transformer facilities as a basis of energy supply security of industrial enterprise	34
<i>Pishnograev R.S., Suspitsin E.S., Shvidchenko D.V., Shvidchenko N.V., Apet A.A.</i> Development and application of longitudinal cracks early detection system for continuous cast slabs	41
Information about the authors	46

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Обобщены материалы докладов VIII Международной (XIX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу, посвященных общим и теоретическим вопросам автоматизированного электропривода, новым электроприводам, электродвигателям, преобразователям, устройствам управления, актуальным вопросам автоматизированного электропривода в отраслях промышленности, энергетики, коммунальном хозяйстве, новым образовательным технологиям подготовки инженерных и научных кадров по направлению «Энергетика и электроника».

Ключевые слова: автоматизированный электропривод, энергоэффективность, надежность, быстродействие, качество.

ВВЕДЕНИЕ

7–9 октября 2014 г. в Саранске на базе Национального исследовательского Мордовского государственного университета им. Н.П. Огарева прошла VIII Международная (XIX Всероссийская) конференция по автоматизированному электроприводу (АЭП-2014). Конференция была организована Ассоциацией инженеров по электроприводу, Академией электротехнических наук РФ, Национальным исследовательским Мордовским государственным университетом, Национальным исследовательским университетом МЭИ, ОАО «Электровыпрямитель».

Статья написана по материалам этой конференции. В основу положены Резюме VIII Международной (XIX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу, доклады пленарного заседания, доклады на секциях и материалы стендовых докладов.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА КОНФЕРЕНЦИИ

Конференция отличалась высокой представительностью, в ее работе приняли участие 235 специалистов, работающих в области автоматизированного электропривода, электромеханики, силовой полупроводниковой преобразовательной техники. На конференции были представлены 270 докладов более чем семисот авторов от всех регионов России. Были также представлены доклады зарубежных коллег из Германии, Испании, Польши, Эстонии, Украины, Узбекистана и Казахстана.

210 докладов прислано от высших учебных заведений. Из них 22 доклада – от Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова, 20 – от Национального исследовательского университета МЭИ, 14 – от СПбГЭТУ, 11 – от ИТМО, 10 – ЮЗГПУ им. Платова, менее 10 докладов – от Новосибирского ГТУ, Ивановского ГЭУ, УрФУ им. Б.Н. Ельцина, ЮУрГУ, Казанского ГЭУ и др.

От предприятий поступило 60 докладов. Из них 10 – от ОАО «Электровыпрямитель», по 4 – от ВНИИР, ОАО «Гипрогазцентр, ООО «РусЭлПром». Далее расположились ООО НПП «Экра», ЗАО «АвтСистКомп», ВНИПТИЭМ и МИП «Механотроника». К сожалению, от ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» не представлено ни одного доклада.

По городам доклады распределились: 36 – Москва; 36 – Санкт-Петербург; 22 – Магнитогорск; 16 – Саранск, 15 – Екатеринбург, Нижний Новгород; 12 – Новочеркасск, 8 – Челябинск.

Направленность докладов: 6 – учебно-методические вопросы; 85 – теоретические вопросы; 179 – практическая направленность докладов. Представленные доклады опубликованы в двух томах ТРУДЫ VIII МЕЖДУНАРОДНОЙ (XIX ВСЕРОССИЙСКОЙ) КОНФЕРЕНЦИИ ПО АВТОМАТИЗИРОВАННОМУ ЭЛЕКТРОПРИВОДУ АЭП-2014 (PROCEEDINGS OF THE VIII INTERNATIONAL (XIX ALL-RUSSIAN) CONFERENCE ON THE AUTOMATIC ELECTRIC DRIVE).

Из 730 авторов докладов 180 имеют научные степени, 420 – аспиранты и студенты, 130 – научные сотрудники и инженерно-технические работники.

Для сравнения с конференцией в г. Саранске, на Тульской конференции АЭП-2010 было 370 авторов докладов, а на Ивановской конференции АЭП-2012 – 490.

Работа конференции проходила в форме публичных и стендовых докладов на Пленарном заседании и на 3 секциях:

1. Общие и теоретические вопросы автоматизированного электропривода.
2. Новые электроприводы, электродвигатели, преобразователи и устройства управления;
3. Актуальные вопросы автоматизированного электропривода в отраслях промышленности, энергетики, коммунальном хозяйстве.

В рамках конференции были также проведены: – деловая встреча участников конференции с руководителями и специалистами ОАО «Электровыпрямитель»;

– молодежная научная школа, на которой перед студентами и аспирантами выступили иностранные ученые;

– круглый стол по теме «Образовательные технологии по направлению подготовки «Электроэнергетика и электротехника».

ПРОБЛЕМЫ И ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ

На пленарное заседание конференции организаторы вынесли доклады ведущих российских ученых в области автоматизированного электропривода, раскрывших существующие проблемы и перспективные направления в своих областях исследований. Профессора Онищенко Г.Б. и Юньков М.Г. постарались раскрыть проблемы и перспективы развития Российского электропривода [1]. Основными проблемами выделены энергоэффективность создаваемых электроприводов и переподготовка инженерных кадров для обслуживания автоматизированных систем.

Генеральный директор ЗАО НПК «Электровыпрямитель» подчеркнул, что переход на полупроводниковые приборы нового поколения на основе карбида кремния позволит на порядок улучшить показатели силовой техники по напряжению, току, допустимой температуре и быстродействию [2].

В докладе ведущих специалистов ОАО «Электровыпрямитель» г. Саранск представлены основные конструктивные решения и особенности унифицированных силовых сборок, изготавливаемых для комплектации преобразовательной техники [3].

Ведущие специалисты в области конструирования электрических машин Беспалов В.Я., Кобелев А.С., Кругликов О.В. и Макаров Л.Н. представили новую серию электрических машин 7AVE, имеющую высокий и высший классы энергоэффективности [4]. Затронута проблема типоразмеров «идеальной» серии, содержащей различные классы энергоэффективности.

Ведущие ученые в области регулируемого микропроцессорного электропривода переменного тока Национального исследовательского университета МЭИ Анучин А.С., Алямкин Д.И., Козаченко В.Ф., Лашкевич М.М. и Остритов В.Н. рассмотрели текущее состояние в области тягового привода городского транспорта в России, в московском метро и гибридной трансмиссии Ё-мобиля, предложена структура гибридного автобуса для города [5].

Ведущий научный сотрудник кафедры Автоматизированного электропривода «НИУ МЭИ» Балковой А.П. представил обзор мирового рынка сервоприводов, рассмотрены особенности нового поколения электрических машин, современных структур управления сервоприводами, пути высокоэффективного преобразования энергии в сервоприводе [6].

По результатам работы конференции было констатировано:

- автоматизированный электропривод является энергетической и интеллектуальной основой современного машинного производства. Развитие машиностроения, транспорта и ряда других отраслей и технологий невозможно без адекватного (а то и опережающего) развития техники электропривода;
- как основной потребитель электроэнергии электропривод является частью электроэнергетического комплекса, во многом определяя эффективность использования электроэнергии в машинном производстве и оказывая влияние на системы передачи и распределения электрической энергии;
- электропривод – это наукоемкая отрасль техники, его развитие базируется на последних достижениях фундаментальной науки; физики твердого тела, силовой электроники, микропроцессорной техники, электромеханики, теории автоматического управления и др.; создание электроприводов требует проведения теоретических и экспериментальных исследований, компьютерного моделирования;
- для электропривода характерны постоянное развитие, быстрая сменяемость поколений, генераций; короткие сроки морального устаревания;
- указанные особенности определяют необходимость достаточно высокой квалификации работников на всех стадиях жизненного цикла этой электротехнической продукции: разработки, производства, маркетинга и

эксплуатации.

По представленным докладом можно выделить современные и перспективные составляющие автоматизированного электропривода:

А. Электродвигатели:

- трехфазные асинхронные короткозамкнутые двигатели с самовентиляцией (АДК);
- трехфазные асинхронные двигатели с фазным ротором в режиме синхронизированного асинхронного двигателя или машины двойного питания (АДФ, МДП);
- трехфазные синхронные двигатели с постоянными магнитами (СДМ);
- трехфазные асинхронизированные вентильные двигатели (АВД);
- трехфазный вентильно-индукторный электропривод с независимым возбуждением для тяговых установок (ВИД);
- трехфазные асинхронные двигатели по системе двигатель – колесо в тяговых установках.

Б. Силовые преобразователи:

- устройства плавного пуска (УПП) на тиристорах до 6,3 кВ;
- двухуровневые инверторы напряжения (АИН) на 0,4 и 0,69 кВ;
- трехуровневые инверторы напряжения;
- неуправляемые выпрямители (НВ) с гасящими сопротивлениями;
- активные выпрямители (АВ) для питания автономных инверторов от сети;
- суперконденсаторы (ионные накопители) с активными выпрямителями для подпитки звена постоянного напряжения в режимах перегрузки (пуск) для тяговых автономных установок;
- преобразователи частоты на тиристорах (ПЧТ).

В. Элементная база силовых преобразователей:

- тиристоры с воздушным или водяным охлаждением;
- IGBT транзисторы на основе кремния с воздушным или водяным охлаждением;
- IGBT, JFET, MOSFET транзисторы на основе карбида кремния (улучшение характеристик по напряжению и частоте на порядок) с воздушным или водяным охлаждением.

Г. Системы регулирования:

- преобразователи частоты с асинхронными двигателями со скалярным регулированием;
- преобразователи частоты с асинхронными двигателями, с векторным датчиковым и бездатчиковым регулированием;
- преобразователи частоты с АД и прямым управлением момента;
- матричные преобразователи частоты;
- ПЧ с СД и ВД с векторным регулированием;
- наблюдатели состояния, адаптивные, комбинированные системы регулирования.

Д. Элементная база систем регулирования:

- специализированные микропроцессорные контроллеры (СМПК);
- программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС) и СМПК.

Е. Датчики координат:

- датчики тока и напряжения с эффектом Холла;
- инкрементальные энкодеры;

- абсолютные энкодеры;
- резольверы (синус-косинусные датчики поворота).

Основные проблемы и задачи развития автоматизированного электропривода на современном этапе можно определить как следующие:

1. Повышение энергоэффективности машинного производства и энергосбережение средствами электропривода и технологичной автоматики.
2. Расширение области применения электропривода на сферу транспорта.
3. Повышение технических характеристик и конкурентоспособности отечественных преобразователей частоты для электропривода, в том числе высоковольтных на напряжение 6,0 и 10,0 кВ.
4. Развитие отечественного производства управляемых силовых полупроводниковых приборов и преобразователей электрической энергии на их основе, в том числе по программам импортозамещения.
5. Решение проблем совместимости полупроводниковых преобразователей с питающей сетью и нагрузкой.
6. Новый подход к проектированию электрических распределительных сетей с учетом массового использования полупроводниковых преобразователей.
7. Ускорение разработок, производства и использования энергосберегающих электродвигателей.
8. Развитие производства интегрированных конструкций машин, объединяющих технологическую машину, двигатель, редуктор, полупроводниковый преобразователь и микропроцессорные устройства управления.
9. Интеллектуализация электроприводов и технологических агрегатов в целом, обеспечивающая требуемое качество ведения технологических процессов, защиту и диагностику оборудования, автоматическую настройку и другие интеллектуальные функции.
10. Организационное и методологическое совершенствование подготовки специалистов с высшим образованием по профилям «Электропривод и автоматика», «Электромеханика и силовая полупроводниковая преобразовательная техника».
11. Организация эффективной системы повышения квалификации и переподготовки инженерного и технического состава специалистов, работающих в области автоматизированного электропривода, автоматики и силовой полупроводниковой преобразовательной техники.

Участники конференции отметили высокий научно-технический уровень представленных докладов и дискуссий, творческую активность участников, хорошую организацию проведения конференции со стороны руководства и сотрудников Национального исследовательского Мордовского государственного университета им. Н.П.Огарева и отдельно высказали слова благодарности Тутаеву Г.Н.

Для улучшения работы последующих конференций желательно в сборнике трудов иметь алфавитный перечень авторов докладов с указанием страниц их докладов. Дополнительно необходимо упростить процедуру расчета за участие в конференции. Почему нельзя брать деньги с физических лиц?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Онищенко Г.Б., Юньков М.Г. Проблемы и перспективы развития электропривода // Труды VIII Международной (XIX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2014. Саранск, 2014. С. 5-9.
2. Гейфман Е.М. Современное состояние и перспективы развития полупроводниковых приборов на основе карбида кремния // Труды VIII Международной (XIX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2014. Саранск, 2014. С. 9-13.
3. Силовые полупроводниковые блоки компании ОАО «Электровыпрямитель» для мощных преобразователей электрической энергии / В.В. Елисеев, В.А. Мартыненко, В.Г. Muskатынев, С.И. Толкачев, В.С. Алешин // Труды VIII Международной (XIX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2014. Саранск. С. 14-18.
4. Беспалов В.Я., Кобелев А.С., Макаров Л.Н. Новая высокоэффективная серия асинхронных двигателей 7AV, её модификации и специализированные исполнения // Труды VIII Международной (XIX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2014. Саранск, 2014. С. 19-23.
5. Состояние и перспективы развития городского гибридного и электрического тягового электропривода в России / А.С. Анучин, Д.И. Алямки, В.Ф. Козаченко, М.М. Лашкевич, В.Н. Остритов // Труды VIII Международной (XIX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2014. Саранск. С. 24-27.
6. Балковой А.П. Сервопривод: рынок и направление развития // Труды VIII Международной (XIX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2014. Саранск, 2014. С. 28-32.

INFORMATION IN ENGLISH

MAIN DEVELOPMENT PROSPECTS OF AUTOMATIC ELECTRIC DRIVE

Omelchenko E.Ya.

The proceedings of the VIII International (XIX All-Russian) conference on the automatic electric drive have been summarized by general and theoretical issues of the automatic electric drive, new drive systems, motors, converters, control devices, topical issues of automatic electric drive in the sectors of industry, energy, utilities, new educational technologies, training of engineers and scientists in the field of Energy and electronics.

Keywords: automatic electric drive, efficiency, reliability, performance, quality.

REFERENCES

1. Onischenko G.B., Yunkov M.G. *Problemy i perspektivy*

razvitiya elektropriroda [Issues and prospects of electric drive development]. Proceedings of the VIII International (XIX All-Russian) conference on the automatic electric drive AED -2014, Saransk, pp. 5-9.

2. Geifman E.M. *Sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya poluprovodnikovyyh priborov na osnove karbida kremniya* [Current state and prospects of semiconductor devices development on the basis of silicon carbide]. Proceedings of the VIII International (XIX All-Russian) conference on the automatic electric drive AED -2014, Saransk, pp. 9-13.

3. Eliseev V.V., Martynenko V.A., Muskатыnev V.G., Tolkahev S.I., Alechin V.C. *Silovye poluprovodnikovye bloki*

OAO "Elektrovypryamitel" dlya moschnykh preobrazovatelei elektricheskoi energii [Power solid-state blocks of the OJSC "Rectifying Device" for powerful electric energy transducers]. Proceedings of the VIII International (XIX All-Russian) conference on the automatic electric drive AED -2014, Saransk, pp. 14-18.

4. Bepalov V.Ya., Kobelev A.S., Makarov L.N. *Novaya vysokoeffektivnaya seriya asinhronnykh dvigatelei 7av, nye modifikatsii i spetsializirovannye ispolneniya* [New line of high-performance induction 7AV motors, their variants and customized versions]. Proceedings of the VIII International (XIX All-Russian) conference on the automatic electric drive AED -2014,

Saransk, pp. 19-23.

5. Anuchin A.S., Alyamkin D.I., Kozachenko V.F., Lashkevich M.M., Ostritov V.N. *Sostoyanie i perspektivy razvitiya gorodskogo gibridnogo i elektricheskogo tyagovogo elektroprivoda v rossii* [Current state and prospects of urban hybrid and traction electric drive development in Russia].// Proceedings of the VIII International (XIX All-Russian) conference on the automatic electric drive AED -2014, Saransk, pp. 24-27.

6. Balkovoi A.P. *Servoprivod: rynek i napravlenie razvitiya* [Servo drive: market and trends]. Proceedings of the VIII International (XIX All-Russian) conference on the automatic electric drive AED -2014, Saransk, pp. 28-32.

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

УДК 681.5

Дмитриенко В.Д., Заковоротный А.Ю.

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ К ЭКВИВАЛЕНТНЫМ ЛИНЕЙНЫМ
В КАНОНИЧЕСКОЙ ФОРМЕ БРУНОВСКОГО

Для универсального пакета моделирования MatLab разработана специализированная программа, которая автоматизирует преобразование широкого класса нелинейных систем управления к эквивалентному линейному виду в канонической форме Бруновского с помощью инволютивных распределений геометрической теории управления в пространстве «вход – состояние». В статье приводится пример применения программы для получения линейного эквивалента математической модели движения дизель-поезда, которая состоит из десяти обыкновенных нелинейных дифференциальных уравнений с четырьмя управлениями и описывает привод с двумя параллельно работающими тяговыми асинхронными двигателями. При этом синтезированная линейная модель в форме Бруновского имеет четыре клетки и индекс управляемости, равный четырем. Полученная линейная модель движения дизель-поезда может использоваться для поиска оптимальных управлений, а также для исследования процессов буксования и юза.

Ключевые слова: форма Бруновского, геометрическая теория управления, математическая модель движения дизель-поезда.

ВВЕДЕНИЕ

Вопросами оптимизации движения железнодорожного транспорта на протяжении десятилетий занималось множество ученых [1 – 7]. При этом многие исследования выполнялись с помощью математического моделирования на сложных моделях, описываемых системами обыкновенных нелинейных дифференциальных уравнений высокого порядка. Это приводило к серьезным трудностям при поиске оптимальных управлений тяговым подвижным составом, так как большинство из известных методов эффективно применимо лишь для объектов, которые описываются системами обыкновенных нелинейных дифференциальных уравнений не выше 2-3 порядка [8, 9]. В связи с этим в работах [7, 10, 11] была решена задача поиска оптимальных управлений с помощью динамической линеаризации исходной нелинейной модели, методами геометрической теории управления, при этом были получены законы оптимального управления для объектов, которые описывались системами нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений 5-6 порядка. Однако аналитическое преобразование исходных нелинейных систем к линейному виду в форме Бруновского требует трудоемких аналитических преобразований. Поэтому для поиска оптимальных законов управления реальным приводом, который учитывает параллельную работу нескольких электродвигателей, необходима разработка специализированных программных средств, которые могли бы автоматизировать процесс преобразования нелинейных систем к линейному виду.

Целью статьи является разработка программных средств, автоматизирующих в пакете Matlab преобразование нелинейной математической модели движения дизель-поезда к эквивалентному линейному виду в форме Бруновского с помощью инволютивных распределений геометрической теории управления.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ, ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ,
ТЕХНИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДИКИ

Подход, основанный на геометрической теории управления, динамической линеаризации обратной

связью в пространстве «вход – состояние» нелинейной математической модели движения дизель-поезда, с помощью последовательности инволютивных распределений, может быть представлен в виде алгоритма:

Шаг 1. Задание исходной системы нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений.

Шаг 2. Построение векторных полей, связанных с нелинейной системой дифференциальных уравнений.

Шаг 3. Проверка последовательности распределений на выполнение условий инволютивности. В случае выполнения условий инволютивности последовательности распределений – переход к шагу 5 алгоритма.

Шаг 4. В случае невыполнения условий инволютивности последовательности распределений – увеличение размерности пространства, путем введения дополнительных фазовых координат в каналы, связанные с управлениями. Переход к шагу 2 алгоритма.

Шаг 5. Определение индекса управляемости для рассматриваемой системы управления, используя теорему о линейном эквиваленте для нелинейной аффинной системы с векторным управлением.

Шаг 6. По индексу управляемости системы определяется форма линейного эквивалента, т.е. определяется количество клеток канонической формы Бруновского.

Шаг 7. Построение системы дифференциальных уравнений, из которой путем последовательного дифференцирования, вдоль соответствующих векторных полей, определяются функции перехода к канонической форме Бруновского.

Шаг 8. Нахождение функций перехода к канонической форме Бруновского.

Шаг 9. Определение управляющих воздействий для линейной системы уравнений в канонической форме Бруновского.

Шаг 10. Переход от управлений линейной системой в форме Бруновского к управлениям для исходной нелинейной системы уравнений.

Шаг 11. Останов.

Этот алгоритм программно реализован в пакете Matlab.

Рассмотрим применение разработанного программного продукта для линеаризации математической

модели движения дизель-поезда.

Математическая модель движения дизель-поезда, учитывающая работу двух тяговых приводов, может быть описана следующей системой обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{dx_1}{dt} &= a_{12}x_2 = f_1; \\ \frac{dx_2}{dt} &= a_{235}x_3x_5 - a_{246}x_4x_6 + \\ &+ a_{289}x_8x_9 - a_{2,7,10}x_7x_{10} - a_{200} - \\ &- a_{220}x_2 - a_{222}x_2^2 = f_2; \\ \frac{dx_3}{dt} &= a_{33}x_3 + a_{34}x_4 + U_1^1 = f_3 + U_1^1; \\ \frac{dx_4}{dt} &= a_{43}x_3 + a_{44}x_4 + a_{425}x_2x_5 = f_4; \\ \frac{dx_5}{dt} &= a_{55}x_5 + a_{56}x_6 + a_{524}x_2x_4 = f_5; \\ \frac{dx_6}{dt} &= a_{65}x_5 + a_{66}x_6 + U_2^1 = f_6 + U_2^1; \\ \frac{dx_7}{dt} &= a_{77}x_7 + a_{78}x_8 + a_{729}x_2x_9 = f_7; \\ \frac{dx_8}{dt} &= a_{87}x_7 + a_{88}x_8 + U_1^2 = f_8 + U_1^2; \\ \frac{dx_9}{dt} &= a_{99}x_9 + a_{9,10}x_{10} + a_{9,2,7}x_2x_7 = f_9; \\ \frac{dx_{10}}{dt} &= a_{10,9}x_9 + a_{10,10}x_{10} + U_2^2 = f_{10} + U_2^2, \end{aligned} \quad (1)$$

где x_1 – расстояние, отсчитываемое от начала перегона; t – время; $a_{12}, a_{235}, a_{246}, \dots, a_{10,9}, a_{10,10}$ – постоянные коэффициенты, определяемые параметрами привода; x_2 – скорость движения состава; x_3, x_4 и x_7, x_8 – потокоцепления по оси u соответственно первого и второго двигателей; x_5, x_6 и x_9, x_{10} – потокоцепления по оси v соответственно первого и второго двигателей; U_1^q, U_2^q ($q=1,2$) – питающие напряжения первого и второго тяговых двигателей.

С системой дифференциальных уравнений (1) связаны векторные поля:

$$\begin{aligned} X(x) &= [f_1, f_2, f_3, f_4, f_5, f_6, f_7, f_8, f_9, f_{10}]^T, \\ Y_1 &= [0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]^T, \\ Y_2 &= [0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0]^T, \\ Y_3 &= [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0]^T, \\ Y_4 &= [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1]^T, \end{aligned}$$

которые в пакете MatLab могут быть заданы следующим образом:

```
f1 = sym('a12 * x2');
```

```
f2 = sym('a235 * x3 * x5 - a246 * x4 * x6 + a289 * x8 * x9 - a2710 * x7 * x10 - a200 - a220 * x2 - a222 * x2^2');
f3 = sym('a33 * x3 + a34 * x4');
f4 = sym('a43 * x3 + a44 * x4 + a425 * x2 * x5');
f5 = sym('a55 * x5 + a56 * x6 + a524 * x2 * x4');
f6 = sym('a65 * x5 + a66 * x6');
f7 = sym('a77 * x7 + a78 * x8 + a729 * x2 * x9');
f8 = sym('a87 * x7 + a88 * x8');
f9 = sym('a99 * x9 + a910 * x10 + a927 * x2 * x7');
f10 = sym('a109 * x9 + a1010 * x10');
X = [f1; f2; f3; f4; f5; f6; f7; f8; f9; f10];
Y1 = [0; 0; sym('1'); 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0];
Y2 = [0; 0; 0; 0; 0; sym('1'); 0; 0; 0; 0];
Y3 = [0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; sym('1'); 0; 0];
Y4 = [0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; sym('1')];
x = [sym('x1') 'x2' 'x3' 'x4' 'x5' 'x6' 'x7' 'x8' 'x9' 'x10'];
```

Система уравнений (1) может быть преобразована к форме Бруновского только в случае, если инволютивны распределения $M^0 = \text{span}\{Y_1, Y_2, Y_3, Y_4\}$, $M^1 = \text{span}\{Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, L_X Y_1, L_X Y_2, L_X Y_3, L_X Y_4\}$ и M^2 для этой системы [11], где $\text{span}\{Y_1, Y_2, Y_3, Y_4\}$ – линейная оболочка векторов Y_1, Y_2, Y_3, Y_4 , $L_X Y_k$ ($k=1, 4$) – производные Ли вдоль векторного поля X векторных полей Y_k ($k=1, 4$). Производные Ли вычисляются следующим образом:

$$\begin{aligned} L_X Y_k &= [X, Y_k] = \frac{\partial Y_k}{\partial x} X - \frac{\partial X}{\partial x} Y_k = - \frac{\partial X}{\partial x} Y_k = \\ &= - \begin{vmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_{10}} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial x_{10}} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial f_{10}}{\partial x_1} & \frac{\partial f_{10}}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_{10}}{\partial x_{10}} \end{vmatrix} \cdot Y_k, \quad k=1, 4. \end{aligned}$$

В пакете MatLab разработаны функции для вычисления производных Ли (*Dif_Li*) и проверки условий инволютивности последовательности распределений (*involutivity*). Функция *Dif_Li(X, Y, x, N)* возвращает N -ю производную Ли вдоль векторного поля X векторного поля Y , по элементам вектора x , а функция *involutivity(M, x)* возвращает 1, если для распределения M условия инволютивности выполняются и 0 – если нет.

Проверку инволютивности распределения M^0 в пакете MatLab можно осуществить следующим образом:

```
M0 = [Y1, Y2, Y3, Y4];
involutive = involutivity(M0, x);
>>involutive = 1.
```

Поскольку векторные поля Y_i ($i=1, 4$) постоянны, то распределение M^0 – инволютивно и размерность распределения $\dim M^0 = 4$.

Проанализируем распределение M^1 , для этого сначала осуществим вычисления производных Ли:

```
C1_1 = Dif_Li(X, Y1, x, 2);
M1_1 = C1_1(:, 1 : (size(C1_1, 2) - 1));
C1_2 = Dif_Li(X, Y2, x, 2);
M1_2 = C1_2(:, 1 : (size(C1_2, 2) - 1));
C1_3 = Dif_Li(X, Y3, x, 2);
M1_3 = C1_3(:, 1 : (size(C1_3, 2) - 1));
C1_4 = Dif_Li(X, Y4, x, 2);
M1_4 = C1_4(:, 1 : (size(C1_4, 2) - 1));
M1=[M1_1(:,1), M1_2(:,1), M1_3(:,1), M1_4(:,1),
M1_1(:,2), M1_2(:,2), M1_3(:,2), M1_4(:,2)];
involutive = involutivity(M1, x);
>>involutive = 0
```

Непосредственная проверка скобок Ли $[X_i, X_j]$, где X_i, X_j – векторные поля из множества $\{Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, L_X Y_1, L_X Y_2, L_X Y_3, L_X Y_4\}$ и ранга матриц $B_i = \|Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, L_X Y_1, L_X Y_2, L_X Y_3, L_X Y_4, [X_i, X_j]\|$ показывает, что распределение M^1 не является инволютивным, однако все его подраспределения $M_k^1 = \text{span}\{Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, L_X Y_k\}$, $k = 1, 4$, являются инволютивными:

```
M11=[M1_1(:,1), M1_2(:,1), M1_3(:,1),
M1_4(:,1), M1_1(:,2)];
involutive = involutivity(M11, x);
>>involutive = 1
M12=[M1_1(:,1), M1_2(:,1), M1_3(:,1),
M1_4(:,1), M1_2(:,2)];
involutive = involutivity(M12, x);
>>involutive = 1
M13=[M1_1(:,1), M1_2(:,1), M1_3(:,1),
M1_4(:,1), M1_3(:,2)];
involutive = involutivity(M13, x);
>>involutive = 1
M14=[M1_1(:,1), M1_2(:,1), M1_3(:,1),
M1_4(:,1), M1_4(:,2)];
involutive = involutivity(M14, x);
>>involutive = 1.
```

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 M^1 для расширенной системы. Распределение M^1 становится инволютивным только при введении одного интегратора в каждый канал объекта управления.

Для расширенной модели объекта управления введем следующие обозначения:

$$y_i = x_i, \quad i = \overline{1, 3}; \quad y_4 = U_1^1; \quad U_1 = \frac{dy_4}{dt};$$

$$y_5 = x_4; \quad y_6 = x_5; \quad y_7 = x_6; \quad y_8 = U_2^1; \quad U_2 = \frac{dy_8}{dt};$$

$$y_9 = x_7; \quad y_{10} = x_8; \quad y_{11} = U_3^2; \quad U_3 = \frac{dy_{11}}{dt};$$

$$y_{12} = x_9; \quad y_{13} = x_{10}; \quad y_{14} = U_4^2; \quad U_4 = \frac{dy_{14}}{dt}.$$

В этих обозначениях расширенная модель объекта записывается следующим образом:

$$\frac{dy_1}{dt} = \varphi_1 = a_{12}y_2;$$

$$\frac{dy_2}{dt} = \varphi_2 = a_{235}y_3y_6 - a_{246}y_5y_7 + a_{289}y_{10}y_{12} -$$

$$- a_{2,7,10}y_9y_{13} - a_{200} - a_{220}y_2 - a_{222}y;$$

$$\frac{dy_3}{dt} = \varphi_3 = a_{33}y_3 + a_{34}y_5 + y_4;$$

$$\frac{dy_4}{dt} = U_1; \quad \varphi_4 = 0;$$

$$\frac{dy_5}{dt} = \varphi_5 = a_{43}y_3 + a_{44}y_5 + a_{425}y_2y_6;$$

$$\frac{dy_6}{dt} = \varphi_6 = a_{55}y_6 + a_{56}y_7 + a_{524}y_2y_5;$$

$$\frac{dy_7}{dt} = \varphi_7 = a_{65}y_6 + a_{66}y_7 + y_8;$$

$$\frac{dy_7}{dt} = \varphi_7 = a_{65}y_6 + a_{66}y_7 + y_8;$$

$$\frac{dy_8}{dt} = U_2; \quad \varphi_8 = 0;$$

$$\frac{dy_9}{dt} = \varphi_9 = a_{77}y_9 + a_{78}y_{10} + a_{729}y_2y_{12};$$

$$\frac{dy_{10}}{dt} = \varphi_{10} = a_{87}y_9 + a_{88}y_{10} + y_{11};$$

$$\frac{dy_{11}}{dt} = U_3; \quad \varphi_{11} = 0;$$

$$\frac{dy_{12}}{dt} = \varphi_{12} = a_{99}y_{12} + a_{9,10}y_{13} + a_{927}y_2y_9;$$

$$\frac{dy_{13}}{dt} = \varphi_{13} = a_{10,9}y_{12} + a_{10,10}y_{13} + y_{14};$$

$$\frac{dy_{14}}{dt} = U_4; \quad \varphi_{14} = 0.$$

С этой моделью объекта управления в обозначениях пакета MatLab связаны следующие векторные поля:

```
Y_new = [phi1; phi2; phi3; phi4; phi5; phi6; phi7; phi8; phi9; phi10; phi11;
phi12; phi13; phi14];
Y1_new = [0; 0; 0; sym('1'); 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0];
Y2_new = [0; 0; 0; 0; 0; 0; sym('1'); 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0];
Y3_new = [0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; sym('1'); 0; 0; 0];
Y4_new = [0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; sym('1'); 0];
y_new = [sym('y1') 'y2' 'y3' 'y4' 'y5' 'y6' 'y7' 'y8' 'y9' 'y10'
'y11' 'y12' 'y13' 'y14'],
```

где

```

φ1 = sym('a12 * y2');
φ2 = sym('a235 * y3 * y6 - a246 * y5 * y7 + a289 * y10 *
y12 - a2710 * y9 * y13 - a200 - a220 * y2 - a222 * y2^2');
φ3 = sym('a33 * y3 + a34 * y5 + y4');
φ4 = sym('0');
φ5 = sym('a43 * y3 + a44 * y5 + a425 * y2 * y6');
φ6 = sym('a55 * y6 + a56 * y7 + a524 * y2 * y5');
φ7 = sym('a65 * y6 + a66 * y7 + y8');
φ8 = sym('0');
φ9 = sym('a77 * y9 + a78 * y10 + a729 * y2 * y12');
φ10 = sym('a87 * y9 + a88 * y10 + y11');
φ11 = sym('0');
φ12 = sym('a99 * y12 + a910 * y13 + a927 * y2 * y9');
φ13 = sym('a109 * y12 + a1010 * y13 + y14');
φ14 = sym('0').

```

Поскольку вектора $Y1_new=Y_1^*$, $Y2_new=Y_2^*$, $Y3_new=Y_3^*$, $Y4_new=Y_4^*$ постоянны, то распределение $M^{0*} = \text{span}\{Y_1^*, Y_2^*, Y_3^*, Y_4^*\}$ инволютивно.

```

M0_new=[Y1_new,Y2_new, Y3_new,Y4_new];
involutive = involutivity(M0_new, y_new);
>>involutive = 1.

```

Так как производные Ли вдоль векторного поля Y векторных полей Y_k^* ($k=1, 4$) являются постоянными векторами:

$$\begin{aligned}
 L_Y Y_1^* &= [Y, Y_1^*] = \frac{\partial Y_1^*}{\partial y} Y - \frac{\partial Y}{\partial y_1^*} Y_1^* = \\
 &= |0, 0, -1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0|^T; \\
 L_Y Y_2^* &= [Y, Y_2^*] = -\frac{\partial Y}{\partial y_2^*} Y_2^* = \\
 &= |0, 0, 0, 0, 0, 0, -1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0|^T; \\
 L_Y Y_3^* &= [Y, Y_3^*] = -\frac{\partial Y}{\partial y_3^*} Y_3^* = \\
 &= |0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, -1, 0, 0, 0|^T; \\
 L_Y Y_4^* &= [Y, Y_4^*] = -\frac{\partial Y}{\partial y_4^*} Y_4^* = \\
 &= |0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, -1, 0|^T,
 \end{aligned}$$

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

Проверка инволютивности распределения $M^{2*} = \text{span}\{Y_1^*, Y_2^*, Y_3^*, Y_4^*, L_Y Y_1^*, L_Y Y_2^*, L_Y Y_3^*, L_Y Y_4^*, L_Y^2 Y_1^*, L_Y^2 Y_2^*, L_Y^2 Y_3^*, L_Y^2 Y_4^*\}$, где $L_Y^2 Y_k^*$ ($k=1, 4$) – производные Ли второго порядка, показывает, что оно не является инволютивным.

```

M2_new = [M1_1_new(:,1), M1_2_new(:,1),
M1_3_new(:,1), M1_4_new(:,1), M1_1_new(:,2),
M1_2_new(:,2), M1_3_new(:,2), M1_4_new(:,2),
M1_1_new(:,3), M1_2_new(:,3), M1_3_new(:,3),
M1_4_new(:,3)];

```

```

involutive = involutivity(M2_new, y_new);
>>involutive = 0

```

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

$$\begin{aligned}
 M_1^{2*} &= \text{span}\{Y_1^*, Y_2^*, Y_3^*, Y_4^*, L_Y Y_1^*, \\
 &\quad L_Y Y_2^*, L_Y Y_3^*, L_Y Y_4^*, L_Y^2 Y_1^*\}; \\
 M_2^{2*} &= \text{span}\{Y_1^*, Y_2^*, Y_3^*, Y_4^*, L_Y Y_1^*, \\
 &\quad L_Y Y_2^*, L_Y Y_3^*, L_Y Y_4^*, L_Y^2 Y_2^*\}; \\
 M_3^{2*} &= \text{span}\{Y_1^*, Y_2^*, Y_3^*, Y_4^*, L_Y Y_1^*, \\
 &\quad L_Y Y_2^*, L_Y Y_3^*, L_Y Y_4^*, L_Y^2 Y_3^*\}; \\
 M_4^{2*} &= \text{span}\{Y_1^*, Y_2^*, Y_3^*, Y_4^*, L_Y Y_1^*, \\
 &\quad L_Y Y_2^*, L_Y Y_3^*, L_Y Y_4^*, L_Y^2 Y_4^*\}.
 \end{aligned}$$

```

M21_new = [M1_1_new(:,1), M1_2_new(:,1),
M1_3_new(:,1), M1_4_new(:,1),
M1_1_new(:,2), M1_2_new(:,2), M1_3_new(:,2),
M1_4_new(:,2), M1_1_new(:,3)];
involutive = involutivity(M21_new, y_new);
>>involutive = 1
M22_new = [M1_1_new(:,1), M1_2_new(:,1),
M1_3_new(:,1), M1_4_new(:,1),
M1_1_new(:,2), M1_2_new(:,2), M1_3_new(:,2),
M1_4_new(:,2), M1_2_new(:,3)];
involutive = involutivity(M22_new, y_new);
>>involutive = 1
M23_new = [M1_1_new(:,1), M1_2_new(:,1),
M1_3_new(:,1), M1_4_new(:,1),
M1_1_new(:,2), M1_2_new(:,2), M1_3_new(:,2),
M1_4_new(:,2), M1_3_new(:,3)];
involutive = involutivity(M23_new, y_new);
>>involutive = 1
M24_new = [M1_1_new(:,1), M1_2_new(:,1),
M1_3_new(:,1), M1_4_new(:,1),
M1_1_new(:,2), M1_2_new(:,2), M1_3_new(:,2),
M1_4_new(:,2), M1_4_new(:,3)];
involutive = involutivity(M24_new, y_new);
>>involutive = 1

```

Этого оказывается достаточно для осуществления динамической линеаризации и получения системы линейных дифференциальных уравнений в форме Бруновского. На основании теоремы о линейных эквивалентах для нелинейных аффинных систем с m управлениями [11] получим, что каноническая форма Бруновского имеет четыре клетки, а индекс управляемости $k_{\max}$ для данного объекта равен четырём. Математическая модель объекта управления в форме Бруновского в пространстве «вход – состояние»:

$$\begin{aligned}
 \frac{dz_i}{dt} &= z_{i+1}, \quad i=1, 13, \quad i \neq 4, 8, 11; \\
 \frac{dz_4}{dt} &= v_1; \quad \frac{dz_8}{dt} = v_2; \quad \frac{dz_{11}}{dt} = v_3; \quad \frac{dz_{14}}{dt} = v_4,
 \end{aligned} \quad (2)$$

где v_j ($j=1, 4$) – управления.

Поскольку модель объекта в форме Бруновского

имеет четыре клетки, то необходимо определить четыре функции $T_j(y)$ ($j=1, 4$), 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 [8, 11]. В данном случае они являются однокомпонентными составляющими вектора $y = (y_1, y_2, \dots, y_{14})$. Из этих функций путем последовательного дифференцирования вдоль векторного поля $Y^* = Y + U_1 Y_1^* + U_2 Y_2^* + U_3 Y_3^* + U_4 Y_4^*$ можно получить выражения для определения соответственно z_2, z_3, z_4 (из функции $T_1(y)$), z_6, z_7, z_8 (из функции $T_2(y)$), z_{10}, z_{11} (из функции $T_3(y)$) и z_{13}, z_{14} (из функции $T_4(y)$). В качестве примера рассмотрим получение зависимостей для определения z_2, z_3, z_4 с помощью функции $T_1(y)$. Для исследуемого объекта управления имеем: $T_1(y) = y_1$, поэтому $z_1 = y_1$.

```
T1 = [sym('y1')];
[Z_2_3_4, V1] = brunovsky(Y_new, [Y1_new], T1,
y_new, 4);
Z_2_3_4 = simple(Z_2_3_4)
```

Дифференцируя функцию $T_1(y)$ вдоль векторного поля Y^* и учитывая, что z_2, z_3 и их производные не зависят от управлений, с помощью программы получим:

```
>>Z_2_3_4 =
[a12*y2;
-a12*(a222*y2^2 + a220*y2 + a200 - a289*y10*y12 -
a235*y3*y6 + a2710*y13*y9 + a246*y5*y7);
a12*(a220 + 2*a222*y2)*(a222*y2^2 + a220*y2 + a200 -
a289*y10*y12 - a235*y3*y6 + a2710*y13*y9 +
a246*y5*y7) - a12*a246*y7*(a43*y3 + a44*y5 +
a425*y2*y6) - a12*a2710*y13*(a78*y10 + a77*y9 +
a729*y12*y2) + a12*a235*y3*(a55*y6 + a56*y7 +
a524*y2*y5) + a12*a289*y10*(a910*y13 + a99*y12 +
a927*y2*y9) - a12*a2710*y9*(y14 + a109*y12 +
a1010*y13) + a12*a235*y6*(y4 + a33*y3 + a34*y5) +
a12*a289*y12*(y11 + a88*y10 + a87*y9) -
a12*a246*y5*(y8 + a65*y6 + a66*y7)];
```

Таким образом, функции перехода к канонической форме Бруновского могут быть записаны следующим образом:

$$\begin{aligned} z_2 &= \frac{dz_1}{dt} = L_Y \cdot T_1(y) = \\ &= L_Y T_1(y) = \sum_{i=1}^{14} \frac{\partial T_1(y)}{\partial y_i} \varphi_i = a_{12} y_2; \\ z_3 &= \frac{dz_2}{dt} = L_Y \cdot (L_Y T_1(y)) = \\ &= L_Y (a_{12} y_2) = \sum_{i=1}^{14} \frac{\partial (L_Y T_1(y))}{\partial y_i} \varphi_i = a_{12} \varphi_2 = \end{aligned}$$

$$= a_{12} (a_{235} y_3 y_6 - a_{246} y_5 y_7 + a_{289} y_{10} y_{12} - a_{2,7,10} y_9 y_{13} - a_{200} - a_{220} y_2 - a_{222} y_2^2);$$

$$\begin{aligned} z_4 &= \frac{dz_3}{dt} = L_Y \cdot (L_Y^2 T_1(y)) = \\ &= L_Y (a_{12} \varphi_2) = \sum_{i=1}^{14} \frac{\partial (L_Y (a_{12} \varphi_2))}{\partial y_i} \varphi_i = \\ &= a_{12} [(-a_{220} - 2a_{222} y_2) \varphi_2 + a_{235} y_6 \varphi_3 - \\ &\quad - a_{246} y_7 \varphi_5 + a_{235} y_3 \varphi_6 - a_{246} y_5 \varphi_7 - \\ &\quad - a_{2,7,10} y_{13} \varphi_9 + a_{289} y_{12} \varphi_{10} + \\ &\quad + a_{289} y_{10} \varphi_{12} - a_{2,7,10} y_9 \varphi_{13}]. \end{aligned}$$

Аналогичным образом, задавшись значениями функций $T_2(y) = y_5 = z_5$, $T_3(y) = y_9 = z_9$, $T_4(y) = y_{12} = z_{12}$, с помощью программы получены соотношения для определения остальных переменных модели Бруновского:

$$\begin{aligned} z_6 &= \frac{dz_5}{dt} = a_{43} y_3 + a_{44} y_5 + a_{425} y_2 y_6; \\ z_7 &= \frac{dz_6}{dt} = a_{43} \varphi_3 + a_{44} \varphi_5 + a_{425} y_6 \varphi_2 + a_{425} y_2 \varphi_6; \\ z_8 &= \frac{dz_7}{dt} = \sum_{i=1}^{14} \frac{a_{43} \varphi_3 + a_{44} \varphi_5 + a_{425} y_6 \varphi_2 + a_{425} y_2 \varphi_6}{dy_i} \varphi_i; \\ z_{10} &= \frac{dz_9}{dt} = a_{77} y_9 + a_{78} y_{10} + a_{729} y_2 y_{12}; \\ z_{11} &= \frac{dz_{10}}{dt} = a_{729} y_{12} \varphi_2 + a_{77} \varphi_9 + a_{78} \varphi_{10} + a_{729} y_2 \varphi_{12}; \\ z_{13} &= \frac{dz_{12}}{dt} = a_{99} y_{12} + a_{9,10} y_{13} + a_{927} y_2 y_9; \\ z_{14} &= \frac{dz_{13}}{dt} = a_{927} y_9 \varphi_2 + a_{927} y_2 \varphi_9 + a_{99} \varphi_{12} + a_{9,10} y_{13}. \end{aligned}$$

На **рис. 1** и **2** приведены процессы, полученные с помощью математических моделей (1) и (2). На **рис. 1** с помощью переменных x_1 (модель (1)) и z_1 (модель (2)) показано изменение во времени пройденного дизель-поездом расстояния при разгоне состава до 60 км/ч на ровном участке железнодорожного пути. Как следует из рисунка, $x_1 \equiv z_1$. На **рис. 2** показаны изменения скорости дизель-поезда, полученные с помощью модели (1), переменная x_2 , и модели (2), переменная z_2 . Как видно из рисунка, $x_2 \equiv z_2$. Таким образом, линейная математическая модель в форме Бруновского (2) эквивалентна исходной нелинейной модели объекта (1).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Разработаны программные средства для автоматизации преобразования широкого класса нелинейных систем к линейному виду в пакете Matlab с помощью инволютивных распределений геометрической теории управления. Получена линейная математическая мо-

дель движения дизель-поезда в канонической форме Бруновского, которая учитывает параллельную работу двух тяговых двигателей. Полученная модель может использоваться для поиска оптимальных управлений, а также для исследования процессов буксования, юза и параллельной работы двигателей.

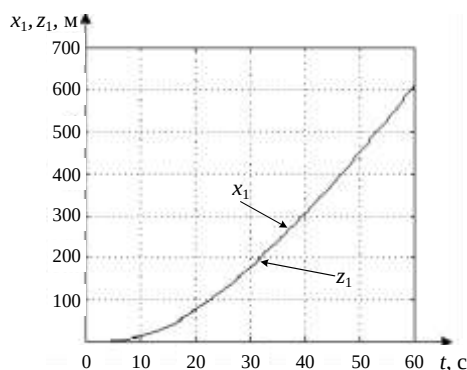


Рис. 1. Поведение переменных x_1 и z_1 во времени

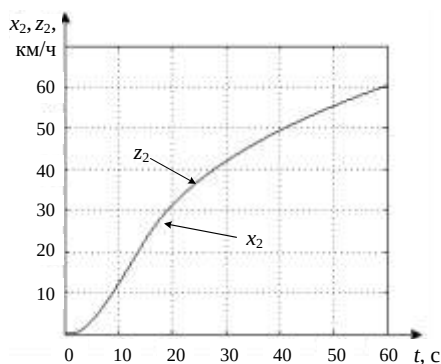


Рис. 2. Поведение переменных x_2 и z_2 во времени

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бауэр Х.П. Оптимальное использование сцепления на электровазе с трехфазным тяговым приводом // Железные дороги мира. 1987. № 8. С. 10-23.

2. Ohishi K., Ogawa Y. Adhesion control of electric motor coach based on force control using disturbance observer // IEEE, Advanced Motion Control. April, 2000. P. 323-328.

3. Шапран Е.Н. Совершенствование микропроцессорных систем управления с высоким использованием сил сцепления // Вісник НТУ "ХПІ". 2006. № 23. С. 145-154.

4. Моделирование и оптимизация систем управления и контроля локомотивов / Носков В.И., Дмитриенко В.Д., Запоровский Н.И., Леонов С.Ю. Х.: ХФИ "Транспорт Украины", 2003. 248 с.

5. Артеменко А.Н. Система автоматического выравнивания нагрузки тягового электропривода карьерного электроваза // Вісник Кременчуцького державного університету ім. Михайло Остроградського. 2010. Вип. 4. Частина 3. С. 56-58.

6. Притула М.Г., Шпакович Р.Р. Моделювання та розрахунок оптимальних параметрів руху поїздів // Фізико-математичне моделювання та інформаційні технології. 2007. Вип. 5. С. 139-145.

7. Дмитриенко В.Д., Заковоротный А.Ю. Синтез оптимальных законов управления тяговым электроприводом методами дифференциальной геометрии и принципа максимума // Системи обробки інформації. 2009. Вип. 4 (78). С. 42-51.

8. Методы классической и современной теории автоматического управления: Учебник в 5-ти томах. 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.

9. Методы классической и современной теории автоматического управления: Учебник в 5-ти томах. Т. 5: Методы современной теории управления / Под ред. К.А. Пупкова, Н.Д. Егунова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 784 с.

10. Дмитриенко В.Д. Моделирование и оптимизация процессов управления движением дизель-поездов / В.Д. Дмитриенко, А.Ю. Заковоротный. – Харьков: Изд. центр "НТМТ", 2013. – 248 с.

11. Краснощёченко В.И., Грищенко А.П. Нелинейные системы: геометрический метод анализа и синтеза М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2005. 520 с.

INFORMATION IN ENGLISH

CONVERSION OF NONLINEAR CONTROL SYSTEMS TO EQUIVALENT LINEAR ONES IN CANONICAL BRUNOVSKY FORM

Dmitrienko V.D., Zakovorotnyj A.Ju.

The authors developed a specialized program for the universal package of simulation MatLab that automates the conversion of a wide class of nonlinear control systems to the equivalent linear form in the canonical Brunovsky form using involutive distributions of geometric control theory in the space of "input - state". This article provides an example of an application program to obtain the equivalent linear mathematical model of the motion of diesel trains, which consists of ten ordinary nonlinear differential equations with four control circuits and describes the drive with two parallel running traction asynchronous motors. Thus the synthesized linear model in Brunovsky form has four cells and controllability index equal to four. The resulting linear motion model of a diesel train can be used to find the optimal controls and to study the slipping and skidding processes.

Keywords: Brunovsky form, geometric control theory, mathematical model of diesel train movement.

REFERENCES

1. Baujer H.P. *Optimalnoe ispolzovanie stceplenija na jelektrovoze s trehfaznym tjavovym privodom* [Optimum application of coupling at electric locomotive with a three-phase traction drive]. Zheleznye dorogi mira, 1987, no. 8, pp. 10-23.

2. Ohishi K., Ogawa Y. Adhesion control of electric motor coach based on force control using disturbance observer. IEEE, Advanced Motion Control. April, 2000, pp. 323-328.

3. Shapran E.N. *Sovershenstvovanie mikroprocessornyh sistem upravlenija s vysokim ispolzovaniem sil stseplenija* [Improvement of microprocessor control systems with intensive application of adhesive forces]. Visnik NTU "HPI", 2006, no. 23, pp. 145-154.

4. Noskov V.I., Dmitrienko V.D., Zapolovskij N.I., Leonov S.Ju. *Modelirovanie i optimizacija sistem upravlenija i kontrolja lokomotivov* [Simulation and optimization of locomotive control system] Harkov, HFI "Transport Ukrainy", 2003, 248 p.

5. Artemenko A.N. *Sistema avtomaticheskogo vyvaznivanja nagruzki tjavovogo elektroprivoda karyernogo elektrovoza* [System of automatic load balancing for traction electric drive of open-cast electric locomotive]. Visnik

Kremenchuk'kogo derzhavnogo universitetu im. Mihajlo Ostrograd'skogo. Kremenchuk: KDN im. Mihajlo Ostrograd'skogo. 2010, vol. 4, part 3, pp. 56-58.

6. Pritula M.G., Shpakovich R.R. Modeljuvannja ta rozrahunok optimal'nih parametriv ruhu poizdiv. Fiziko-matematichne modeljuvannja ta informacijni tehnologii. 2007. Is. 5, pp. 139-145.

7. Dmitrienko V.D., Zakovorotnyj A.Ju. Sintez optimalnyh zakonov upravlennja tjavovym elektroprivodom metodami differencialnoj geometrii i principa maksimuma [Synthesis of optimum control laws for traction electric drive using differential geometry methods and maximum principle]. Sistemi obrobki informacii, 2009, vol. 4(78), pp. 42-51.

8. Metody klassicheskoy i sovremennoj teorii avtomaticheskogo upravlennja [Methods of classical and modern theory of automatic control]. Textbook in 5 vol., vol. 4: Theory of automatic control systems optimization. Under the editorship of

K.A. Pupkov and I.D. Egunov. Moscow: Bauman MSTU, 2004, 784 p.

9. Metody klassicheskoy i sovremennoj teorii avtomaticheskogo upravlennja [Methods of classical and modern theory of automatic control]. Textbook in 5 volumes. Vol. 5: Methods of modern control theory. Under the editorship of K.A. Pupkov and N.D. Egunov. Moscow: Publishing house of Bauman MGTU, 2004, 784 p.

10. Dmitrienko V.D. Modelirovanie i optimizacija processov upravlennja dvizheniem dizel-poezdov [Simulation and optimization of control processes of diesel-trains movement] / V.D. Dmitrienko, A.Ju. Zakovorotnyj. Kharkov: Publishing house of "HTMT", 2013, 248 p.

11. Krasnoschjochenko V.I. Nelinejnye sistemy: geometricheskij metod analiza i sinteza [Nonlinear systems: geometrical method of analysis and synthesis] / V.I. Krasnoschjochenko, A.P. Grischenko. Moscow: Publishing house of Bauman MSTU, 2005, 520 p.

УДК 621.3.07, 681.5.015

Мезенцев Н.В., Гейко Г.В.

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ АСИНХРОННОГО ПРИВОДА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА

Качественное управление системой асинхронного электропривода предполагает знание точного значения его параметров. Однако часть параметров (это относится в основном к роторной оси) напрямую получить нельзя. В статье описан математический алгоритм, с помощью которого можно выполнять оценку физических параметров тягового асинхронного электродвигателя путем измерения значений токов и напряжений статорной обмотки двигателя, а также частоты вращения ротора. В основу алгоритма положена математическая модель тягового асинхронного привода с учетом ограничений, представленная в неподвижных осях ($\alpha, \beta, 0$). Приведено получение математической модели тягового привода, в которой исключены неподдающиеся прямому измерению величины. Определение части параметров электродвигателя реализовано с использованием метода наименьших квадратов. Для нахождения оставшихся параметров предложено использовать генетический алгоритм. Данный подход может быть использован для построения наблюдателя с целью коррекции существующих законов управления в системе управления движением тягового подвижного состава.

Ключевые слова: тяговый асинхронный привод, метод наименьших квадратов, генетический алгоритм.

ВВЕДЕНИЕ

В приводе дизель-поезда используются тяговые асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором, определение части фазовых координат которых напрямую невозможно [1]. Поэтому для улучшения статической и динамической работы электродвигателей в системе управления необходимо решать задачу идентификации фазовых координат (это относится в большей степени к роторным переменным). Данная задача решается за счет построения различного рода наблюдателей, которые реализуются на базе известных математических моделей. Однако параметры привода, в частности сопротивления и индуктивности обмоток статора и ротора, могут изменяться в процессе эксплуатации, что приводит к ошибкам в определении фазовых координат. В связи с этим возникает задача идентификации параметров привода. При этом для идентификации может быть использован ряд методов, большинство из которых основано на использовании фильтров Калмана [2,3] и метода наименьших квадратов [4 – 8]. Так, в работе [4] по методу наименьших квадратов может быть получена часть параметров привода. Для этого необходимо иметь измеренные значения тока и напряжения статора, их производных первого и второго порядков. В то же время получение остальных параметров (в частности, сопротивления и индуктивности

роторной обмотки и взаимной индуктивности) затруднено решением системы из двух нелинейных уравнений с тремя неизвестными. Однако в связи с тем, что диапазон изменения данных параметров по отношению к номинальным значениям известен, то в работе предлагается выполнять поиск этих параметров на основе генетического алгоритма. В работе [9] предлагается осуществлять поиск всех параметров генетическим алгоритмом, однако это приводит к большим временным затратам.

Целью статьи является идентификация параметров тягового асинхронного привода на основе метода наименьших квадратов и генетического алгоритма.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ, ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ, ТЕХНИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДИКИ

Математическая модель тягового асинхронного привода при общеизвестных допущениях может быть представлена в неподвижной системе координат ($\alpha, \beta, 0$) следующим образом:

$$\frac{di_{s\alpha}}{dt} = \frac{1}{\sigma L_s} U_{s\alpha} - \gamma i_{s\alpha} + \frac{\beta}{T_r} \Psi_{r\alpha} + p\beta\omega \Psi_{r\beta}; \quad (1)$$

$$\frac{di_{s\beta}}{dt} = \frac{1}{\sigma L_s} U_{s\beta} - \gamma i_{s\beta} + \frac{\beta}{T_r} \Psi_{r\beta} + p\beta\omega \Psi_{r\alpha}; \quad (2)$$

$$\frac{d\Psi_{r\alpha}}{dt} = \frac{L_m}{T_r} i_{s\alpha} - \frac{\Psi_{r\alpha}}{T_r} - p\omega \Psi_{r\beta}; \quad (3)$$

$$\frac{d\Psi_{r\beta}}{dt} = \frac{L_m}{T_r} i_{s\beta} - \frac{\Psi_{r\beta}}{T_r} - p\omega \Psi_{r\alpha}; \quad (4)$$

$$M = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{\sigma L_r} \Psi_{r\alpha} i_{s\beta} - \Psi_{r\beta} i_{s\alpha}; \quad (5)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{p}{J} (M - M_c); \quad (6)$$

где $i_{s\alpha}$, $i_{s\beta}$ – соответственно проекции тока статора на оси α и β ; t – время; $\sigma = 1 - k_s k_r = 1 - L_m^2 / (L_s L_r)$ – полный коэффициент рассеивания; L_m , L_s , L_r – соответственно взаимная индуктивность, индуктивность статора и ротора; $U_{s\alpha}$, $U_{s\beta}$ – соответственно проекции напряжения статора на оси α и β ; $\gamma = R_s / \sigma L_s + R_r L_m^2 / \sigma L_s L_r^2$; R_s , R_r – активные сопротивления статора и ротора; $\beta = L_m / \sigma L_s L_r$; $T_r = L_r / R_r$ – постоянная времени ротора; p – число пар полюсов; $\Psi_{r\alpha}$, $\Psi_{r\beta}$ – соответственно проекции потокосцеплений ротора на оси α и β ; ω – частота вращения ротора; J – приведенный момент инерции состава; M – электромагнитный момент; $M_c = b_0 + b_1 \omega + b_2 \omega^2$ – момент сопротивления движению; где b_0 , b_1 , b_2 – коэффициенты, которые зависят от параметров дизель-поезда и условий движения.

Для выполнения идентификации параметров привода (R_s , L_s , R_r , L_r , L_m) по методу наименьших квадратов необходимо выполнить преобразование модели (1)-(6) к виду, в котором исключены неподдающиеся измерению величины потокосцепления ротора. Для этого, объединив попарно уравнения (1) с (3) и (2) с (4), получим:

$$\frac{d\Psi_{r\alpha}}{dt} = \frac{1}{K_r} \left(U_{s\alpha} - R_s i_{s\alpha} - \sigma L_s \frac{di_{s\alpha}}{dt} \right); \quad (7)$$

$$\frac{d\Psi_{r\beta}}{dt} = \frac{1}{K_r} \left(U_{s\beta} - R_s i_{s\beta} - \sigma L_s \frac{di_{s\beta}}{dt} \right). \quad (8)$$

Далее, продифференцировав обе части выражения (1) и (2), получим:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 i_{s\alpha}}{dt^2} &= \frac{1}{\sigma L_s} \frac{dU_{s\alpha}}{dt} - \gamma \frac{di_{s\alpha}}{dt} + \\ &+ \frac{\beta}{T_r} \frac{d\Psi_{r\alpha}}{dt} + p\beta\omega \frac{d\Psi_{r\beta}}{dt} + p\beta \frac{d\omega}{dt} \Psi_{r\beta}; \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \frac{d^2 i_{s\beta}}{dt^2} &= \frac{1}{\sigma L_s} \frac{dU_{s\beta}}{dt} - \gamma \frac{di_{s\beta}}{dt} + \\ &+ \frac{\beta}{T_r} \frac{d\Psi_{r\beta}}{dt} + p\beta\omega \frac{d\Psi_{r\alpha}}{dt} + p\beta \frac{d\omega}{dt} \Psi_{r\alpha}. \end{aligned} \quad (10)$$

Подставив выражения (7) в (9), а (8) в (10) и выполнив соответствующие преобразования, с учетом

того, что $d\omega/dt \approx 0$, имеем

$$\begin{aligned} \frac{d^2 i_{s\alpha}}{dt^2} + p\omega \frac{di_{s\beta}}{dt} &= K_1 i_{s\alpha} + K_2 U_{s\alpha} + K_3 p\omega i_{s\beta} + \\ &+ K_4 \left(\frac{dU_{s\alpha}}{dt} + p\omega U_{s\beta} \right) + K_5 \frac{di_{s\alpha}}{dt}; \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \frac{d^2 i_{s\beta}}{dt^2} + p\omega \frac{di_{s\alpha}}{dt} &= K_1 i_{s\beta} + K_2 U_{s\beta} + K_3 p\omega i_{s\alpha} + \\ &+ K_4 \left(\frac{dU_{s\beta}}{dt} + p\omega U_{s\alpha} \right) + K_5 \frac{di_{s\beta}}{dt}, \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \text{где } K_1 &= -\frac{R_s}{\sigma L_s T_r}; \quad K_2 = \frac{1}{\sigma L_s T_r}; \quad K_3 = -\frac{R_s}{\sigma L_s}; \quad K_4 = \frac{1}{\sigma L_s}; \\ K_5 &= -\frac{(L_r R_s + L_s R_r)}{\sigma L_s L_r}. \end{aligned}$$

Таким образом, используя значения напряжения и тока (в осях α , β) в статорной обмотке двигателя их производных первого и второго порядка, а также частоты вращения ω , с помощью метода наименьших квадратов могут быть рассчитаны коэффициенты $K_1 - K_5$, на основе которых получаются основные параметры привода. Эти параметры определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} R_s &= -\frac{K_3}{K_4}, \quad L_s = \frac{K_3 - K_5}{K_2}, \quad T_r = \frac{K_4}{K_2}, \\ \sigma &= \frac{K_2}{K_4(K_3 - K_5)}. \end{aligned}$$

Однако однозначно определить R_r , L_r , L_m через коэффициенты K нельзя. Определение данных параметров с учетом того, что диапазон их возможного изменения относительно паспортного значения известен, можно выполнить с помощью генетического алгоритма. При этом в качестве хромосомы выступали искомые параметры (R_r , L_r , L_m), каждый из которых кодировался 16 битами, как вещественное число из интервала $[0,5P_n - 2P_n]$, где P_n – паспортное значение параметра. Реальное значение соответствующих параметров получается по выражению

$$A = a_1 + \frac{(a_2 - a_1)A^*}{2^{16} - 1}, \quad (13)$$

где A – вещественное значение одного из параметров (R_r , L_r , L_m); a_1 , a_2 – соответственно нижний и верхний предел изменения параметров; A^* – целое значение параметра A .

Исходная популяция состояла из 150 хромосом и генерировалась случайным образом. Критерием качества (приспособленностью хромосомы) при поиске выступал модуль разности между значениями T_r и σ , полученными через коэффициенты K и этими же значениями, найденными через параметры R_r , L_r , L_m .

Словесно алгоритм можно описать следующим

образом: на первом этапе случайным образом генерируется исходная популяция бинарных хромосом. Затем определяется индекс приспособленности каждой хромосомы и по его значениям выполняется упорядочивание популяции. Вычисляется средняя по популяции приспособленность (J_s). Опираясь на нее, определяется вероятность (по выражению (14)), с которой каждая особь, обладающая приспособленностью меньше средней, может стать родителем.

$$p = \frac{1}{JS}, \quad (14)$$

где J – приспособленность хромосомы; $S = \sum_i 1/J_i$, $J_i \leq J_s$.

При этом для каждого родителя в процессе генерации хромосомы потомка имеется две возможности: либо просто быть скопированным в следующее поколение, либо подвергнуться воздействию генетических операторов (кроссовера, мутации или инверсии). Каждый генетический оператор выполняется относительно определенного бита хромосомы, который выбирается случайным образом. Кроме того, несколько самых лучших хромосом из предыдущей популяции всегда сохраняются в новой популяции. Таким образом, генерируется заданное число потомков. Поскольку потомки получены от лучших родителей, то их приспособленность может быть более высокой.

В результате математического моделирования предложенного метода идентификации ошибка определения параметров двигателя составила не более 14%, что сопоставимо с результатами, полученными в работе [8], где ошибка оценки параметров составляет 15–20%. Уменьшить величину ошибки возможно за счет увеличения времени поиска в генетическом алгоритме.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

С помощью метода наименьших квадратов и генетического алгоритма выполнена параметрическая идентификация тягового асинхронного привода дизель-поезда, что позволяет с ее помощью построить наблюдатель для системы управления движением.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дмитриенко В.Д., Заковоротный А.Ю. Моделирование и оптимизация процессов управления движением дизель-поездов. – Х.: Изд. центр "НТМТ", 2013. 248 с.
2. Бешта А.С., Валахонцев А.В., Худой Е.Г. Идентификация координат асинхронного двигателя в условиях дрейфа активных сопротивлений // Электротехника та електроенергетика. 2005. №2. С. 52 – 64.
3. Афанасьев К.С., Глазырин А.С. Идентификация скорости асинхронного электродвигателя лабораторного стенда с помощью фильтра Калмана и наблюдателя Люенбергера // Электротехнические комплексы и системы управления. 2012. № 4. С. 66 – 69.
4. Ha I.-J., Lee S.-H. An online identification method for both stator and rotor resistances of induction motor without rotational transducers // IEEE Transactions on industrial electronics. 2000, vol. 47, no. 4, pp. 842–852.
5. Duran M.J., Duran J.L., Perez F., Fernandez J. Induction-motor sensorless vector control with online parameter estimation and overcurrent protection // IEEE Transactions on industrial electronics. 2006, vol. 53, no. 1, pp. 154–161.
6. Зоркальцев В.И. Метод наименьших квадратов: геометрические свойства, альтернативные подходы, приложения. Новосибирск: ВО Наука. 1995. 220 с.
7. Лоусон Ч., Хенсон Р. Численное решение задач методом наименьших квадратов. М.: Наука. 1986. 232 с.
8. Stephan J., Bodson M., Chiasson J. Real-time estimation of the parameters and fluxes of induction motors // IEEE Transactions on industrial electronics, 1994, vol. 30, no.3, pp. 746–759.
9. Simonik P., Hudecek P., Palacky P. Estimation of induction machine electrical parameters based on genetic algorithms // Progress in electromagnetics research symposium proceedings. Malaysia, 2012, pp. 999–1002.

INFORMATION IN ENGLISH

IDENTIFICATION PARAMETERS OF TRACTION INDUCTION MOTOR OF DIESEL TRAIN USING GENETIC ALGORITHMS

Mezentsev N.V., Gejko G.V.

Quality management system of asynchronous electric drive assumes knowledge of exact values of its parameters. However, some of the parameters (this applies mainly to the rotor axis) can not be directly obtained. This paper describes a mathematical algorithm based on which one can estimate the physical parameters of the traction induction motor by measuring the currents and voltages of the stator windings and the rotor speed. At the base of the algorithm is the mathematical model of an asynchronous traction drive with the limitations provided in the fixed reference frame ($\alpha, \beta, 0$). An example of a mathematical model of the traction drive was given where the values, which could not be obtained directly, were excluded. Some parameters were determined using the method of least squares. To find the remaining parameters it was proposed to use a genetic algorithm. This approach can be used to construct an observer for the correction of the existing controls in the movement control system of traction rolling stock.

Keywords: asynchronous traction drive, the method of least squares, genetic algorithm.

REFERENCES

1. Dmitrienko V.D., Zakovorotnyj A.Ju. *Modelirovanie i optimizacija processov upravlenija dvizheniem dizel-poezdov* [Simulation and optimization of control processes of diesel-trains movement]. – Kharkov: Publishing center of "HTMT", 2013, 248 p.
2. Beshta A.S., Valahoncev A.V., Hudoj E.G. *Identifikacija koordinat asinhronnogo dvigatelja v uslovijah drejfa aktivnyh soprotivlenij* [Induction motor coordinate identification in case of active resistance drift]. *Elektrotehnika ta elektroenergetika*, 2005, no.2, pp. 52-64.
3. Afanasyev K.S., Glazyrin A.S. *Identifikacija skorosti asinhronnogo elektrodvigatelja laboratornogo stenda s pomoshhju filtra Kalmana i nabljudatelja Ljubenbergera* [Speed calculation for laboratory induction electric motor using Kalman filter and Luenberger controller]. *Electrical and control systems*, 2012, no.4. pp. 66-69.
4. Ha I.-J., Lee S.-H. An online identification method for both stator and rotor resistances of induction motor without rota-

tional transducers. IEEE Transactions on industrial electronics. 2000, vol. 47, no. 4, pp. 842–852.

5. Duran M.J., Duran J.L., Perez F., Fernandez J. Induction-motor sensorless vector control with online parameter estimation and overcurrent protection. IEEE Transactions on industrial electronics. 2006, vol. 53, no. 1, pp. 154–161.

6. Zorkaltsev V.I. *Metod naimenshih kvadratov: geometricheskie svoystva, alternativnye podhody, prilozheniya* [Least square method: geometric properties, alternative approaches, applications]. Novosibirsk: VO Nauka, 1995, 220 p.

7. Louson Ch., Henson R. *Chislennoe reshenie zadach metodom naimenshih kvadratov* [Numerical solutions using the least square method]. Moscow: Nauka, 1986, 232 p.

8. Stephan J., Bodson M., Chiasson J. Real-time estimation of the parameters and fluxes of induction motors. IEEE Transactions on industrial electronics, 1994, vol. 30, no.3, pp. 746–759.

9. Simonik P., Hudecek P., Palacky P. Estimation of induction machine electrical parameters based on genetic algorithms. Progress in electromagnetics research symposium proceedings. Malaysia, 2012, pp. 999–1002.

УДК 62-523.8

Зюзев А.М., Двойников Д.А.

РЕАЛИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ПОМОЩЬЮ МИКРОКОНТРОЛЛЕРА ТИРИСТОРНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА SIMOREG 6RA70 SIEMENS

Апробирован ввод нелинейных характеристик регуляторов и обратной связи во внутреннем контуре быстродействующих электромеханических систем со структурой нелинейной базовой модели с использованием микроконтроллера тиристорного преобразователя постоянного тока Simoreg 6RA70 фирмы Siemens. На примере полученных переходных процессов показана возможность практической реализации подобных систем. Обращено внимание на высокие требования к качеству передаваемого сигнала датчика обратной связи (тахогенератора).

Ключевые слова: быстродействие, электромеханические системы, микроконтроллер, перепрограммируемые функциональные блоки, нелинейная базовая модель, упругость.

ВВЕДЕНИЕ

Исследования и разработка оптимизированных по быстродействию систем управления и регулирования электроприводов расширяются в связи с повышением требований к качеству переходных процессов, совершенствованием технических средств и методов управления [1, 5, 12]. Результаты разработок быстродействующих систем управления наиболее востребованы при создании регулируемых электроприводов постоянного и переменного тока с интенсивными режимами работы, применяемых в различных отраслях, в том числе в металлургии для механизмов прокатных станов и установок механических испытаний металлов. В электроприводы входят системы управления и регулирования, совместно с механизмами технологических агрегатов они представляют собой электромеханические системы (ЭМС), входящие в состав автоматизированных систем управления технологическим процессом (АСУ-ТП) на нижнем уровне автоматизации, от которых требуются высокая надёжность, многократное воспроизведение разнообразных процессов при относительно простых функциях задания, изменяющегося в широком диапазоне.

Одним из этапов развития физической теории управления [7], используемой при создании регулируемых быстродействующих многоконтурных ЭМС, являются выводы и разработки д-ра техн. наук Мазунина В.П. [8, 9]. В них предложены и обоснованы нелинейные системы любого порядка с автоматическим формированием процессов, максимально приближенных к оптимальным по быстродействию, при широком диапазоне задающих воздействий и качественном регулировании. Обоснована физически оптимальная по быстродействию нелинейная базовая модель (НБМ) систем при приближенном описании свойств механиз-

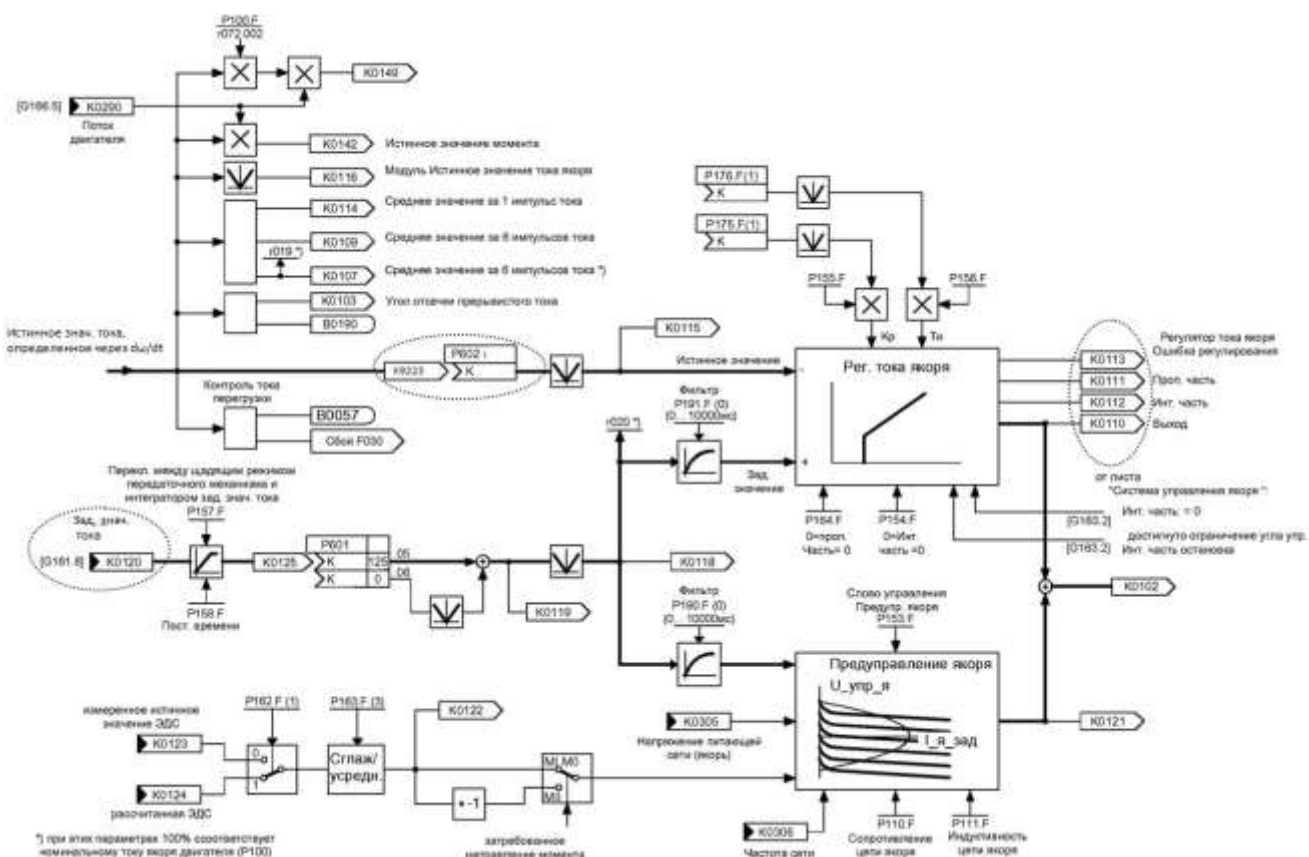
мов.

В рамках развития этой методики оказались актуальны дальнейшие разработки [10, 11], направленные на расширение области ее применения, когда объект управления представлен звеном высокого порядка, описываемым, например, механизмом с упругостью в кинематических передачах [4, 6, 13] (прокатный стан, установки механических испытаний металлов и др.).

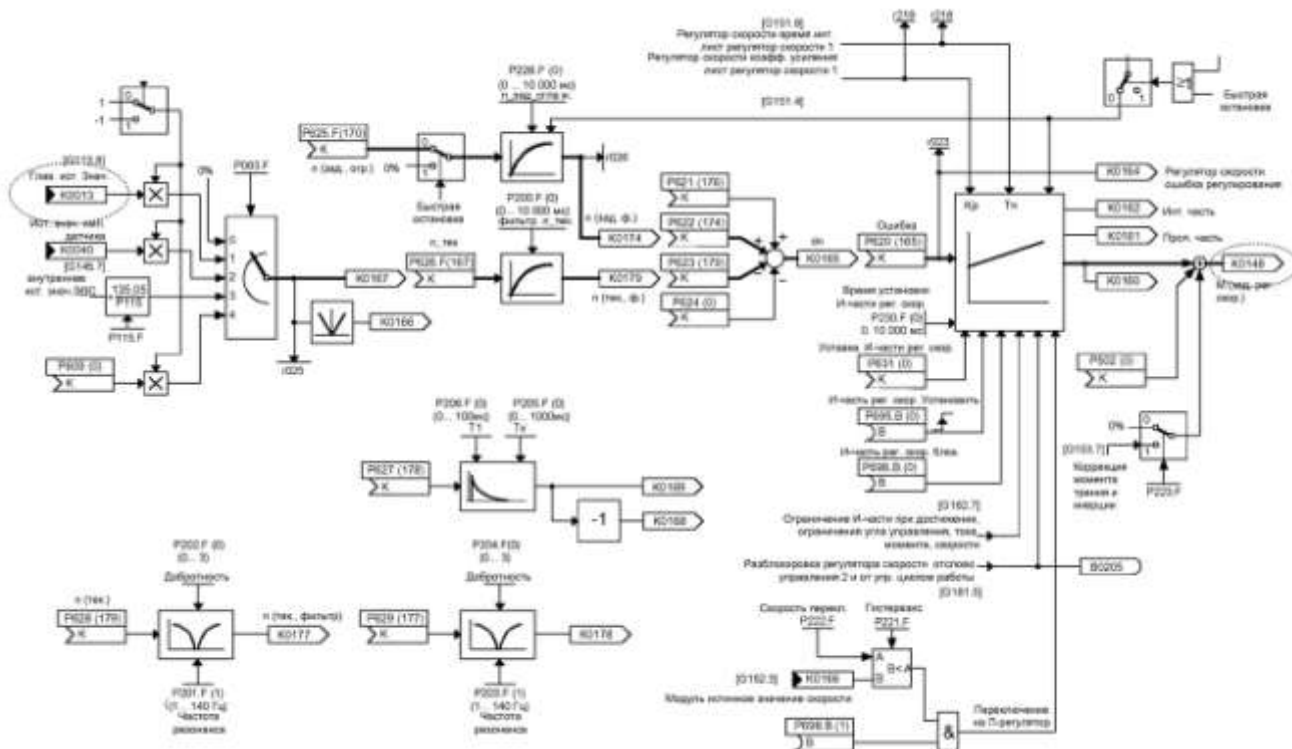
МЕТОДИКИ

В [10] во внутреннем контуре систем со структурой НБМ обоснован ввод обратной связи по динамическому моменту (ускорению). С целью его апробации был использован находящийся в учебной лаборатории на кафедре электропривода и автоматизации промышленных установок Уральского федерального университета стенд с тиристорным электроприводом (преобразователь постоянного тока Simoreg 6RA70 9,3 кВт фирмы Siemens; двигатель постоянного тока 2ПБ100ГУХЛ4; тахогенератор ТП80-20-0,2УХЛ4) и специальным оборудованием, позволяющим создавать нагрузку.

Высокопроизводительный микроконтроллер в составе преобразователя обеспечивает гибкую настройку контуров управления (рис. 1) по заданным показателям качества. В нем реализованы основные функции управления, обеспечивающие плавный пуск и торможение двигателя с заданным темпом, изменение направления вращения, стабилизация скорости, регулирование и ограничение тока (момента) двигателя и другие функции. Перепрограммируемые свободные функциональные блоки позволяют реализовывать различные структуры привода, в том числе структуры с нелинейной характеристикой регуляторов и обратной связью по ускорению.



а



б

Рис. 1. Функциональные схемы регуляторов:
а – динамического момента (ускорения); б - скорости

Микропроцессорная система управления преобразователем Simoreg 6RA70 построена по модульному принципу. Предусмотрена как стандартная двухконтурная структура САР скорости, так и реализация нетиповых структур с помощью дополнительного программного обеспечения S00, которое состоит из простых функциональных блоков, позволяющих проводить операции сложения, умножения, деления, а также логические операции над сигналами. Функциональные блоки между собой и внешними сигналами связываются при помощи коннекторов и бинекторов. Коннектор представляет собой выход определенного функционального блока для установки связи и передачи сигналов в цифровой форме. Через него доступны следующие узлы: аналоговые входы и выходы; входы регистрации текущего значения; входы и выходы датчика ограничений, разгона, управляющих блоков, регуляторов, свободных функциональных модулей программного обеспечения; цифровое задание и др. Бинектор несет те же функции, что и коннектор, но формирует логический сигнал на выходе функциональных блоков. С помощью бинекторов доступны: состояние двоичных входов; фиксированные управляющие биты; состояние регуляторов, ограничений, неисправностей, датчика разгона, управляющего слова. Два производительных микропроцессора (C163 и C167) охватывают собой все реализуемые функции регулирования и управления электроприводом для контуров якоря и возбуждения. Все функции регулирования в программном обеспечении реализованы через изменяемые параметры. Двухконтурная система регулирования скорости с внутренним контуром тока строится на основе стандартной структуры.

Рассмотрим особенности реализации структуры быстродействующей двухконтурной системы управления скорости с внутренним контуром ускорения [9, 11].

В контуре регулирования тока (см. **рис. 1, а**) в канале обратной связи вместо текущего значения тока якоря (K0117) в соответствии со структурой НБМ введен сигнал, пропорциональный производной частоты вращения двигателя $d\omega/dt$ (P602 = K9223). При этом регулятор тока (ускорения) остается интегрально-пропорциональным. Сам канал обратной связи описывается передаточной функцией вида

$$W_{\text{дз}} \Phi \approx \frac{T_{\text{дз}} p}{T_{\text{ф}} p + 1}$$

Натурные испытания проводились при различных значениях постоянной фильтра $T_{\text{ф}}$. При этом были подтверждены допустимое качество сигнала обратной связи и работоспособность системы в диапазоне $0 < T_{\text{ф}} < T_{\text{м}}$.

В пропорциональном регуляторе скорости (см. **рис. 1, б**), как и в контуре тока (ускорения), предусмотрена стандартная процедура ввода ограничений амплитуд сигналов. В случае необходимости ввода нелинейности в характеристике регулятора скорости предусмотрен свободный функциональный перепрограммируемый блок (параметр U283). Он позволяет задавать форму характеристики, настраиваемой по 20 требуемым точкам. Размещение нелинейного блока в структуре регулятора (см. **рис. 1, б**) было реализовано в канале получения сигнала ошибки (P620).

Параметрирование преобразователя и снятие ос-

циллограмм переходных процессов выполнено на персональном компьютере в операционной системе Windows с помощью поставляемой в комплекте Simoreg 6RA70 программы «Drive Monitor», в которой предусмотрены: доступ к параметрам через меню; чтение и запись блоков параметров; управление с помощью управляющего слова и ввод заданного значения; наблюдение за словом состояния (ответные сообщения о состоянии преобразователя) и считывание текущего значения; чтение сообщений об ошибках и предупреждений; чтение содержимого Trace-буфера (встроенная функция осциллографирования) [3].

Переходные процессы в двухконтурных системах регулирования скорости, полученные в ходе натурных испытаний на стенде электропривода, приведены на **рис. 2**, где обозначены 1, 2 – заданная и фактическая скорость, 3, 4 – задание и фактическое значение тока якоря двигателя. Реализованы два варианта обратной связи: по току якоря и динамическому моменту первой массы. В последнем случае обратная связь получена путем дифференцирования сигнала тахогенератора на валу двигателя с помощью функциональных перепрограммируемых блоков Simoreg 6RA70.

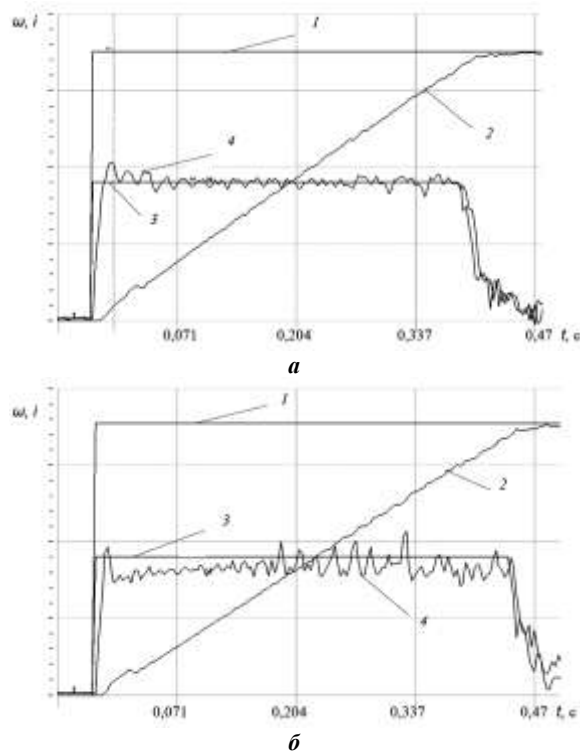


Рис. 2. Переходные процессы в двухконтурной системе: а – с обратной связью по току; б – с обратной связью по динамическому моменту (ускорению)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные в ходе серии испытаний электропривода постоянного тока переходные процессы с нелинейной характеристикой регуляторов и обратной связью по ускорению (динамическому моменту) демонстрируют возможность реализации структур быстродействующих ЭМС со сложным объектом управления (упругостью в механизме). Эти переходные процессы качественно и количественно (при $\gamma=1$; $m_c=0$) сопоставимы с процессами в системах с обратной связью по току якоря. Тот же подход может быть применим и для

приводов переменного тока с выделением координат угловой скорости и момента. Особенностью реализации подобных структур являются высокие требования к качеству исполнения датчика обратной связи (тахогенератора), отражающиеся на допустимом уровне помех в канале. В этом аспекте перспективным может быть признано применение специальных устройств – ускориметров, позволяющих непосредственно получать сигнал для вычисления координаты динамического момента без процедуры дифференцирования угловой скорости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Автоматизированный электропривод – современная основа автоматизации технологических процессов / Белов М.П., Новиков В.А., Рассудов Л.Н., Сушников А.А. // Электротехника. 2003. № 5. С. 12-16.
2. Борцов Ю.А., Соколовский Г.Г. Автоматизированный электропривод с упругими связями. 2-е изд., перераб. и доп. - СПб.: Энергоатомиздат, 1992. 288 с.
3. Зюзев А.М., Двойников Д.А. Быстродействующий электропривод: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013615538. РОСПАТЕНТ. 13.07.2013 г.
4. Зюзев А.М. Математические модели механической части электроприводов: учебное пособие. Екатеринбург,

2010. 154 с.

5. Ильинский Н.Ф. Перспективы развития регулируемого электропривода // Электротехника. 2003. № 2. С. 2-7.
6. Коловский М.З. Динамика машин. Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1989. 262 с.
7. Красовский А.А. Проблемы физической теории управления // Автоматика и телемеханика, 1990. № 11. С. 3-5.
8. Мазунин В.П. Проблемы оптимального управления электроприводами // Электротехника. 1997. № 4. С. 1-6.
9. Мазунин В.П. Быстродействующие электроприводы с замкнутыми системами регулирования и управления. Екатеринбург: УрО РАН, 2003.
10. Мазунин В.П., Двойников Д.А. Параметрические ограничения в нелинейных системах управления механизмами с упругостью // Электротехника. 2010. №5. С. 9-13.
11. Мазунин В.П., Двойников Д.А. Повышение быстродействия при управлении регулирующими электроприводами механизмов с упругими связями // Электротехника. 2012. №10. С. 36-42.
12. Хрисанов В.И., Бржезинский Р. Анализ состояния и перспектива развития силовой электроники и электропривода (по материалам международной конференции ЕРЕ-РЕМС'2002) // Электротехника. 2003. № 6. С. 10-15.
13. Шрейнер Р.Т. Системы подчиненного регулирования электроприводов. Екатеринбург: Изд-во ГОУ ВПО «Рос. гос. проф.-пед. ун-т», 1997. 279 с.

INFORMATION IN ENGLISH

THE REALIZATION OF HIGH-SPEED ELECTROMECHANICAL SYSTEM STRUCTURE USING THYRISTOR CONVERTER MICROCONTROLLER OF DIRECT CURRENT SIMOREG 6RA70 SIEMENS

Zyuzev A.M., Dvoynikov D.A.

Input of nonlinear characteristics of regulators and feedback in an internal contour of high-speed electromechanical systems with nonlinear basic model (NBM) structure using the thyristor converter microcontroller of direct current Simoreg 6RA70 manufactured by Siemens was tested. The possibility of practical implementation of similar systems was shown using the obtained transient processes as an example. The authors noted the high requirements to the quality of the transmitted signal of the feedback transmitter (tachometric generator).

Keywords: operation speed, electromechanical systems, microcontroller, reprogrammable functional units, nonlinear basic model, elasticity.

REFERENCES

1. Belov M.P., Novikov V.A., Rassudov L.N., Sushnikov A.A. *Avtomatizirovannyj jelektroprivod – sovremennaja osnova avtomatizacii tehnologicheskix processov*. [Automated electric drive – the modern basis of technological processes automation]. Electrical engineering. 2003, no. 5, pp. 12-16.
2. Bortsov Ju.A., Sokolovskij G.G. *Avtomatizirovannyj jelektroprivod s uprugimi svyazjami*. [Automated electric drive with elastic links]. The second edition processed and enlarged. St. Petersburg: Energoatomizdat, 1992. 288 p.
3. Zyuzev A.M., Dvoynikov D.A. *Bystrodejstvujushhij jelektroprivod*. [High-speed electric drive]. Certificate on the state registration of the computer program No. 2013615538. ROSPATENT. 13.07.2013.
4. Zyuzev A.M. *Matematicheskie modeli mehanicheskoi chasti jelektroprivodov: uchebnoe posobie*. [Mathematical models of mechanical part of electric drives]. Manual. Yekaterinburg, 2010. 154 p.
5. Ilyinskij N.F. *Perspektivy razvitiya reguliruемого jelektroprivoda*. [Prospects of adjustable electric drive development]. Electrical engineering. 2003. no. 2, pp. 2-7.

6. Kolovskij M.Z. *Dinamika mashin*. [Dynamics of machines]. Mechanical engineering. Leningrad office. 1989. 262 p.
7. Krasovskij A. A. *Problemy fizicheskoi teorii upravleniya*. [Problems of physical theory of control]. Automatic equipment and telemechanics. 1990, no. 11, pp. 3-5.
8. Mazunin V.P. *Problemy optimalnogo upravleniya jelektroprivodami*. [Problems of optimum control of electric drives]. Electrical engineering. 1997, no. 4, pp. 1-6.
9. Mazunin V.P. *Bystrodejstvujushhie jelektroprivody s zamknutyimi sistemami regulirovaniya i upravleniya*. [High-speed electric drives with closed systems of regulation and control]. Yekaterinburg. Ural office of the Russian Academy of Sciences. 2003.
10. Mazunin V.P., Dvoynikov D.A. *Parametricheskie ograniicheniya v nelinejnyh sistemah upravleniya mehanizmami s uprugostju*. [Parametric restrictions in mechanism non-linear control systems with elasticity]. Electrical engineering. 2010, no. 5, pp. 9-13.
11. Mazunin V.P., Dvoynikov D.A. *Povyshenie bystrodejstvija pri upravlenii reguliruemyimi jelektroprivodami mehanizmov s uprugimi svyazjami*. [Operation speed increase in case of adjustable electric drives control for mechanisms with elastic links]. Electrical engineering. 2012, no. 10, pp. 36-42.
12. Hrisanov V.I., Brzhezinskij R. *Analiz sostojaniya i perspektiva razvitiya silovoi elektroniki i jelektroprivoda (po materialam mezhdunarodnoj konferencii EPE-PEMC'2002)*. [Analysis of the state and prospects of power electronics and electric drive (materials of the international EPE-PEMC'2002 conference)]. Electrical engineering. 2003, no. 6, pp. 10-15.
13. Shrejner R.T. *Sistemy podchinennogo regulirovaniya jelektroprivodov*. [Systems of subordinate regulation of electric drives]. Yekaterinburg. Publishing house of the Russian state professional and pedagogical university, 1997. 279 p.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРИВODOВ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ

В данной статье дан сравнительный анализ основных показателей гидро- и пневмоприводов и особенности применения их в мехатронной системе, а также приведены для сопоставления зависимости удельной мощности от абсолютной различных систем приводов.

Ключевые слова: мехатронные системы, гидропривод, пневмопривод, электропривод, рабочая среда.

ВВЕДЕНИЕ

Тенденции современного информационного общества, стремительное развитие техники и сплетение различных областей знаний воедино дают мощный толчок для использования системного подхода в разработке средств автоматизации вообще и систем управления движением в частности.

Базовым элементом мехатронных систем является мехатронный модуль, который выполняет движения по одной управляемой координате. Из таких модулей, как из функциональных кубиков komponуются сложные системы модульной архитектуры. Одним из ключевых модулей мехатронной системы является мехатронный модуль привода.

ОСНОВНЫЕ ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЯ

Приводы - это «мышцы» мехатронной системы, которые принимают команды управления (в основном в виде электрического сигнала) и производят изменение в физической системе, генерируя перемещения и усилия на рабочем органе [1]. Как правило, гидро- и пневмоприводы оснащены питающим приводом (электродвигатели) и передаточными механизмами, что представляет собой единый приводной блок (**рис. 1**).



Рис. 1. Структурная схема приводного блока

Передаточный механизм действует как интерфейс между приводом и физической системой. Передаточные механизмы включают в себя зубчатые, червячные, ремённые, цепные и другие виды передач.

Основными типами приводов, применяемых в силовых модулях мехатронных систем, являются:

- электрические (электромеханические, электромагнитные);
- гидравлические;
- пневматические;
- комбинированные системы (электрогидравлические, электропневматические, электрогидропневматические).

На сегодняшний день в мехатронике применяются приводы нового поколения, такие как смартприводы (основаны на базе двигателей с интегрированной собственной управляющей электроникой, то есть с интегрированной коммутирующей электроникой, контроллером скорости, контроллером движения или сетевым

интерфейсом), микроприводы (основаны на базе коллекторных, шаговых, бесколлекторных электромагнитных двигателей мощностью от 0,1 до 530 Вт. Их диаметр варьируется от 3 до 95 мм, а длина от 2 до 275 мм), интегральные приводы МЭМС/НЭМС (основаны на высокоточных микро/нано электромеханических системах) и пьезоприводы (основаны на пьезомоторах (муфта - ходовой винт) мощностью 500 мВт, длиной ходового винта 15-40 мм, усилием перемещения более 200 г).

При разработке мехатронных систем одной из основных задач является выбор типа привода. Данный вопрос является достаточно сложным ввиду широкого спектра решаемых задач, типов и видов привода. В этой связи необходимо сформировать обширную базу данных для принятия решений по выбору наиболее оптимальных систем приводов. Создание такой базы позволит проводить многокритериальную оценку и аргументировать принятие решений.

В данной статье приводятся сравнительные характеристики двух систем, а именно гидро и пневмопривода, первую очередь рассматривается сравнительный анализ и спектр применения гидро- и пневмоприводов. Это обусловлено тем, что данные варианты по своей структуре являются практически идентичными. Объёмный гидропривод представляет собой совокупность гидравлических устройств и гидролиний, предназначенных для передачи энергии и приведения в движение механизмов и рабочих органов машин посредством жидкости под давлением, а объёмный пневмопривод представляет собой совокупность элементов и устройств, обеспечивающих преобразование потенциальной энергии давления сжатого воздуха в механическую работу, выполняемую пневмодвигателем [2]. На **рис. 2** приведены функциональные схемы гидро- и пневмосистем.

В простейшем гидравлическом приводе с возвратно-поступательным движением рабочего звена рабочая жидкость от насоса 1 (**рис. 2, а**) приводимого в движение электродвигателем (на схеме не показан), под давлением, настроенным напорным гидроклапаном 2, через обратный клапан 3 (исключающий изменение направления движения рабочей жидкости) и гидрораспределитель 4 поступает в левую (поршневую) полость гидроцилиндра. Под действием давления масла в этой полости поршень 6 перемещается вправо и связанный с ним штоком рабочий орган 7 также перемещается вправо. При этом рабочая жидкость из правой (штоковой) полости гидроцилиндра 5 через гидрораспределитель 4 вытесняется в бак. В конце хода рабочего органа на гидрораспределитель 4 подаётся управляющий сигнал У1, переключающий золотник. Тогда рабочая жидкость поступает под давлением от

насоса 1, через обратный клапан 3 и гидрораспределитель 4 поступает в правую (штоковую) полость гидроцилиндра, а левая (поршневая) полость через гидрораспределитель 4 соединяется с баком. Рабочий орган реверсируется, поршень 6 со штоком и рабочим органом 7 перемещаются влево. В конце хода рабочего органа влево на гидрораспределитель 4 подаётся управляющий сигнал Y2, золотник вновь соединит поршневую полость гидроцилиндра с нагнетательной, а штоковую - со сливной гидролиниями системы и рабочий орган вновь начнёт перемещаться вправо.

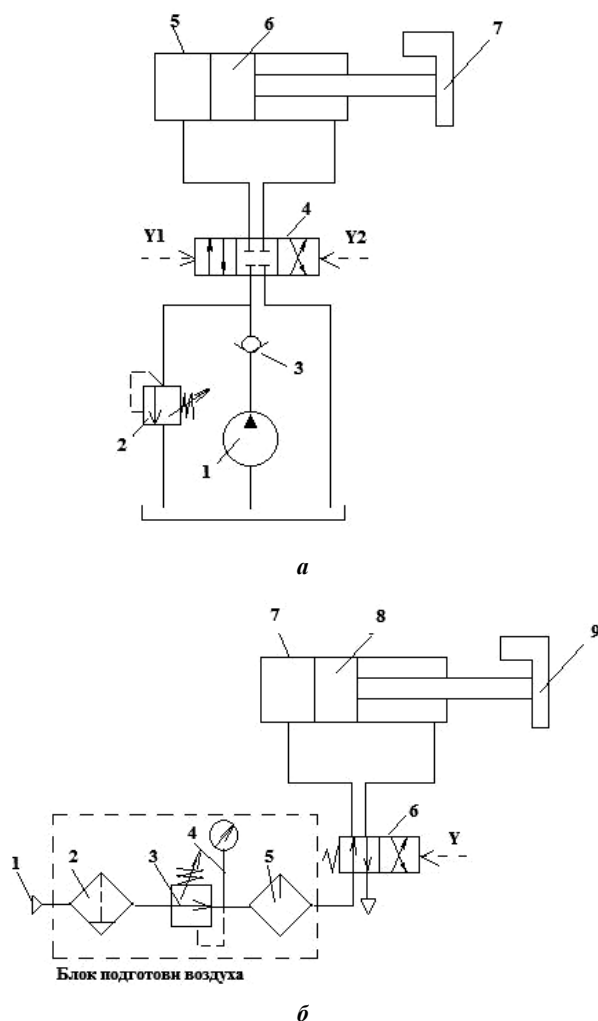


Рис. 2. Функциональные схемы систем:
а – гидравлического; б – пневматического приводов

В простейшем пневматическом приводе с возвратно-поступательным движением рабочего звена сжатый воздух от источника питания 1 (рис. 2, б) через фильтр- влагоотделитель 2, редукционный клапан 3 и маслораспылитель 5 поступает на вход пневмораспределителя 6. Давление воздуха контролируется манометром 4. Далее сжатый воздух поступает в левую (поршневую) полость пневмоцилиндра 7. Под действием давления воздуха в этой полости поршень 8 перемещается вправо и связанный с ним штоком рабочий орган 9 так же перемещается вправо. При этом сжатый воздух из правой (штоковой) полости пневмоцилиндра через пневмораспределитель 6 выходит в атмосферу. В конце хода рабочего органа на пневмораспределитель 6 подаётся управляющий сигнал Y, переключающий

золотник. Тогда сжатый воздух поступает через блок подготовки воздуха и пневмораспределитель 6 в правую (штоковую) полость пневмоцилиндра, а левая (поршневая) полость через пневмораспределитель 6 соединяется с атмосферой. Рабочий орган реверсируется, поршень 8 со штоком и рабочим органом 9 перемещаются влево. В случае обратного переключения пневмораспределителя 6 полости пневмоцилиндра 7 меняются и поршень возвращается в исходное положение.

Между гидравлическими и пневматическими приводами существуют глубокие аналогии (по принципу действия, по конструкции и функциям их элементов). Принципиально отличаются только рабочие среды, воздух, обладающий большей сжимаемостью и малой вязкостью, и вязкая, практически не сжимаемая жидкость. Различие рабочих сред существенно сказывается на динамических характеристиках приводов, прежде всего на характеристиках исполнительных устройств. В отличие от гидравлических аналогов пневмодвигатели с возвратно-поступательным движением выходного звена являются типично дискретными устройствами. Движение поршня пневмоцилиндра характеризуется малой продолжительностью, высокими и нестабильными скоростями. Поршень имеет только два фиксированных (крайних) положения, определяемых жёсткими упорами. Точно остановить его в каком-либо промежуточном положении невозможно. Например, при прекращении подачи воздуха или запираении обеих полостей пневмоцилиндра движущий поршень останавливается не мгновенно из-за упругости рабочей среды. В гидроприводе остановка поршня возможна в любой точке траектории движения поршня с достаточной высокой точностью.

При простоте конструкции, хороших экономических показателях и достаточной надёжности, но низких регулировочных свойствах, пневмоприводы не могут быть использованы в позиционных и контурных режимах работы, что несколько снижает привлекательность их применения в мехатронных системах. В реальных гидравлических приводах напряженность рабочей среды в направлении передачи движения составляет 6-100 МПа при гибком управлении за счет регулирования потока жидкости гидравлическими устройствами, имеющими различное управление, в том числе и электронное. Компактность и малая инерционность гидропривода обеспечивают легкое и быстрое изменение направления движения ИМ, а применение электронной аппаратуры управления обеспечивает приемлемые переходные процессы и заданную стабилизацию выходных параметров. В отдельных случаях, когда необходимо обеспечить высокую надежность функционирования гидропривода, используют две насосные станции и соответственно две ветви гидросистемы [3]. На рис. 3 приведена принципиальная схема мехатронной системы извлечения фурмы, как пример реализации данных систем в промышленности. Согласно данной схеме в устройстве работают две насосные станции на единую систему, в которой имеются соответственно два регулятора потока и два гидроклапана. Вопросы надежности в данной системе обеспечиваются двумя гидронагнетателями, которые могут работать отдельно (независимо) или параллельно.

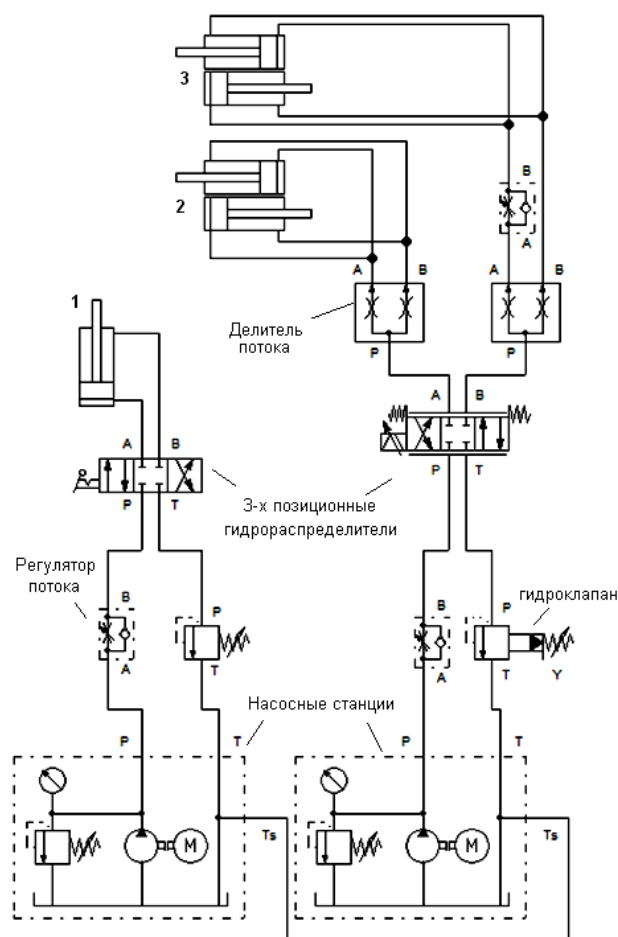


Рис. 3. Принципиальная гидравлическая схема устройства для извлечения фурмы

Питание гидроцилиндра 1 обеспечивает выдвижение устройства захвата и его поддержку. В нормальном режиме питание обеспечивается первой насосной станцией. Вторая станция, подключенная к группам цилиндров 2 и 3, обеспечивает питание непосредственно самих механизмов захвата. Для управления цилиндрами предусмотрены трехпозиционные гидрораспределители. Для управления гидроцилиндром 1 предусмотрено ручное управление гидрораспределителем и имеется дополнительный регулятор потока, обеспечивающий плавность выдвижения и втягивания гидроштока.

Группы цилиндров 2 и 3 являются, как отмечалось выше, исполнительными механизмами устройства захвата. Они выполняют вертикальный захват с внутренней поверхности фурмы. Для управления этими группами используется пропорциональный гидрораспределитель с регулируемым электромагнитным управлением, в совокупности с делителями потока и регуляторами потока. Это обеспечивает плавность захвата без деформации исполнительных механизмов.

В целом, сопоставляя гидро- и пневмоприводы, следует отметить, что каждый из этих систем приводов обладает определенной совокупностью достоинств и недостатков. Качественная оценка основных показателей приведена в таблице на основе анализа материалов, опубликованных в [4-6].

Сравнительный анализ приводов

№ п/п	Наименование показателей	Характеристики показателей	
		гидропривода	пневмопривода
1	Сложность конструкции и техническое обслуживание	Высокая точность изготовления деталей, обусловленная необходимостью герметизации соединений и применения дополнительной возвратной гидролинии, а также дорогостоящих материалов при изготовлении трубопровода.	Не требуется применение дорогостоящих комплектующих изделий высокой точности изготовления элементов соединений, отсутствие возвратных пневмолиний. Для изготовления трубопровода не требуются применение дорогостоящих материалов.
2	Влияние утечек на систему	Значительное (необходим контроль за уровнем рабочей жидкости в системе), влияние утечек на КПД системы и расход рабочей жидкости.	Не значительное (легко восполняемы).
3	Габариты и масса	Небольшие	Значительные
4	Рабочее давление	Высокое (от 5-30 до 300 МПа)	Низкое (от 0,5-0,6 до 7 МПа)
5	Смазывающая способность среды	Высокая	Низкая (необходимо принудительное распыление масла в поток воздуха)
6	Энергоёмкость	Высокая	Низкая
7	Пожаро- и взрывобезопасность	Низкая	Высокая
8	Уровень шума	Низкий	Высокий
9	Срок службы	5-10 тыс. ч	10-20 тыс. ч
10	Регулирование скорости выходного звена	Широкий диапазон регулирования	Достаточно широкий диапазон регулирования
11	Частота реверсирования движения выходного звена	До 1000 реверсов в минуту	До 1500 реверсов в минуту
12	Реализация скорости рабочих движений	Реализация больших скоростей ограничивается большей инерционностью (масса жидкости) и отсутствием демпфирующего эффекта	Возможна реализация больших скоростей.
13	КПД привода	Около 70%	Обычно 5-15% и очень редко до 30%
14	Передача энергии на большие расстояния	Невозможно вследствие больших потерь напора на единицу длины трубопровода	Возможно на расстояния до нескольких километров, что позволяет использовать пневмопривод в качестве магистрального
15	Чувствительность к перепаду температур	Чувствителен (нарушение герметичности вследствие изменения зазоров между деталями, изменение вязкости рабочей среды)	Не чувствителен

Продолжение таблицы

№ п/п	Наименование показателей	Характеристики показателей	
		гидропривода	пневмопривода
16	Скорость передачи сигнала (управляющего импульса)	1000 и 300 000 м/с	от 150 до 360 м/с (запаздывание выполнения операций)
17	Точность позиционирования исполнительного механизма	Высокая точность (с точностью до десятых долей миллиметра). Возможность фиксации в любом промежуточном положении рабочего органа	Низкая точность (в промежуточных положениях точность фиксации рабочего органа осуществляется достаточно сложно)
18	Стоимость рабочей среды	Высокая	Легко восполняема из окружающей среды
19	Эксплуатация рабочей среды	Необходимость фильтрации рабочей жидкости, нагрева или охлаждения, а также замена	Необходимость фильтрации, влагоотделения и повышения смазывающей способности рабочей среды

В таблице приведена совокупность основных показателей двух сопоставимых по составу основного оборудования систем приводов. Недостатки гидропривода отражены в позициях 1, 2, 4, 9, 11, 14, 15, 18, соответственно в этих позициях пневмопривод имеет преимущества. По ряду позиций, таких как 10, 12, и 19, показатели данных систем приводов совпадают. В других позициях пневмопривод имеет определенные преимущества по отношению к гидроприводу. В целом показатели гидропривода и пневмопривода сопоставимы и каждый из них имеет определенные преимущества и недостатки при использовании в том или ином диапазоне мощности исполнительных устройств. Электропривод в этих системах играет косвенную роль, так как прямых рабочих действий не производит.

Отдельно рассматривая электропривод модулей в мехатронных системах, следует отметить, что данное направление развивается применительно к андроидным и им подобным роботам. Необходимо отметить, что электропривод исполнительных органов мехатронных систем по многим показателям становится более предпочтительным в эксплуатации. На рис. 3 приведены кривые, характеризующие массогабаритную эффективность различных систем приводов, применяемых в мехатронных модулях [7].



Рис. 3. Удельная мощность (отнесенная к весу) различных систем приводов в зависимости от абсолютной мощности

Анализируя данные зависимости, целесообразно отметить, что при мощности свыше 2 кВт (после пересечения характеристик в точке 1) массогабаритная эф-

фективность электропривода становится преобладающей. Точкой 2 обозначено пересечение характеристик пневмо- и гидропривода. Предварительно можно сделать вывод о том, что при значениях мощности свыше 5 кВт массогабаритные показатели пневмопривода становятся предпочтительными. Следует отметить, что оценка подобного типа является не полной для принятия решений по выбору той или иной системы электропривода в качестве базовой.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Пневмопривод является наиболее простым, достаточно надежным и дешевым. В то же время данный тип привода является плохо управляемым и имеет ограниченные возможности по грузоподъемности (до 10-20 кг [6]).

2. Гидропривод является более сложным и дорогостоящим в сравнении с пневмо- и электроприводом. Однако в диапазоне мощностей до 1 кВт гидропривод обладает наилучшими массогабаритными показателями и успешно может применяться в системах, где требуется формирование значительных усилий исполнительными органами и высокая точность исполнения.

3. Электропривод исполнительных устройств в настоящее время становится основным в сфере мехатронных систем. При этом на первый план выдвигаются такие показатели, как хорошая управляемость, высокий КПД и наилучшая массо-габаритная эффективность. Все эти позиции являются предпочтительными для применения электропривода в мобильных робототехнических системах с автономным питанием.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время мехатронные системы как объект исследований находятся в планах работ многих научных коллективов, и в этой сфере необходимо решать широкий круг задач. В первую очередь необходимо создание и постоянное пополнение баз данных по применению мехатронных систем в различных направлениях техники, развитие методик кинематических расчетов и выбора мощности двигателей для различных типов приводов. Проблемы развития систем управления находятся в отдельной сфере исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Robert H. Bishop. Mechatronics. An introduction. Taylor & Francis Group, LLC, 2006. 285 p.
2. Гидроприводы и гидропневмоавтоматика станков / Федорев В.А., В.А.Педченко, А.Ф. Пичко, Ю.В. Пересадько, В.С. Лысенко. К.: Вища шкoл, 1987. 375 с.
3. Сарваров А.С., Гаджибалаев А.И. Разработка мехатронного устройства для замены отработавших фурм доменной печи ОАО «ММК» // Наука и производство Урала. 2014. №10. С. 17-170.
4. Попов Д.Н. Динамика и регулирование гидро- и пневмосистем. М.: Машиностроение, 1976. 424 с.
5. Абрамов Е.И., Колисненченко К.А., Маслов В.Т. Элементы гидропривода: справочник. К.: Техника, 1977. 320 с.
6. Беренде Т.К., Ефремова Т.К., Тагаевская А.А., Юдицкий С.А. Элементы и схемы пневмоавтоматики. М.: Машиностроение, 1976. 246 с.
7. Юревич Е.И. Основы робототехники. 2-е изд. перераб. и доп. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 16 с.: ил.

INFORMATION IN ENGLISH

COMPARATIVE ANALYSIS OF ACTUATORS FOR MECHATRONIC SYSTEMS

Sarvarov A.S., Vasilyev A.E., Danilenko K.V., Menshchikova E.V.

This article presents a comparative analysis of the main indicators of hydraulic and pneumatic actuators and application characteristics in mechatronic systems, and provides dependence of power density on the absolute of different actuators systems for comparison.

Keywords: mechatronic systems, hydraulic actuator, pneumatic actuator, electrical actuator, work environment.

REFERENCES

1. Robert H. Bishop. *Mechatronics. An introduction*. Taylor & Francis Group, LLC, 2006. 285 p.
2. Fedorets V.A., Pedchenko V.A., Pichko A.F., Peresadko U.V., Lysenko V.S. *Gidroprivody i gidro- pnevmo- avtomatika stankov* [Hydraulic actuators and hydraulic and pneumatic automatic equipment of machines]. Kiev: Visha shkol, 1987, 375 p.
3. Sarvarov A.S., Gadzhibalayev A.I. *Razrabotka mehatronnogo ustroystva dlya zameny otrabotavshih furm*

domennoi pechi OAO "MMK" [Development of mechatronic device to replace the worn out tuyeres of a blast furnace at OJSC «MMK»]. Science and production of the Urals. Scientific and technical journal. 2014, no. 10, pp. 17-170.

4. Popov D.N. *Dinamika i regulirovanie gidro i pnevmosistem* [Dynamics and regulation of hydraulic and pneumatic systems]. Moscow: Mechanical engineering, 1976, 424 p.

5. Abramov E.I., Kolisnechenko K.A., Maslov V.T. *Elementy gidroprivoda: spravochnik* [Hydraulic actuator elements: reference manual]. Kiev: Engineering, 1977, 320 p.

6. Berends T.K., Efremova T.K., Tagayevskaya A.A., Yuditsky S.A. *Elementy i shemy pnevmoavtomatiki* [Elements and diagrams of pneumatic control components]. Moscow: Mechanical engineering, 1976, 246 p.

7. Jurevich E.I. *Osnovy robototekhniki* [Fundamentals of robotic technology]. 2nd edition revised and enlarged. Saint Petersburg: BHV-Petersburg, 2005, 416 p.

РАЗРАБОТКА КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ИСПЫТАНИЯ ЖИДКИХ ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

В статье поставлена задача разработки компьютерной модели в программе Elcut 6.0, которая позволит оценить качество жидких электроизоляционных материалов путем определения величины пробивного напряжения без производства работ по высоковольтным испытаниям.

Ключевые слова: пробивное напряжение, трансформаторное масло, пробой, компьютерная модель.

ВВЕДЕНИЕ

Надежность жидких электроизоляционных материалов определяется величиной пробивного напряжения. Например, значение пробивного напряжения трансформаторного масла является основным показателем надежности его работы по обеспечению требуемой изоляции в электрических аппаратах. Испытание проводят в соответствии с требованиями ГОСТ 6581–75.

На современном рынке испытательных установок жидких диэлектриков сегодня можно встретить различные виды испытательных установок. В табл. 1 представлены наиболее часто встречаемые фирмы-производители и технические характеристики их продукции.

веряется щупом, который входит в комплект поставки прибора.

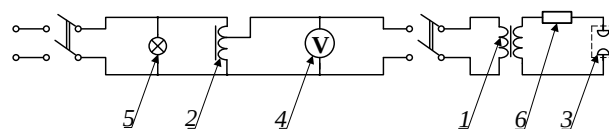


Рис. 1. Принципиальная схема установки для определения пробивного напряжения жидких электроизоляционных материалов:

- 1 - высоковольтный испытательный трансформатор;
- 2 - регулировочный трансформатор;
- 3 - измерительная ячейка; 4 - вольтметр; 5 - сигнальная лампа; 6 - защитное сопротивление

Таблица 1

Технические характеристики и фирмы-производители аппаратов для испытания жидких диэлектриков

Наименование оборудования	Страна-производитель	$U_{\text{сети}}$, В	$f_{\text{сети}}$, Гц	$U_{\text{исп.}}$, кВ	$P_{\text{ном. max}}$, кВт·А	Масса, кг
УИМ-90М	Россия	220	50±2	90	0,3	19,5
КПН-901	Россия	220	50	10-90	0,1	4
АИМ-90	Россия	220	50	90	0,5	35
АСПМ-90-1	Россия	220	50	90	0,6	80
СКАТ-M100	Россия	220	50	0-110	0,1	45
DPA75 C BAUR	Австрия	84-264	47-63	0-75	0,06	21
DTL C	Австрия	220-230	50-60	0,5-2	0,5	28
АИМ-90Ц	Россия	220	50	10-90	0,5	40
OTS100AF/2	Великобритания	220	50	0-100	—	41
OTS80AF	Великобритания	90-264	48/63	0-80	0,3	30
АСТ-2М	Россия	220±11	50±0,5	0-2	0,14	9,7
АИМ-92	Россия	220±11	50	0-92	0,5	35
АИМ-90А	Россия	220±22	50	0-90	0,5	44
BA100	Швейцария	85-264	47-63	0-100	0,075	32

Для определения пробивного напряжения жидких электроизоляционных материалов используют установки, принципиальная схема которых согласно ГОСТ 6581–75 представлена на рис. 1 [1].

Для проведения высоковольтных испытаний также могут использоваться установки с иными схемотехническими решениями [2, 3].

Для испытания трансформаторного масла, с целью измерения пробивного напряжения, применяем отечественный аппарат АИМ–90М, в котором используют измерительную ячейку со сферическими электродами. Зазор между электродами должен составлять $2,5 \pm 0,5$ мм. Контроль зазора между электродами про-

Электротехнической лабораторией ООО НИЦ «Энергодиагностика» (г. Уфа) для проведения исследования было предоставлено два образца, показанные на рис. 2.



Рис. 2. Образцы для испытания: образец №1 – трансформаторное масло после года эксплуатации (а); образец №2 – трансформаторное масло после пяти лет эксплуатации (б)

На рис. 3 представлен момент пробоя трансформаторного масла.

На рис. 4 представлены показания киловольтметров, при испытании образцов №1 и 2.

По результатам моделирования процесса испытания трансформаторного масла образцов №1 и 2 в программе Elcut 6.0 получены значения напряжения пробоя моделируемых образцов и построены картины силовых линий напряженности электрического поля в процессе испытания (рис. 5). Результаты экспериментальных данных и компьютерного моделирования представлены в табл. 2.

Как видно из рис. 5, а и б, по картине силовых линий напряженности электрического поля можно сделать вывод о плохом качестве масла образца №2.

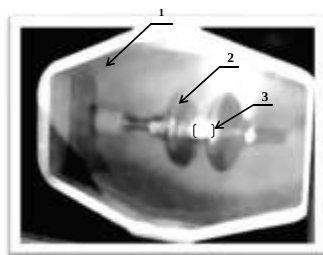


Рис. 3. Пробой испытуемого объекта:
1 – колба для налива масла; 2 – электрод; 3 – процесс пробоя масла, искровой промежуток



Рис. 4. Результаты испытаний:
а – результаты пробивного напряжения образца №1;
б – результаты пробивного напряжения образца №2

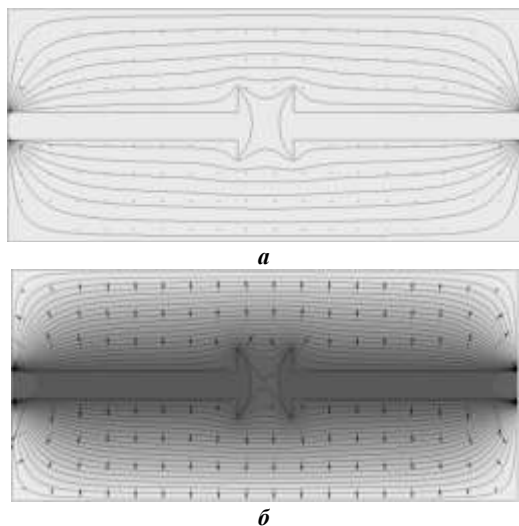


Рис. 5. Картина поля напряженности:
а – образец №1; б – образец №2

Таблица 2
Результаты компьютерного моделирования
и экспериментальных данных

Параметр	Экспериментальные данные		Компьютерное моделирование (Elcut 6.0)	
	Образец №1	Образец №2	Образец №1	Образец №2
Напряжение пробоя масла, кВ	67	14	65,2	14,4
Электропроводность масла, См/м	—	—	$1 \cdot 10^{-10}$	$1 \cdot 10^{-7}$

Различие результатов компьютерного моделирования и результатов испытаний находится в пределах 2,7%, что полностью подтверждает адекватность разработанной модели. Полученная компьютерная модель в программе Elcut 6.0 позволяет при отсутствии высоковольтного испытательного оборудования произвести оценку качества жидкого диэлектрика с высокой достоверностью. Достаточно определить диэлектрическую проницаемость трансформаторного масла (например, автоматизированной установкой измерения диэлектрических потерь трансформаторного масла «Тангенс-3М») и измерить его электропроводность (приборами ИМП-1, ЭЛ-4М, СТИ-750 и др), а затем, в программе Elcut 6.0, заложив эти параметры смоделировать испытание масла на пробой, и выдать заключение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- ГОСТ 6581-75. Материалы электроизоляционные жидкие. Методы электрических испытаний.
- Новые схемотехнические решения резонансной высоковольтной испытательной установки / Конесев С.Г., Мухаметшин А.В., Хазиева Р.Т., Стрижев Д.А. // Инновационные направления развития электропривода, электротехнологий и электрооборудования: межвуз. сб. науч. трудов. Уфа: УГНТУ, 2012. С. 178-183.
- Конесев С.Г., Мухаметшин А.В., Кириллов Р.В. Выбор схемы ВИУ для работы в резонансном режиме // Сборник научных трудов конференции «I Международная (IV Всероссийская) научно-техническая конференция». Уфа: УГНТУ, 2013. С.209-215.

INFORMATION IN ENGLISH

COMPUTER MODEL DEVELOPMENT FOR LIQUID ELECTRICAL INSULATING MATERIALS TESTING

Konesev S.G., Muhametshin A.V., Konev A.A., Shayahmetov I.I.

The article is concerned with a computer model development using Elcut 6.0 application, which will assess the quality of liquid insulating materials by determining the value of the breakdown voltage without carrying out any high-voltage tests.

Keywords: breakdown voltage, transformer oil, breakdown, computer model.

REFERENCES

- GOST 6581-75. Liquid electrically insulating materials. Methods of electrical testing.
- Konesev S.G., Muhametshin A.V., Khazieva R.T.,

Strizhev D.A. *Novye shemotekhnicheskie resheniya rezonansnoi vysokovoltnoi ispytatelnoi ustanovki* [New circuit design solutions for a resonance high voltage testing unit]. Interuniversity collection of scientific papers «Innovative trends in development of electric drive, electrical engineering and electrical facilities». Ufa, UGNTU, 2012, pp.178-183.

3. Konesev S.G., Muhametshin A.V., Kirillov R.V. *Vybor shemy VIU dlya raboty v rezonansnom rezhime* [The choice of high voltage testing unit circuit for resonance mode operation]. Collection of scientific papers of «I International (IV All-Russian) scientific and technical conference». Ufa, UGNTU, 2013, pp.209-215.

ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ

УДК 681.516.73

Парсункин Б.Н., Андреев С.М., Ахметов Т.У., Ахметова А.У.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ СПОСОБА КОНТРОЛЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО СОСТОЯНИЯ НАГРЕВАЕМЫХ НЕПРЕРЫВНОЛИТЫХ ЗАГОТОВОК ПЕРЕД ВЫДАЧЕЙ

Разработана система программно-инструментального контроля текущего температурного состояния нагреваемых заготовок перед выдачей из печи. Проведено актуальное исследование по определению достаточной точности, объективности и работоспособности разработанной системы. Показаны возможности системы в условиях промышленной печи.

Ключевые слова: качество нагрева, оптимальное управление, энергосберегающий режим, интенсификация нагрева, температура раската, недогретая заготовка, тепловой режим, перепад температур, оптический пирометр.

Соблюдение общей стратегии оптимального энергосберегающего управления нагревом непрерывнолитых крупногабаритных заготовок из труднодеформируемых судовых и трубных марок стали путем интенсификации нагрева на заключительном интервале времени увеличивает вероятность выдачи на стан недогретой заготовки и последующих негативных последствий.

Поэтому для обеспечения гарантированного качества нагрева особенно актуальной становится проблема обеспечения автономного объективного контроля текущего теплового состояния каждой заготовки перед выдачей из печи.

Для практических целей достаточно определение двух параметров, характеризующих температурное тепловое состояние нагреваемой заготовки: температуры поверхности нагреваемого металла и температурного перепада между поверхностью и центром нагреваемой заготовки.

Если температуру поверхности металла (вернее, поверхностного слоя окалины) можно измерить при использовании современных оптических пирометров, то перепад температур недоступен для прямого контроля без использования специального индивидуального метода [1].

В производственных условиях при неравномерной производительности стана (от 200 до 1000 т/ч), взаимном влиянии отапливаемых зон, при одновременном нагреве заготовок, различающихся по теплофизическим свойствам и начальному тепловому состоянию (посад заготовок с температурой больше 500°C изменяется от 40 до 85% в сутки), только математическое моделирование процесса нагрева массивных слабовых заготовок не решает проблему достоверной оценки реального качества нагрева.

Температура полосы после прокатки заготовки в черновой группе стана (температура раската) является основным контролируемым параметром оценки качества нагрева металла, но после выдачи заготовки из печи, когда ошибка нагрева уже не может быть исправлена.

Поэтому вызывает интерес определение и реализация таких зависимостей, которые связали бы температурные параметры нагрева, доступные для измерения, с величинами и характеризующими распределение температуры по сечению нагреваемой заготовки.

Возможность реализации таких зависимостей бы-

ла рассмотрена в работе [2]. Где получено уравнение, позволяющее с использованием текущих значений температуры рабочего пространства или греющей среды $t_{гс}(\tau)$ и температуры поверхности нагреваемой заготовки $t_{пов}(\tau)$ при условии стабилизации $t_{пов}(\tau) = \text{const}$ осуществить контроль температурного перепада по сечению нагреваемой заготовки $\Delta t = t_{пов}(\tau) - t_{ц}(\tau)$. Здесь $t_{ц}(\tau)$ – температура центра нагреваемой заготовки.

Появление достаточно точных оптических пирометров и использование современных программируемых средств позволяет эффективно решить поставленную задачу.

Структурная схема автономного программно-инструментального контроля качества нагрева металла перед выдачей из печи, реализованная на методической печи №6 стана 2500 ОАО «ММК», представлена на рис. 1.

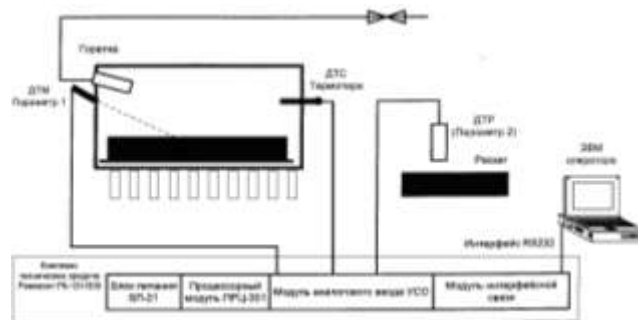


Рис. 1. Структурная схема системы контроля качества нагрева металла

Система реализована на отечественном регулирующем контроллере РК-131. Датчиком температуры греющей среды является термопара ТПР, установленная в боковой стене печи на 300-350 мм выше уровня нагреваемых непрерывнолитых заготовок толщиной 250 мм. Датчиком температуры поверхности металла ДТМ служит пирометр полного излучения ТЕРА-50, свизированный на поверхность нагреваемой заготовки в месте установки термопары через трубу с отдувом, установленную в боковой стене печи томильной зоны. Температура раската ДТР измеряется пирометром частичного излучения.

Выполняющий функции устройства связи с объектом (УСО) микропроцессорный регулирующий кон-

троллер связан по сети «Транзит» с УВМ, осуществляющей все необходимые расчеты, контроль и визуализацию параметров нагрева по всей печи.

Особенностью работы пятизонной толкательного типа, отапливаемой природным газом через торцевые горелки методической печи №6 стана 2500 ОАО «ММК» является двусторонний нагрев непрерывнолитых заготовок толщиной 250 мм практически холодного посада при активной длине рабочего пространства 29 м и максимальном удалении от прокатного стана.

Технологический режим работы стана характеризуется значительной неравномерностью от 12 до 54 заготовок в час (от 180 до 750 т/ч)

Для оценки точности, объективности и работоспособности разработанной системы программно-инструментального контроля текущего температурного состояния нагреваемых заготовок перед выдачей из печи было проведено специальное исследование.

В процессе исследования фиксировались во времени следующие технологические параметры: температура рабочего пространства печи (греющей среды) $t_{гс}(\tau)$; расход газа в томильную зону $V_{г}(\tau)$; расход воздуха в томильную зону $V_{в}(\tau)$; соотношение расходов $V_{в}(\tau)/V_{г}(\tau)$; температура поверхности нагреваемого металла $t_{пов}(\tau)$; продолжительность периода времени между выдачей очередных заготовок из печи; прогнозируемая температура раската выданной из печи заготовки $t_{расч}(\tau)$; температура измеренной (фактической) температуры раската $t_{изм}(\tau)$.

Управление тепловым режимом в томильной зоне осуществлялось по $t_{пов}(\tau) = t_{пов}^3(\tau)$, где $t_{пов}^3(\tau)$ - заданное значение температуры поверхности. Измерение $t_{гс}(\tau)$ осуществлялось термопарой без защитного карборундового стакана для снижения инерционности информационности канала.

Наличие опорных (глицсажных) труб в печи толкательного типа определяет неравномерность температуры раската по длине полосы. Поэтому за действительное измеренное $t_{изм}(\tau)$ значение температуры раската принималось среднее значение температуры по длине полосы во время её перемещения перед датчиком температуры с дискретностью 1 с. Это полученное значение $t_{изм}(\tau)$ использовано в качестве объективного показателя качества нагрева заготовки.

Распределение отклонений прогнозируемой (расчетной) температуры раската от измеренной для 858 заготовок, нагретых в течение шести суток в методической печи №6 стана 2500 ОАО «ММК», представлено на **рис. 2** для условий неконтролируемой выдачи заготовок из печей стана.

Из 858 заготовок 473 (55,13%) имели отклонение в диапазоне $\pm 15^\circ\text{C}$, а 762 (88,8%) имели отклонение $\Delta t = t_{изм}(\tau) - t_{расч}(\tau)$ в диапазоне $\pm 30^\circ\text{C}$.

Анализ увеличения отклонений выявил следующие причины:

– неточность упрощенного статистического выражения, используемого при определении $t_{расч}(\tau)$ с учетом транспортировки (более 60 м) по подающему рольган-

гу;

– нарушение условий определения $t_{расч}(\tau)$ при переводе управления тепловым режимом в томильной зоне на ручное управление или другие причины нарушения условия $t_{пов}(\tau) = \text{const}$;

– погрешности измерения $t_{пов}(\tau)$ пирометром полного излучения, на показание которого оказывает влияние излучение продуктов сгорания в зависимости от расхода газа при изменении производительности печи;

– нарушение порядка выдачи заготовок по печам при отсутствии системы информационного сопровождения и несвоевременной коррекции порядка выдачи.

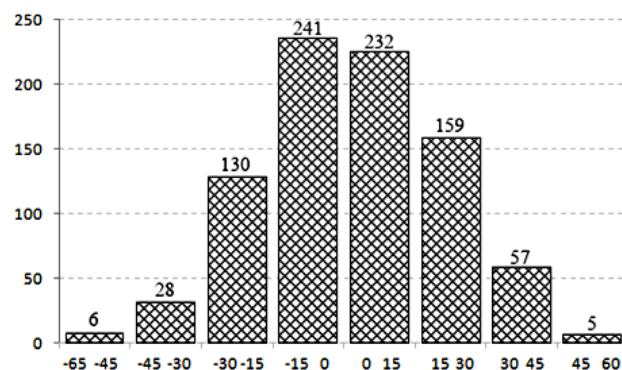


Рис. 2. Распределение отклонений расчетного прогнозируемого значения температуры раската от измеренного (действительного) для всех нагретых в течение шести суток в печи №6 заготовок по данным системы централизованного контроля печи №6 стана 2500 ОАО «ММК»

Наиболее значимым явился третий фактор, когда даже при выполнении условия $t_{пов}(\tau) = \text{const}$ на величину отклонения $\Delta t(\tau)$ заметное влияние оказывает изменение расхода топлива в зону.

В результате определения статических характеристик, определяющих зависимость температуры греющей среды $t_{гс}(\tau)$ в функции от расхода топлива в томильную зону для различных значений интервалов времени между выдачей из печи очередных заготовок (производительности печи), удалось рассчитать величины корректирующих поправок на величину $\Delta t(\tau)$ в зависимости от текущего расхода топлива в томильную зону.

Величина корректирующей поправки $\Delta t_{кор}(\tau)$ зависимости от текущего расхода топлива, вызванного изменением производительности печи, в диапазоне 950-1060 м³/ч изменяется нелинейно от 0 до 12 $^\circ\text{C}$ при изменении расхода газа от 1000 до 950 м³/ч, от 0 до +18 $^\circ\text{C}$ при изменении расхода от 1000 до 1060 м³/ч [3].

Изменение во времени параметров теплового режима в томильной зоне печи №6 представлено на **рис. 3**, в условиях контролируемой выдачи заготовок.

Анализ полученного частотного распределения значений отклонения $\Delta t = t_{изм}(\tau) - t_{расч}(\tau)$ с учетом коррекции $t_{гс}(\tau)$ при контролируемой выдачи 77 заготовок из печи №6 показал, что 67,5% имеет отклонение в диапазоне $\pm 10^\circ\text{C}$, а 88,3% или 68 заготовок в диапазоне $\pm 20^\circ\text{C}$ при среднеквадратичном отклонении $\Delta t(\tau)$

$\pm 11,4^{\circ}\text{C}$.

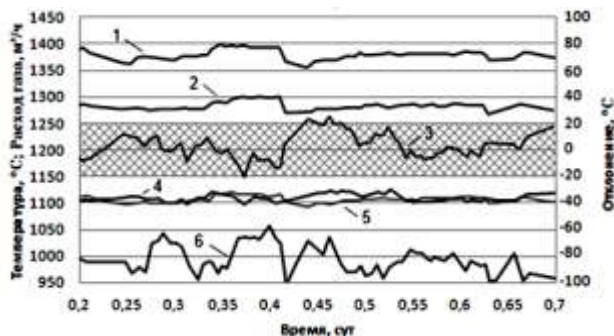


Рис. 3. Изменение во времени параметров теплового режима в пятой зоне печи №6: 1 – $t_c(\tau)$; 2 – $t_{\text{пов}}(\tau)$; 3 – $\Delta t = t_{\text{изм}}(\tau) - t_{\text{расч}}(\tau)$; 4 – $t_{\text{изм}}(\tau)$; 5 – $t_{\text{расч}}(\tau)$; 6 – $V_T(\tau)$ при коррекции прогнозируемого расчетного значения $t_{\text{расч}}(\tau)$

Использование рассмотренного метода гаранти

рует невозможность несанкционированной и неконтролируемой выдачи на стан недогретой заготовки при реализации энергосберегающего оптимального управления режимом нагрева крупногабаритных труднодеформируемых непрерывнолитых заготовок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беленький А.М., Дубинский М.Ю. и др. Устройство для измерения температуры нагрева объектов в металлургических печах: патент РФ на полезную модель №72061 БН. 2008. №9.
2. Парсункин Б.Н., Панферов В.И. Контроль прогрева металла // Изв. вузов Черная металлургия. 1981. №10. С. 127-129.
3. Андреев С.М., Парсункин Б.Н. Оптимизация режима управления нагревом заготовок в печах проходного типа. Магнитогорск: Из-во Магнитогорск. гос. тех. ун-та им. Г.И. Носова. 2013. 376 с.

INFORMATION IN ENGLISH

ACCURACY INVESTIGATION OF TEMPERATURE CONTROL METHOD FOR HEATED CONTINUOUSLY CAST BILLETS BEFORE DISCHARGE

Parsunkin B.N., Andreev S.M., Akhmetov T.U., Akhmetova A.U.

The system of software and tool control of billet temperature prior to discharge from the furnace was developed. The research group conducted the study to determine the reasonable accuracy, objectivity and efficiency of the developed system. The possibilities of the system under conditions of an industrial furnace were shown.

Keywords: quality of heating, optimal control, energy saving mode, intensification of heating temperature of the process section, underheated billet, thermal conditions, temperature difference, optical pyrometer.

REFERENCES

1. Belenkiy A.M., Dubinskiy M.Yu. et al. *Ustroistvo dlya izmereniya temperatury nagreva obyektov v metallurgicheskikh pechah* [Temperature measuring device for objects heated in metallurgical furnaces]. RF useful model patent No.72061 БН. 2008. No.9.
2. Parsunkin B.N., Panferov V.N. *Kontrol progreva metalla* [Metal preheating control]. Proceedings of Universities Ferrous Metallurgy, 1981, no.10, pp. 127-129.
3. Andreev S.M., Parsunkin B.N. *Optimizatsiya rezhima upravleniya nagrevom zagotovok v pechah prohodnogo tipa* [Control mode enhancement of billet heating in through-type furnaces]. Magnitogorsk: Publishing house of Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2013, 376 p.

УДК 621.3.02:669.187.28

Агапитов Е.Б., Тихонов А.В.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАЗМЕННО-ДУГОВОГО ТОКОПОДВОДА ПРИ НАГРЕВЕ ШЛАКОМЕТАЛЛИЧЕСКОГО РАСПЛАВА

В статье приведены результаты экспериментального исследования и обоснование применения нагрева шлакометаллического расплава путем электрического нагрева сопротивлением слоя шлака при плазменно-дуговом токоподводе.

Ключевые слова: плазменно-дуговой токоподвод, внепечная обработка, шлак, плазма, сопротивление шлака, скорость плавления, нагрев.

Бурный интерес к низкотемпературной плазме и применению стабилизированных газом струй в отечественной металлургии 70-80-х гг. XX в. снизился в связи со спецификой развития отечественной металлургии, которая в качестве основного направления развития выбрала наращивание производственных мощностей. Попытка заменить электродуговой нагрев и переплав в традиционной электрометаллургии на плазменный постепенно (за исключением дорогостоящей спецэлектрометаллургии) зашла в тупик из-за

отсутствия аналогичных по мощности плазмотронов, дороговизны источников питания, сложности эксплуатации оборудования. Однако развитие процессов внепечной обработки расплавов стали с конца 1980-х годов заставляет по-новому взглянуть на весь спектр внепечных процессов с точки зрения возможности использования в них высокотемпературных струйных электродуговых устройств.

Наличие в ковше агрегата печь – ковш (АПК) готового расплава, который должен пройти обработку, в

частности подогрев на 20–70°C, в сложных технологических и временных условиях создает основы для использования плазменных устройств ограниченной мощности, работающих в импульсном режиме.

При производстве сверхчистых ультранизкоуглеродистых сталей возможности установок рафинирования с графитовыми электродами по схемам VOD/VAD и ASEA-SKF ограничены из-за проблем конечной десульфурации. Для этого требуется обработка расплава стали высокотемпературным шлаком, который нельзя нагревать с применением графитовых электродов, вследствие неизбежного науглероживания металла. При этом плазменный нагрев создает лучшие условия, поскольку для нагрева используются нерасходуемые водоохлаждаемые электроды или водоохлаждаемый катод и неохлаждаемый анод. Плазменно-дуговой разряд может возбуждаться между плазматронами без электрического контакта с днищем ковша. Так как режим подогрева происходит непродолжительное время, измеряемое минутами, влияние эрозии электродов плазматрона на расплав должно быть незначительным [1].

Опыта применения плазматронов для крупнотоннажных объектов нет и оценить экономическую эффективность этого приема не представляется возможным. При этом проведенные многочисленные исследовательские и опытно-конструкторские работы показали, что использование плазменных нагревателей как простой альтернативы традиционному электродуговому нагреву малоэффективно, а концептуального подхода к стратегии практического использования плазменных устройств в современной отечественной металлургии нет [2].

Однако для внепечной обработки в условиях интенсивного перемешивания шлака с расплавом, особенно в случае использования плазменного нагрева, приём преимущественного нагрева расплава перегретым шлаком может быть технологически оправдан [3].

Перегрев шлака можно осуществлять как теплообменом от плазменной газовой струи, так и за счет нагрева сопротивлением слоя шлака. Последнее осуществляется включением сопротивления шлака в электрическую цепь.

Подвод постоянного тока к слою шлака осуществляется аргоновой плазмой от электродов, подключенных к разным полюсам общего источника постоянного тока (рис. 1, а). В варианте (рис. 1, б) [4, 5] используются две независимые плазменные струи, причем ток нагрева проводника подается на катоды плазматронов. Для организации диффузного токоподвода [6, 7] возможно вакуумирование рабочего пространства (рис. 1, в) при разрежении ($P < 70$ Па).

Для исследования энергетических характеристик нагрева и плавления шлака при плазменно-дуговом токоподводе было проведено экспериментальное исследование, направленное на определение скорости плавления шлака при плазменно-дуговом токоподводе.

Энтальпию шлака, нагретого до температуры расплавления, можно оценить:

$$I_{\text{шл}} = C_{\text{шл}} \cdot t_{\text{шл}}^{\text{пл}}, \quad (1)$$

при $C_{\text{шл}} = 0,96$ кДж/кг·°C; $t_{\text{шл}}^{\text{пл}} = 1500^\circ\text{C}$; $I_{\text{шл}} = 1,44$ МДж/кг.

Энтальпия шлака включает: затраты тепла на нагрев до $t_{\text{пл}}$, скрытую теплоту плавления и затраты тепла на перегрев шлака до заданной температуры. Например, для шлака состава, %: $\text{SiO}_2 = 48$; $\text{FeO} = 14$; $\text{CaO} = 34$; $\text{Al}_2\text{O}_3 = 10$ энтальпия $I_{\text{шл}}$ (Дж/г) равна: 695 ($t = 700^\circ\text{C}$); 1301 ($t = 1300^\circ\text{C}$), для шлака состава, %: $\text{SiO}_2 = 50$; $\text{FeO} = 20$; $\text{CaO} = 20$; $\text{Al}_2\text{O}_3 = 10$ энтальпия $I_{\text{шл}}$ (Дж/г) равна: 1645 ($t = 1200^\circ\text{C}$); 1815 ($t = 1350^\circ\text{C}$).

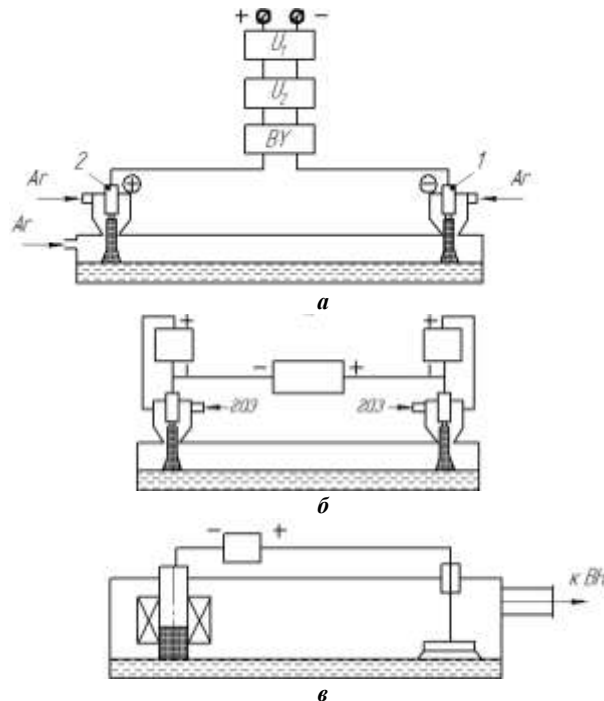


Рис. 1. Схемы вариантов контактно-плазменного нагрева шлака

Электропроводность флюсов для электрошлакового подогрева шлака состава, %: $\text{SiO}_2 = 25 \div 30$; $\text{Al}_2\text{O}_3 = 30 \div 60$; $\text{CaO} = 20 \div 45$; $\text{Mg} = 5 \div 20$; $\text{CaF}_2 = 20 \div 100$ составляет $\chi = 0,4 \div 6$ Ом⁻¹·см⁻¹ (при $t = 600 \div 1900^\circ\text{C}$).

Характер выделения тепла Джоуля (тепла электросопротивления) в шлаке определяется соотношением сопротивлений в объеме шлака и в зоне контакта дуги со шлаком. Если сопротивление дуги (плазмообразующий газ-воздух) или двух дуг значительно больше сопротивления шлака, то основная доля тепловыделения будет приходиться на границу раздела дуга-шлак.

Количество выделившейся теплоты (Дж/с) при прохождении тока через проводник описывается законом Джоуля:

$$Q = I^2 \cdot R, \quad (2)$$

где R – сопротивление проводника; I – ток.

$$R = l / \chi \cdot S = \rho \cdot l / S, \quad (3)$$

где χ – удельная проводимость; $\chi = 1/\rho$ См/м; ρ – удельное сопротивление, Ом·мм²/м; S – площадь сечения проводника; l – длина.

С учетом $U = R \cdot I$ и $P = U \cdot I$ (где U – напряжение, I – ток, P – мощность) зависимость для удельной электропроводности шлака:

$$\chi = \frac{P}{U \cdot A}; \quad \chi = \frac{P \cdot l}{U^2 \cdot A}. \quad (4)$$

Здесь A - эффективная площадь сечения проводника.

С уменьшением χ требуется более высокое напряжение U , если ток I , l и A постоянны.

Истинное сопротивление слоя шлака зависит от его конфигурации (длины, толщины и ширины слоя) и устройства, в котором проводится обработка:

$$R_{\text{ш}} = \frac{l}{\chi b h_{\text{ш}}}, \quad (5)$$

где χ - удельная электропроводность шлака, $\text{Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$; l - длина шлакового слоя; b - ширина слоя; $h_{\text{ш}}$ - толщина слоя шлака.

Расчетная зависимость сопротивления шлака от его толщины представлена на рис. 2. По выбранному сопротивлению шлака, при условии, что расплав включен в цепь плазмотрона и источника питания последовательно, можно построить совместную вольт-амперную характеристику (рис. 3). Линии постоянных сопротивлений шлака соединяют напряжение холостого хода ($U_{\text{хх}}$) и ток короткого замыкания шлака ($I_{\text{к}}$). ВАХ дуги представлены для плазмотрона прямой полярности с цилиндрическим катодом. Пунктирная линия ограничивает область устойчивого горения дуги.

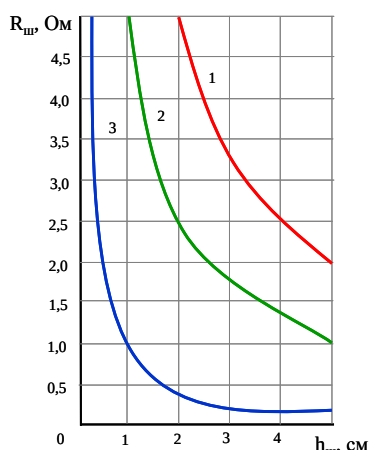


Рис. 2. Изменение сопротивления шлакового слоя от его толщины. Длина шлакового слоя – 50 см; ширина слоя – 10 см; удельная электропроводность χ , $\text{Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$: 1 – 0,5; 2 – 1,0; 3 – 5,0

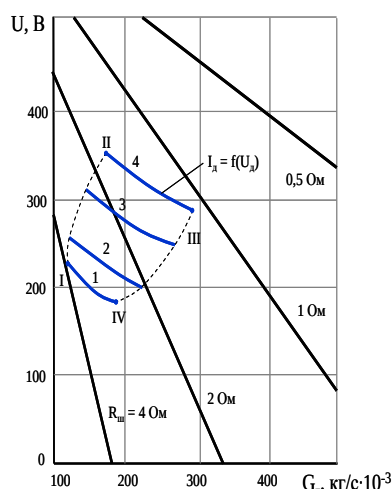


Рис. 3. Совместная ВАХ системы плазмотрон – шлак. Расход воздуха на плазмотрон G_r , $\text{кг/с} \cdot 10^{-3}$: 1 – 1,0; 2 – 1,3; 3 – 1,7; 4 – 2,2

Рассмотрим несколько схем организации нагрева и плавления шлака с плазмотронами (рис. 4). Дуга в схемах замещения включена последовательно с активным сопротивлением (балластным) R_b и сопротивлением шлака $R_{\text{ш}}$. Источником питания схем служит источник постоянного напряжения ($U_{\text{хх}} = 670 \text{ В}$). Балластное сопротивление в данном случае обеспечивает создание падающей характеристики напряжения, подведенного к дуге, и ограничивает ток короткого замыкания.

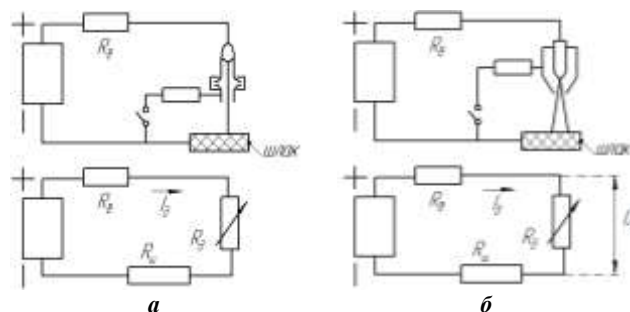


Рис. 4. Схемы установок (и схемы замещения) плазменно-контактного нагрева шлака с одним плазмотроном

Для определения скорости плавления шлака при различных вариантах его нагрева исследовались две схемы (рис. 5) [8]:

- а) с воздушным плазмотроном косвенного действия прямой полярности и подачи пропана на срез сопла, с наложением «плавающего» потенциала на плавящийся образец;
- б) с нагревом дуговым плазмотроном прямой полярности с графитовым катодом, при вихревой стабилизации дуги смесью воздуха и пропана.

На подине из графитовой пластины, установленной под углом 15° , размещался образец массой $m=0,022 \text{ кг}$ по оси плазмотрона, на расстоянии $x=0,08 \text{ м}$ от сопла. Расход воздуха на плазмотрон составлял $G_r = 1 \text{ г/с}$. Коэффициент избытка воздуха в обоих случаях был одинаковым – $\alpha=0,5$. Мощность, подводимая к плазмотронам – $N_{\text{эл}}=15 \div 25 \text{ кВт}$.

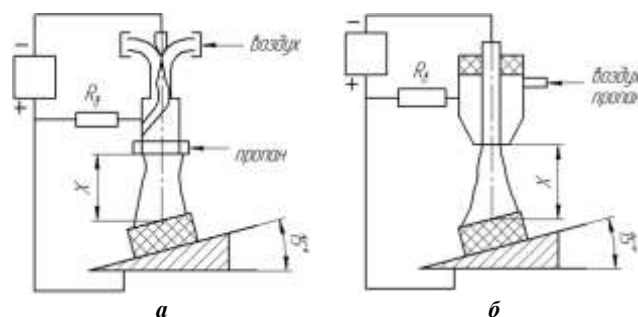


Рис. 5. Схемы плазменного плавления шлака

В обоих случаях инициация разряда начиналась с графитового электрода, с последующим переходом дугового пятна на образец по мере его расплавления. Время проплавления образца модельного шлака до достижения вязкости, обеспечивающей его стекание, фиксировалось секундомером.

Результаты определения скорости плавления шлака представлены на рис. 6. Минимальная толщина расплава на поду, обеспечивающая создание надежной электрической цепи, составляла 30 мм. Нагрев прямой дугой обеспечивал в 3-6 раз более высокую скорость

плавления во всем исследованном диапазоне мощностей. Для обеспечения стабильности горения дуги на образце – приходилось выдерживать соотношение воздух – пропан в соответствии с зависимостью, представленной на рис. 7.

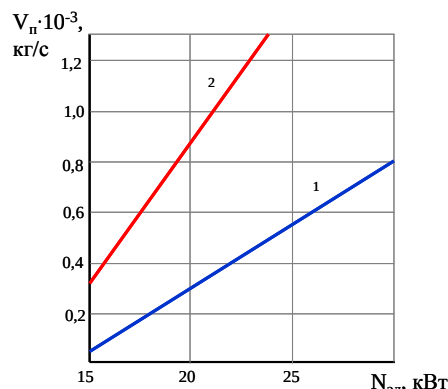


Рис. 6. Изменение скорости плазменного плавления шлака от мощности ЭДУ: 1 – нагрев по схеме (а); 2 – по схеме (б)

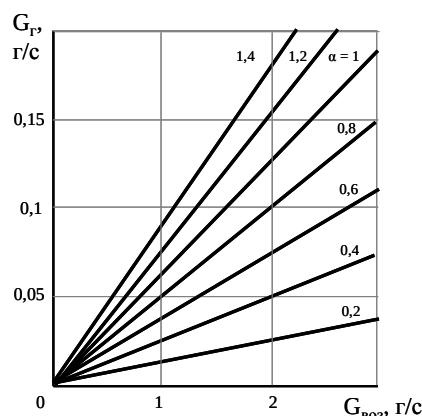


Рис. 7. Связь изменения расхода воздуха от расхода пропана для обеспечения условий стабильности работы ЭДУ

Результаты проведенных экспериментов показали, что стадию расплавления шлака лучше организовывать традиционным дуговым способом, после чего для перегрева шлака можно использовать прием нагрева сопротивлением при плазменном токоподводе.

Авторы намеренно не приводили результаты в относительных единицах, т.к. опыт работы с плазмотронами показал, что результаты лабораторных исследований плохо масштабируются и могут использоваться лишь для качественных оценок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Семкин И.Г., Коптев А.П., Морозов А.П. Внепечная плазменная металлургия. Магнитогорск: МГТУ, 2000. 490 с.
2. Тихонов А.В., Агапитов Е.Б. Способы интенсификации перехода металлического лома в расплав // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: материалы межрегион. науч.-техн. конф. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. тех. ун-та им. Г.И. Носова, 2013. №71. Т.2. С.103-105.
3. Агапитов Е.Б. Энергосбережение при струйно-плазменной ковшевой обработке расплава стали // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2011. №4. С.88-90.
4. А.с. 357244 СССР, C21C 7/10. Способ обработки металла.
5. Пат.161111 ВНР, МКИ4 H01F 3/00 Способ подвода тока для прямого нагрева через контакты из газовой плазмы/Ф.Бали. Опубл.1977
6. Заявка 2151090 Франция, МКИ4 H05B 3/00 Способ передачи электротока для нагрева детали при контакте с газовой плазмой/ Ф.Бали. Опубл.1973
7. Заявка 1400576 Великобритания, МКИ4 H05B 3/00 Способ подвода тока к металлической заготовке / Ф.Бали. Опубл.1975.
8. Агапитов Е.Б., Морозов А.П. Плазменно-джоулевый нагрев шлакометаллического расплава при внепечной обработке стали // Тепломассоперенос и свойства жидких металлов: тез. докл. рос. межотраслевой конференции. Обнинск, 29–31 октября 2002 г. Обнинск, 2002. С.212 –214.

INFORMATION IN ENGLISH

ENERGY CHARACTERISTICS OF PLASMA-ARC CURRENT LEAD DURING SLAG-METAL MELT HEATING

Agapitov E.B., Tikhonov A.V.

The article presents results of experimental studies and engineering study of a slag melt heating by the slag layer heating with electrical resistance of the in plasma-arc current lead.

Keywords: plasma arc current lead, ladle treatment, slag, plasma, slag resistance, melting rate, heating.

REFERENCES

1. Semkin I.G., Koptev A.P., Morozov A.P. *Vnepechnaya plazmennaya metallurgiya* [Ladle plasma metallurgy]. Magnitogorsk: Nosov MSTU, 2000. 490 p.
2. Tikhonov A.V., Agapitov E.B. *Sposoby intensifikatsii perehoda metallichesкого лома v rasplav* [Intensification methods of metal scrap transition into the melt]. Current problems of modern science, technology and education. 2013, no.71, vol.2, pp.103-105.
3. Agapitov E.B. *Energoberezhenie pri struino-plazmennoi kovshevoi obrabotke raspлава stali* [Energy saving in

the plasma jet of molten steel ladle treatment]. Herald of Nosov Magnitogorsk State Technical University. 2011. no.4, pp.88-90.

4. AS 357244 USSR S21S 7/10. Metal processing method.
5. Pat.161111 Hungary, MKI4 N01F 3/00 Method of current supply for direct heating through the contacts from gas plasma. F.Bali. Publ.1977/
6. Application 2151090 France MKI4 N05V 3/00 Method of electric current transmission for heating parts coming into contact with gas plasma. F.Bali. Publ.1973.
7. Application 1400576 Great Britain MKI4 N05V 3/00 Method of current supply to the metal workpiece. F.Bali. Publ.1975.
8. Agapitov E.B., Morozov A.P. *Plazmenno-dzhoulevyi nagrev shlakometallichesкого расплава pri vnepechnoi obrabotke stali. Tepломассоперенос i svoystva zhidkih metallov*. [Plasma - joule heating of the slag-metal melt during ladle steel processing and Heat and mass transfer properties of liquid metals]. Abstracts of the Russian industrial conference. Obninsk October 29-31, 2002. Obninsk, 2002, pp. 212-214.

УДК 314.212:620.111.3

Николаев Н.А., Николаев А.А., Леднов Р.А.

ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ТРАНСФОРМАТОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ КАК ОСНОВА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

Отмечено, что мониторинг и диагностирование технического состояния трансформаторов являются необходимыми условиями внедрения технологии Smart Grid в промышленных электрических сетях. Дана характеристика трансформаторов, находящихся в эксплуатации в цехах управления главного энергетика ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (ОАО «ММК»). Подтверждена тенденция к старению трансформаторного оборудования. Обоснованы функции диагностической системы. Представлены описание и состав оборудования системы мониторинга, внедренной на силовых трансформаторах цеха электрических сетей и подстанций ОАО «ММК». Приведены примеры трендов, позволяющих контролировать диагностические параметры в реальном времени. Отмечены основные технические эффекты от внедрения системы. Поставлена задача разработки инженерных методик многопараметрического диагностирования, позволяющих локализовать и идентифицировать неисправность по совокупности диагностических признаков.

Ключевые слова: металлургическое предприятие, силовые трансформаторы, техническое состояние, система мониторинга, требования, состав оборудования, внедрение, эффективность.

ВВЕДЕНИЕ

Энергетическая безопасность и надежность электроснабжения промышленных предприятий во многом определяются работой силовых трансформаторов, обеспечивающих согласование комплекса с системой и преобразование ряда параметров электроэнергии в требуемые для дальнейшего ее использования. Высокая степень износа трансформаторов создает потенциальную опасность как для потребителей, так и для обслуживающего персонала.

Внедрение средств мониторинга и диагностирования технического состояния высоковольтных трансформаторов является важнейшей задачей при реализации технологии Smart Grid в энергосистемах и промышленных сетях [1]. Это связано с тем, что физический износ силового электрооборудования в российской энергетике достигает 70–80%. Тенденция старения парка трансформаторов является характерной не только для России, но и для большинства развитых стран, в том числе США, Германии и др. В этих условиях актуальность диагностирования технического состояния трансформаторного оборудования обусловили следующие причины [2]:

- рост количества трансформаторов с истекшим нормативным сроком эксплуатации, что приводит к увеличению числа отказов;
- низкая эффективность тестового контроля, проводимого методами, регламентированными ГОСТ;
- необходимость продления срока эксплуатации сверх нормативного, вплоть до выработки реального, заложенного изготовителем ресурса;
- необходимость предотвращения аварий, убытки от которых исчисляются миллионами рублей;
- тенденция перехода от системы планово-предупредительных ремонтов к ремонтам по состоянию.

Эксплуатация трансформаторного оборудования за пределами нормативного срока службы стала общемировой тенденцией, хотя очевидно, что без принятия специальных мер она сопряжена с повышенными рисками отказов. Вместе с тем замена огромного количества дорогостоящего оборудования в короткий отрезок

времени невозможна технически и не оправдана экономически.

Снижение рисков отказов и уменьшение эксплуатационных затрат обеспечивает установка на трансформаторы автоматизированных систем управления, мониторинга и оперативной диагностики. Внедрение систем мониторинга и диагностики силовых трансформаторов обусловлено приказом №140 от 18.04.2008 г. ОАО «ФСК ЕЭС» утвержден и введен в действие нормативно-технический документ в виде отраслевого Стандарта «Системы мониторинга силовых трансформаторов и автотрансформаторов» [3].

ХАРАКТЕРИСТИКА ТРАНСФОРМАТОРНОГО ПАРКА ОАО «ММК»

Задача внедрения диагностического оборудования актуальна для ОАО «ММК», трансформаторный парк которого в значительной степени выработал нормативный ресурс. В [4, 5] представлена информация о техническом состоянии сетевых и блочных трансформаторов, находящихся в эксплуатации в цехах управления главного энергетика (УГЭ) комбината. На **рис. 1** представлена диаграмма распределения эксплуатируемых трансформаторов по годам ввода. При общем количестве обследованных трансформаторов 251 ед. количество не отработавших нормативный срок (на момент подсчета) составляет около 33%, отработавших сверх нормативного срока – 67%. На **рис. 2** представлены диаграммы, характеризующие процентное соотношение трансформаторов, эксплуатирующихся более 30 лет, с разбиением по классам напряжения.

Как следует из диаграмм, наиболее «возрастным» является парк трансформаторов с номинальным напряжением 35 кВ: более 94% общего количества (32 из 36 ед.) отработало свыше 30 лет. Достаточно сложная картина наблюдается с трансформаторами напряжением 10 кВ (около 68% старше 30 лет), хотя в последнее десятилетие их парк заметно обновился. Средний «возраст» трансформаторов составляет 35 лет, что, в принципе, соответствует показателям по РАО «ЕС России» [6]. Имеются трансформаторы, срок эксплуатации которых превышает 50 лет, вместе с тем обновление парка оборудования происходит недоста-

точными темпами.

Трансформаторы ОАО «ММК» можно условно разделить на три группы: сетевые трансформаторы подстанций, блочные, входящие в состав энергоблоков электростанций, и печные, эксплуатируемые на дуговых сталеплавильных печах кислородно-конвертерного и электросталеплавильного цехов.

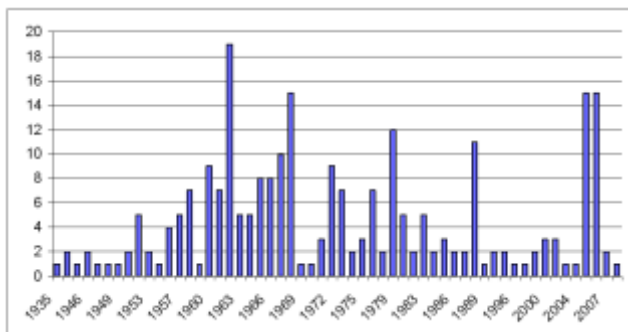


Рис. 1. Распределение трансформаторов УГЭ по годам ввода в эксплуатацию

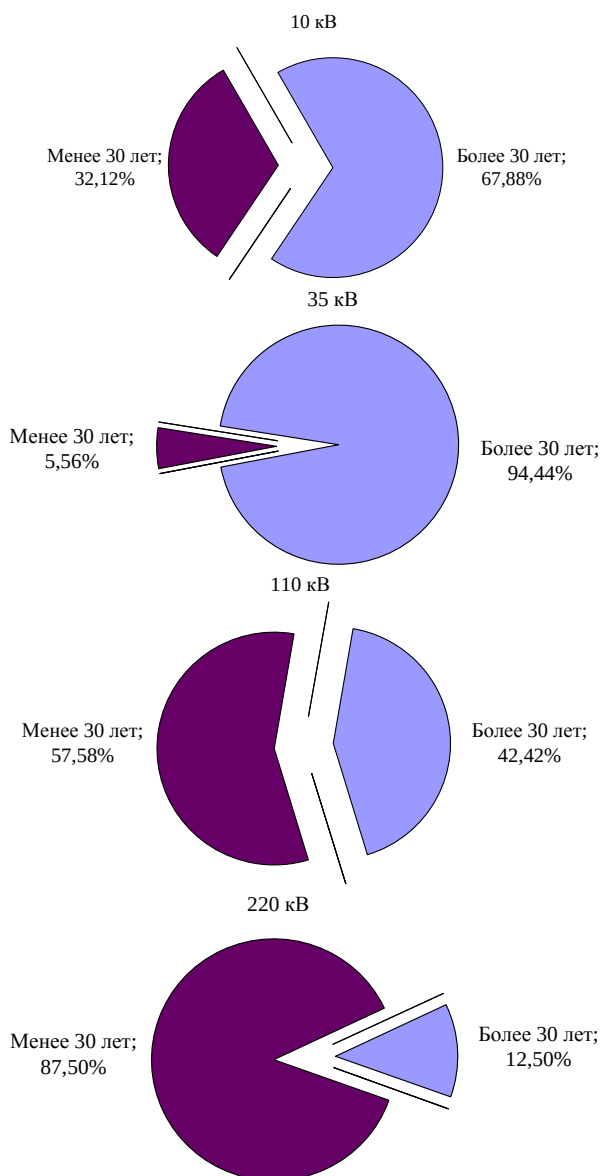


Рис. 2. Распределение трансформаторов, отработавших более 30 лет, по классам напряжения

Можно утверждать, что надежность трансформа-

торов первых двух групп в значительной степени определяет энергетическую безопасность комбината. Надежность трансформаторов сталеплавильных агрегатов является определяющим фактором обеспечения непрерывного производственного цикла.

Условия эксплуатации трансформаторов первых двух групп не имеют принципиальных отличий, хотя режимы их работы различаются. Так, например, у блочных трансформаторов возникают более частые динамические режимы, вызванные остановкой энергоблока. В то же время режимы печных трансформаторов имеют принципиальные отличия. Достаточно заметить, что режим короткого замыкания на электродах (вторичной стороне) является рабочим, а переключение регуляторов изменения числа витков обмотки под нагрузкой (РПН) происходит до 1000 раз в сутки, в отличие от сезонных переключений трансформаторов первых двух групп (5-6 переключений в год). Отсюда следует принципиальное различие признаков неисправностей, методов и технических средств диагностирования печных трансформаторов [7-9].

Коллективом Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова (МГТУ) совместно со специалистами УГЭ проведены исследования причин возникновения неисправностей в силовых трансформаторах ОАО «ММК» за период около 10 лет [10]. С этой целью был разработан аппаратно-программный комплекс на основе переносного прибора анализа частичных разрядов (ЧР) и локализации зон дефектов в изоляции высоковольтного оборудования AR-700 [11]. Определено, что сетевые и блочные трансформаторы 110 кВ относятся к группе, имеющей самую высокую частоту появления повреждений. Анализ распределения повреждений по основным узлам трансформаторов показал, что наибольшую повреждаемость имеют: высоковольтные вводы – 22%, обмотки – 16%, устройства РПН – 13,5% [4, 5].

Исследования, выполненные на однотипных трансформаторах, подтвердили прямую взаимосвязь интенсивности ЧР и длительности эксплуатации трансформатора после капитального ремонта. Накопление информации и обработка сигналов позволили определить количественные характеристики ЧР [11-13]. Выполнена оценка технического состояния по результатам замеров и сопоставления показателей разрядной активности с нормативными. Впервые предложено применение методики и алгоритма обработки результатов периодической акустической локализации ЧР на основе метода субтрактивной (горной) кластеризации, обеспечивающих локализацию и идентификацию неисправностей, а также оценку динамики их развития [14].

Вместе с тем проведенные исследования нельзя признать исчерпывающими, а полученные результаты достаточными для предотвращения аварий и оптимизации планово-предупредительных работ. В перечень приоритетных направлений комбината включено оснащение основного оборудования стационарными системами мониторинга и технического диагностирования. Соответственно возрастает роль методов диагностирования в режиме реального времени. Однако в настоящее время опыта внедрения и эксплуатации стационарных систем мониторинга состояния силовых

трансформаторов в ОАО «ММК», как и на большинстве других предприятий, явно недостаточно.

ФУНКЦИИ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА

Согласно приложению к приказу ОАО «ФСК ЕЭС» от 18.04.2008 №140 система мониторинга должна обеспечивать для каждой единицы трансформаторного оборудования выполнение следующих функций [15]:

1. Контроль влагосодержания в масле бака. Это важный диагностический параметр, влияющий на надежность работы всего трансформатора. Для печных трансформаторов следует также контролировать содержание растворенного в масле водорода. Для печного трансформатора большое количество растворенных горючих газов вызвано резкопеременной нагрузкой и частыми переключениями РПН.

2. Непрерывная регистрация уровня и распределения частичных разрядов в изоляции вводов, обмоток и сердечника. Встроенная экспертная система дает возможность определить тип дефекта, частично локализовать, оценить его опасность для дальнейшей работы трансформатора. Если на трансформаторе установлена система контроля растворенных газов в масле, то совместная обработка результатов измерений ЧР и газов дает наиболее точные результаты.

3. Возможность в on-line режиме контролировать наличие деформаций обмоток трансформатора. Такие деформации возникают после воздействия ударных нагрузок, являющихся характерными для печного трансформатора. Данный вид контроля обеспечивается средствами вибродиагностики.

4. Диагностика системы охлаждения трансформатора, которая достаточно корректно выполняется на основании измерения и анализа температуры вверху и внизу бака и рабочей нагрузки трансформатора. В таких расчетах используется упрощенная тепловая модель трансформатора.

5. Техническое состояние РПН трансформатора. При помощи датчиков контролируется текущее поло-

жение РПН, мощность, потребляемая приводным двигателем в процессе коммутации. Также при помощи специальных фильтров может регистрироваться диаграмма работы контактора при каждой коммутации. Дополнительно может определяться наличие дуговых разрядов в избирателе РПН при помощи вибрационного и акустического датчиков.

Текущие значения токов обмоток трансформаторного оборудования по сторонам высокого и низкого напряжений должны передаваться в систему мониторинга. Рекомендуются принимать данные сигналы по цифровому последовательному каналу связи при наличии у датчика такого выхода.

ОПИСАНИЕ РАЗРАБОТАННОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА

Разработана система мониторинга и многопараметрического диагностирования технического состояния, обеспечивающая непрерывный контроль следующих диагностических параметров:

- влагосодержание масла;
- состав газов, растворенных в масле;
- состояние изоляции высоковольтных вводов;
- температура верхних и нижних слоев масла в баке трансформатора;
- частичные разряды на высоковольтных вводах и в баке трансформатора.

Система внедрена на силовых трансформаторах цеха электрических сетей и подстанций (ЦЭСиП) ОАО «ММК». Структура системы представлена на **рис. 3**, расположение оборудования на корпусе трансформатора – на фотографии, **рис. 4** [1].

Диагностический комплекс выполнен на оборудовании, производимом ОАО «Димрус», г. Пермь, которое эксплуатируется на многих отечественных и зарубежных энергетических объектах. Основными диагностическими приборами являются анализатор газов, растворенных в масле, типа Hydran M2 [15], его расположение показано на **рис. 5**, а также датчики частичных разрядов, установленные на высоковольтных вводах, и датчики температуры верхних и нижних слоев масла.

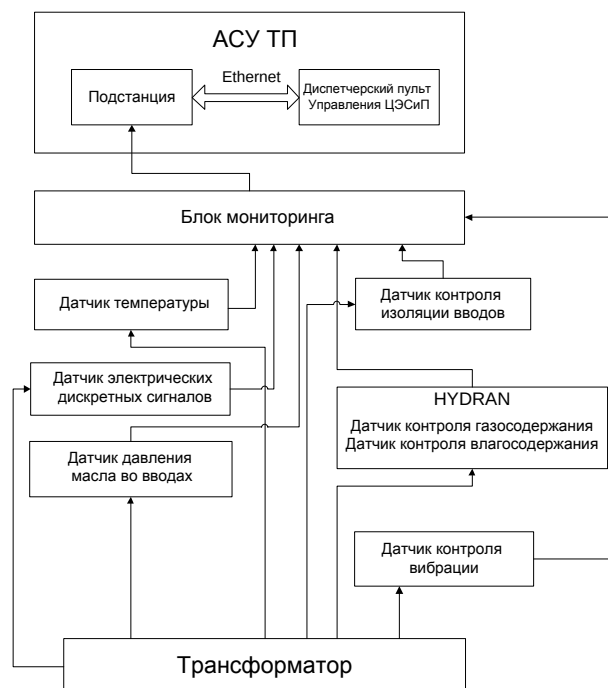


Рис. 3. Структурная схема диагностического комплекса, реализованного на трансформаторах ЦЭСиП ОАО «ММК»



Рис. 4. Установка диагностического оборудования на трансформаторе ЦЭСиП

Сбор и обработка диагностической информации осуществляются с помощью системы TIM-3 (рис. 6, а) [17] либо более совершенной системы TDM P034, показанной на рис. 6, б [18].



Рис. 5. Подключение анализатора газов Hydram M2



а



Рис. 6. Системы диагностического мониторинга трансформаторного оборудования: TIM-3 (а) и TDM P034 (б)
РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

На рис. 7, в качестве примера, представлены тренды частичных разрядов, позволившие своевременно сделать следующие выводы. На момент диагностического обследования имелись незначительные частичные разряды в фазе С, наиболее вероятно, связанные с дефектом типа «Разряд между двумя слоями высоковольтной изоляции» (внутренний разряд) (рис. 7, а). Характерные черты данного дефекта: частичные разряды располагаются в двух симметричных угловых зонах напряжения питающей сети, максимальная интенсивность в зонах 60–75 и 220–255 эл. град. (рис. 7, б).

При последующих замерах обнаружена тенденция к появлению дефекта типа «Поверхностный разряд высоковольтного электрода» в фазе В (рис. 7, в): все импульсы сосредоточены в зоне нарастания амплитуды питающего напряжения, максимальная интенсивность в диапазонах 60–90 и 235–270 эл. град. Наиболее выражено увеличение распределения количества импульсов в секунду в фазе В на всем отрезке мониторинга, что можно наблюдать по трехмерным графикам распределения (см. рис. 7, а). Такой тип дефектов характерен для трансформаторов с высоким рабочим напряжением.

Приведенный пример показывает, что тренды диагностических параметров позволяют сделать предварительные выводы об изменении технического состояния объекта и в результате оценить степень развития дефекта.

Отличием внедренной системы является подключение диагностических сигналов в систему релейной защиты «Экра», установленную на трансформаторе. На сигнализацию «неисправность» выведены:

- 1) сигналы Hydran:
 - увеличение количества газов, растворенных в масле;
 - количество газа в масле критическое;
 - увеличение влажности масла;
- 2) сигналы Tim 3 (TDM P034):
 - ухудшение изоляции вводов;
 - уровень частичных разрядов критический.

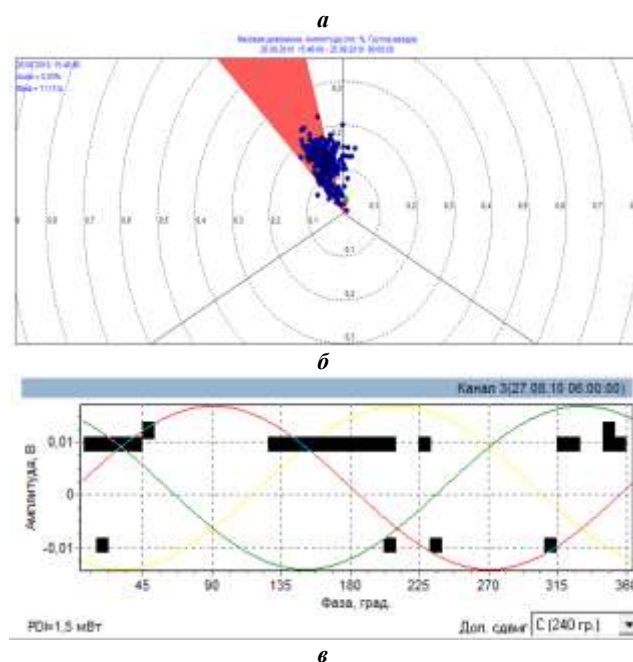
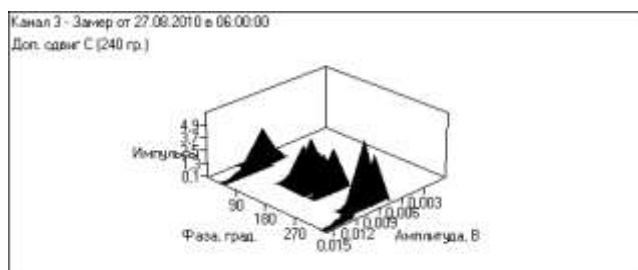


Рис. 7. Примеры трендов диагностических параметров

Однако в процессе эксплуатации выявлено, что недостатком многопараметрических систем диагностирования является отсутствие апробированных инженерных методик, позволяющих идентифицировать неисправности по совокупности диагностических признаков. Работы по созданию таких методик ведутся многими отечественными и зарубежными учеными, в том числе сотрудниками МГТУ совместно со специалистами ОАО «ММК» и фирмы «Димрус».

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВНЕДРЕНИЯ СТАЦИОНАРНОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА

В настоящее время системы, аналогичные рассмотренной, внедряются на нескольких трансформаторах ЦЭСиП ОАО «ММК». Ведутся сбор, обработка и накопление статистической информации.

Основные технические эффекты от внедрения систем:

- возможность непрерывного контроля технического состояния работающих трансформаторов;
- обнаружение признаков неисправностей на ранних стадиях;
- возможность локализации неисправностей;
- эффективное планирование профилактических и ремонтных работ.

Как правило, стоимость поставки современной системы мониторинга составляет от 0,5 до 1,5 млн руб. в зависимости от комплектации. С учетом монтажных работ и других статей расходов эта стоимость может возрасти в 1,5-2 раза [19]. Стоимость комплексного обследования трансформатора без диагностической системы зависит от большого количества факторов и составляет от 0,15 до 0,5 млн руб. В эту сумму обычно входят все затраты на проведение комплексного обследования.

Проводя сравнение двух подходов к диагностике трансформаторов, можно утверждать, что на средства, затрачиваемые на поставку одной «стандартной» системы мониторинга, можно выполнить «типовое» комплексное обследование от 4 до 8 трансформаторов. В

этом вопросе комплексное обследование более экономично.

Более важным является то, что реально, проводя комплексное обследование всего трансформаторного парка с интервалом один раз в три года, можно снизить аварийность трансформаторного оборудования на 15-20%. При этом стоимость затрат уже через 7-10 лет применения такой технической стратегии сравняется с вариантом монтажа на всех трансформаторах систем мониторинга.

Эффективность предупреждения аварийных ситуаций и снижения потерь от их возникновения при использовании систем мониторинга существенно выше. Оценка, проведенная специалистами «Димрус», показала, что полная стоимость системы мониторинга составляет 5-7% от цены контролируемого трансформатора. Если хотя бы одна из смонтированных систем мониторинга позволит предупредить одну аварию, то окупятся затраты на приобретение и установку 15-20 аналогичных систем. В этой сумме учтены только прямые затраты на восстановление (либо замену) трансформатора, все остальные затраты на устранение последствий аварии, которые иногда равны прямым затратам, не учтены.

В целом можно заключить, что на безремонтном интервале эксплуатации трансформатора, равном 12 годам, экономические затраты на установку систем мониторинга сравнимы с затратами на проведение комплексных обследований. Если же учитывать уровень снижения аварийных ситуаций, то эффективность внедрения систем мониторинга будет в два и более раза выше, чем при проведении периодических обследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Диагностирование технического состояния силовых трансформаторов как составляющая SMART GRID-технологий в промышленных электросетях / А.С. Карандаев, А.А. Николаев, С.А. Евдокимов, Л.А. Маслов // Современные информационные технологии: труды международной научно-технической конференции. Пенза: Пензенская государственная технологическая академия, 2013. Вып. 17. С. 132-139.
2. Алексеев Б. А. Контроль состояния (диагностика) крупных силовых трансформаторов. М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2002. 216 с.
3. СО 34.46.305-2005 «Инструкция по применению системы мониторинга при изготовлении и ремонте силовых трансформаторов» // ОАО «ЕЭС России». URL: http://ohranatruda.ru/ot_biblio/normativ/data_normativ/51/51155/
4. Анализ повреждаемости силовых трансформаторов электростанций металлургического комбината / Е.А. Кузнецов, А.Я. Альбрехт, О.И. Карандаева, С.Л. Цемошевич // Изв. вузов. Электромеханика. 2011. №4. С. 82-85.
5. Карандаева О.И. Характеристика повреждаемости сетевых и блочных трансформаторов ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2011. №4. С. 15-20.
6. Физический износ оборудования на ТЭС РАО "ЕЭС России" // ДВ Энергосервис. URL: <http://energoservicedv.ru/energetika/resheniya2199.html>.
7. Требования к системе мониторинга технического состояния трансформатора сверхмощной дуговой сталеплавильной печи / А.С. Карандаев, С.А. Евдокимов, А.А. Сарлыбаев, Р.А. Леднов // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2013. №2. С. 58-68.
8. Диагностические функции системы непрерывного контроля технического состояния трансформаторов агрегатов электродугового расплава металла / Карандаев А.С., Евдокимов С.А., Храмшин В.Р., Леднов Р.А. // Металлург. 2014. №8. С. 53-59.
9. Основные неисправности и методы диагностирования силовых трансформаторов в условиях эксплуатации / И.Г. Гун, В.М. Салганик, С.А. Евдокимов, А.А. Сарлыбаев // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2012. № 1. С. 102-105.
10. Разработка и внедрение интеллектуальных систем диагностирования технического состояния электрического оборудования / С.И. Лукьянов, А.С. Карандаев, С.А. Евдокимов, А.С. Сарваров, М.Ю. Петушков, В.Р. Храмшин // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2014. № 1. С. 129-136.
11. Контроль технического состояния силовых трансформаторов методом акустического диагностирования / А.С. Карандаев, С.А. Евдокимов, О.И. Карандаева, С.Е. Мостовой, А.А. Чертоусов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». Вып. 10. 2008. № 26(126). С. 26-31.
12. Система диагностического мониторинга технического состояния трансформатора дуговой сталеплавильной печи / Карандаев А.С., Евдокимов С.А., Храмшин В.Р., Сарлыбаев А.А. // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2014. № 4. С. 27-33.
13. Диагностирование силовых трансформаторов методом акустической локализации частичных разрядов / А.С. Карандаев, С.А. Евдокимов, Д.Х. Девятов, Б.Н. Парсункин, А.А. Сарлыбаев // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2012. №1. С. 105-108.
14. Методика диагностирования силовых трансформаторов на основе кластерной обработки акустических сигналов / А.С. Карандаев, С.А. Евдокимов, С.Л. Цемошевич, С.Е. Мостовой, А.В. Ануфриев, А.А. Сарлыбаев // Известия вузов. Электромеханика. 2011. № 4. С. 86-90.
15. Системы мониторинга силовых трансформаторов // Приложение к приказу ОАО «ФСК ЕЭС» от 18.04.2008 № 140 «Системы мониторинга силовых трансформаторов и автотрансформаторов. Общие технические требования». URL: <http://silovoytransformator.ru/stati/sistemy-monitoringa-silovyh-transformatorov.htm>
16. Дробышевский С. А. Онлайн-мониторинг трансформаторов. URL: <http://forca.ru/stati/podstancii/oplayn-monitoring-transformatorov.html>.
17. Система мониторинга трансформаторов с рабочим напряжением 110-330 кВ ТИМ-3. Руководство по эксплуатации. Пермь: ПВФ «Димрус». 72 с. URL: <http://dimrus.ru/download/category/10-tim3.html>.
18. Модульная система для мониторинга состояния трансформаторного оборудования TDM (TDMR). Руководство по эксплуатации. Пермь: ПВФ «Димрус». 12 с. URL: <http://dimrus.ru/download/category/23-tdm.html>.
19. Сравнение эффективности внедрения систем мониторинга и проведения комплексного обследования трансформаторов // Техническая документация ПВФ «Вибро-Центр». URL: http://www.electronpribor.ru/resources/docs/tdm_obsl.pdf.

INFORMATION IN ENGLISH

TECHNICAL STATE DIAGNOSIS OF TRANSFORMER FACILITIES AS A BASIS OF ENERGY SUPPLY SECURITY

Nikolaev N.A., Nikolaev A.A., Lednov R.A.

It is noted that monitoring and diagnosis of transformers technical state is a mandatory requirement for Smart Grid technology implementation in industrial electrical networks. The main characteristics of transformers operating in the main production shops of the OJSC "Magnitogorsk Iron and Steel Works" (OJSC "MMK") are given. It is found that there is a tendency to aging of transformer facilities. Functions of diagnosis system are explained. The authors describe the configuration of the monitoring system introduced in power transformers of electrical networks and substations of the OJSC "MMK". They offer examples of trends, which make it possible to control test parameters on-line. The main benefits of the system implementation are listed. The research group set the task to develop engineering methods of multiparameter monitoring, which might make it possible to isolate and identify the defect by the complex of diagnostic properties.

Keywords: smelter, power transformers, technical state, monitoring system, requirements, configuration, introduction, efficiency.

REFERENCES

1. Karandaev A.S., Nikolaev A.A., Evdokimov S.A., Maslov L.A. *Diagnostirovanie tehnikeskogo sostoyaniya silovykh transformatorov kak sostavlyayushchaya smart grid tehnologii v promyshlennyykh elektrosyetyah* [Technical state monitoring of power transformers as a part of SMART GRID technology in industrial electrical networks]. Modern information technology: Proceedings of international scientific conference. Penza: Penza state technological academy, 2013, issue 17, pp. 132–139.
2. Alekseev B.A. *Kontrol sostoyaniya (diagnostika) krupnykh silovykh transformatorov* [State control (diagnostic operation) of large power transformers]. Moscow: Publishing house ENAS, 2002, 216 p.
3. CO 34.46.305-2005 «User manual of monitoring system for development and repair of power transformers». OJSC «EES of Russia». http://ohranatruda.ru/ot_biblio/normativ/data_normativ/51/51155/.
4. Kuznetsov E.A., Albreht A.Ya., Karandaeva O.I., Tsemoshevich S.L. *Analiz povrezhdaemosti silovykh transformatorov elektrostantsii metallurgicheskogo kombinata* [Damage rate analysis of power transformers at power stations of a smelter]. Proceedings of universities. Electrical engineering, 2011, no.4, pp. 82–85.
5. Karandaeva O.I. *Harakteristika povrezhdaemosti setevykh i blochnykh transformatorov OAO "Magnitogorskii metallurgicheskii kombinat"* [Damage rate analysis of net and main transformers operating at the OJSC "Magnitogorsk Iron and Steel Plant"]. Bulletin of the South-Ural state university. Series: Power engineering, 2011, no.4, pp. 15–20.
6. Wear and tear of facilities at CHP RAO "EES of Russia" // DV Energoservis. URL: <http://energoservesdv.ru/energetika/resheniya2199.html>.
7. Karandaev A.S., Evdokimov S.A., Sarlibaev A.A., Lednov R.A. *Trebovaniya k sisteme monitoringa tehnikeskogo sostoyaniya transformatora sverhmoschnoi dugovoi staleplavilnoi pechi* [Requirements to the system of technical state monitoring of UNP electric arc furnace transformer]. Machine building: network electronic scientific journal, 2013, no.2, pp. 58–68.
8. Karandaev A.S., Evdokimov S.A., Khrumshin V.R., Lednov R.A. *Diagnosticheskie funktsii sistemi nepreryvnogo kontrolya tehnikeskogo sostoyaniya transformatorov agregatov elektrodugovogo rasplava metalla* [Diagnostic functions of technical state continuous monitoring system for transformers of electric arc melting unit]. Steel worker, 2014, no.8, pp. 53–59.
9. Gun I.G., Salganik V.M., Evdokimov S.A., Sarlibaev A.A. *Osnovnye neispravnosti i metody diagnostirovaniya silovykh transformatorov v usloviyakh ekspluatatsii* [Main faults and monitoring methods of power transformers operation]. Bulletin of Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2012, no.1, pp. 102–105.
10. Lukyanov S.I., Karandaev A.S., Evdokimov S.A., Sarvarov A.S., Petushkov M.Yu., Khrumshin V.R. *Razrabotka i vnedrenie intellektualnykh sistem diagnostirovaniya tehnikeskogo sostoyaniya elektricheskogo oborudovaniya* [Development and implementation of intelligent systems for technical state monitoring of electrical facilities]. Bulletin of Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2014, no.1, pp. 129–136.
11. Karandaev A.S., Evdokimov S.A., Karandaeva O.I., Mostovoi S.E., Chertousov A.A. *Kontrol tehnikeskogo sostoyaniya silovykh transformatorov metodom akusticheskogo diagnostirovaniya* [Technical state monitoring of power transformers using acoustic diagnosis]. Bulletin of the South-Ural State University. Series «Power engineering». Issue 10, 2008, no.26(126), pp. 26–31.
12. Karandaev A.S., Evdokimov S.A., Khrumshin V.R., Sarlibaev A.A. *Sistema diagnosticheskogo monitoringa tehnikeskogo sostoyaniya transformatora dugovoi staleplavilnoi pechi* [Technical state monitoring system for an electric arc furnace transformer]. Electrical engineering, power engineering, electrical engineering industry, 2014, no.4, pp. 27–33.
13. Karandaev A.S., Evdokimov S.A., Devyatov D.H., Parsunkin B.N., Sarlibaev A.A. *Diagnostirovanie silovykh transformatorov metodom akusticheskoi lokatsii chastichnykh razryadov* [Diagnosis of power transformers using the acoustic radar for partial discharges]. Bulletin of Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2012, no.1, pp. 105–108.
14. Karandaev A.S., Evdokimov S.A., Tsemoshevich S.L., Mostovoi S.E., Anufriev A.V., Sarlibaev A.A. *Metodika diagnostirovaniya silovykh transformatorov na osnove klasternoi obrabotki akusticheskikh signalov* [Power transformers monitoring method based on cluster processing of acoustic signals]. Proceedings of Universities. Electrical engineering, 2011, no.4, pp.86–90.
15. *Sistemy monitoringa silovykh transformatorov* [Monitoring systems of power transformers]. Addition to the order of the OJSC «FSK EES» dated 18.04.2008 № 140 «Monitoring systems of power transformers and autotransformers. General technical requirements». URL: <http://silovoytransformator.ru/stati/sistemy-monitoring-silovykh-transformatorov.htm>.
16. Drobyshevskii S.A. *Onlain monitoring transformatorov* [On-line monitoring of transformers]. URL: <http://forca.ru/stati/podstancii/o-playn-monitoring-transformatorov.html>.
17. *Sistema monitoringa transformatorov s rabochim napryazheniem 110÷330 kV TIM-3* [System of transformer monitoring with the operating voltage of 110÷330 kV TIM-3]. Operation manual. Perm: PVF «Dimrus», 72 p. URL: <http://dimrus.ru/download/category/10-tim3.html>.
18. *Modulnaya sistema dlya monitoringa sostoyaniya transformatornogo oborudovaniya TDM (TDMR)* [Modular system for TDM (TDMR) transformer state monitoring]. Operation manual. Perm: PVF «Dimrus», 12 p. URL: <http://dimrus.ru/download/category/23-tdm.html>.
19. *Sravnenie effektivnosti vnedreniya sistem monitoringa i provedeniya kompleksnogo obsledovaniya transformatorov* [Comparison of implementation efficiency of monitoring systems and complex investigation of transformers]. Technical documents of PVF «Vibro-Center». URL: http://www.electronpribor.ru/resources/docs/tdm_obs.pdf.

УДК 65.011.56

Пишнограев Р.С., Суспицын Е.С., Швидченко Д.В., Швидченко Н.В., Апет А.А.

РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМЫ РАННЕГО ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ПРОДОЛЬНЫХ ТРЕЩИН В НЕПРЕРЫВНОЛИТЫХ ЗАГОТОВКАХ

Политика ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (ОАО «ММК») в области качества направлена на постоянное совершенствование технологии производства, снижение количества нештатных ситуаций и уменьшение количества дефектов в продукции. Всё большее значение приобретают системы раннего обнаружения нарушений технологического процесса, позволяющие своевременно выполнить корректирующие действия с целью увеличить процент годной продукции. Одной из таких систем является система раннего детектирования продольных трещин в теле отливаемой заготовки, внедрённая на машине непрерывного литья заготовок №6 (МНЛЗ №6) в 2012 г. В данной статье описан опыт разработки и внедрения данной системы.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ К НАЧАЛУ ИССЛЕДОВАНИЙ

Продольная трещина (рис. 1) в теле сляба является одним из существенных дефектов непрерывнолитой заготовки. Наличие данного дефекта не позволяет отправить слябовую заготовку в прокатку. Для устранения трещины осуществляют огневую зачистку сляба, т.е. срезают часть поверхности заготовки на глубину залегания трещины. При этом возникают дополнительные затраты, связанные с оплатой труда, потерей металла и прочими расходами.



Рис. 1. Продольная трещина в теле отливаемой заготовки

Из анализа причин возникновения продольных трещин, приведённых в литературных источниках, следует, что в большинстве случаев неравномерный отвод тепла от затвердевающей заготовки вызывает неодинаковое распределение полей температур в твердой корочке, что обуславливает формирование в ней внутренних напряжений, которые являются причиной деформирования заготовки. Таким образом, существуют предпосылки для детектирования продольных трещин по характеру изменения теплового портрета кристаллизатора [1, 2].

Хотя причины образования продольных трещин и известны, полностью их устранить на существующих МНЛЗ ОАО «ММК» не удаётся. Поэтому проблема снижения количества непрерывнолитых заготовок с данным дефектом остаётся актуальной, и в 2010 г. на МНЛЗ №6 ОАО «ММК» были начаты исследования по разработке системы раннего детектирования продольных трещин в непрерывнолитой заготовке.

ОПИСАНИЕ ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ

МНЛЗ №6 ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат». МНЛЗ №6 - криволинейная одноручьевая машина непрерывного литья заготовок с вер-

тикальным участком. Толщина отливаемой заготовки – 190, 250 или 300 мм, ширина – от 1400 до 2700 мм. Высота медных плит кристаллизатора – 900 мм, ширина – 2959. Автоматизированная система управления технологическим процессом (АСУ ТП) представляет собой систему температурного контроля поверхности слитка в кристаллизаторе MMS (Mould Monitoring System). Данная система включает в себя девяносто шесть термопар, встроенных в медные стенки кристаллизатора МНЛЗ на трёх уровнях по высоте кристаллизатора. Таким образом, термопары образуют сетку в три ряда (слоя) по периметру кристаллизатора, по тридцать две термопары в каждом ряду. Сбор информации с термопар осуществляется полевыми контроллерами Beckhoff. Также в систему входит станция диагностики, выполняющая архивирование показаний, визуализацию, анализ и генерирующая сигнал о возникновении зазисаний корочки слитка в кристаллизаторе.

На начальном этапе исследований было принято решение использовать информацию о распределении температур по поверхности слитка в кристаллизаторе, полученную при помощи штатной системы температурного контроля кристаллизатора.

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ

При проведении предварительного анализа возможности детектирования продольных трещин в теле отливаемой заготовки по данным штатной системы температурного контроля по технологическим паспортам разлива определены номера плавов и слябов с продольными трещинами. По архивным данным установлены моменты возникновения продольных трещин в отливаемых заготовках. Выполнен анализ характера изменения температуры в моменты зарождения продольных трещин в точках установки ближайших к месту трещинообразования и соседних им термопар.

Например, согласно информации технологического персонала цеха при осмотре слябовых заготовок, отлитых в интервале времени с 00:20 по 00:45 15 мая 2012 г., на поверхности одного из слябов была обнаружена продольная трещина. По номеру сляба и геометрическому положению трещины были рассчитаны примерное время образования трещины и координаты ближайших к ней термопар кристаллизатора: Т10 (верхний слой), Т42 (средний слой) и Т74 (нижний слой). На рис. 2 представлены графики изменения ско-

рости вытягивания слитка и показаний термопар Т10, Т42, Т74. Также на **рис. 2** отмечен расчётный момент образования трещины и приведены графики изменения термопар соседних столбцов: Т8, Т12 (верхний слой), Т40, Т44 (средний слой), Т72, Т76 (нижний слой). Из **рис. 2** следует, что в момент времени зарождения продольной трещины ($t_1 = 860$ с) наблюдается снижение показаний термопар Т10, Т42 и Т74 на $\Delta t_B = 16^\circ\text{C}$, $\Delta t_C = 16^\circ\text{C}$ и $\Delta t_H = 12^\circ\text{C}$ соответственно. При этом в показаниях остальных термопар, расположенных в соседних столбцах координатной сетки встройки, подобного поведения не обнаруживается. В момент времени $t_2 = 923$ с происходит снижение скорости разливки, что приводит к снижению показаний всех термопар. Это доказывает, что термопары исправны и адекватно реагируют на изменение условий разливки.

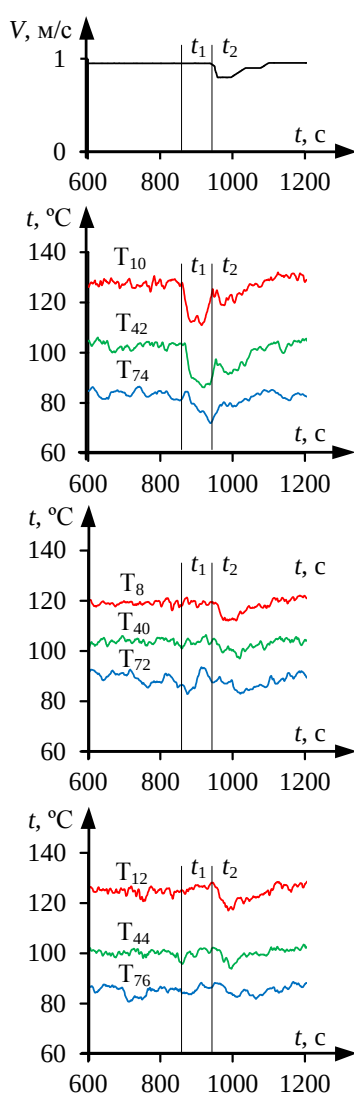


Рис. 2. Графики изменения показаний столбца термопар, ближайших к месту возникновения дефекта

На основании подобного анализа нескольких случаев возникновения продольных трещин сделаны следующие выводы:

1. Возникновение продольной трещины в теле отливаемой заготовки отражается в показаниях термодатчиков в виде локальной, вертикальной области захлаживания.

2. В большинстве случаев область захлаживания локализуется на одном столбце термопар кристаллизатора. В некоторых – распространяется на два столбца.

3. Скорость распространения области захлаживания, соответствующей местоположению продольной трещины, может изменяться в различных пределах: от одновременного захлаживания слитка на нескольких двух слоях столбца термопар до $0,3V$ (где V – скорость вытягивания заготовки).

4. Возникновение продольных трещин со стороны большого и со стороны малого радиусов кристаллизатора происходит независимо.

Таким образом, был сформулирован основной признак возникновения продольной трещины в теле отливаемой заготовки в процессе первичной кристаллизации: локальное вертикальное захлаживание поверхности заготовки в кристаллизаторе.

На следующем этапе исследований был выполнен статистический анализ параметров изменения показаний термопар при возникновении продольной трещины в процессе первичной кристаллизации слитка.

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ ИЗМЕНЕНИЯ ПОКАЗАНИЙ ТЕРМОПАР В МОМЕНТ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ПРОДОЛЬНЫХ ТРЕЩИН

В результате статистического анализа параметров изменения показаний термопар необходимо было выполнить две основные задачи:

1. Определить, какие параметры изменения показаний термопар могут достоверно указывать на процесс формирования продольной трещины в теле отливаемой заготовки в процессе её первичной кристаллизации.
2. Определить оптимальный диапазон (истории) N наблюдения за показаниями термопар, позволяющего, с одной стороны, с высокой достоверностью определить момент образования трещины, а с другой стороны, сгенерировать достоверный диагноз за минимально короткое время.

Для статистического анализа были выбраны параметры трёх типов.

К первому типу отнесены параметры, сигнализирующие о значительном отклонении показаний отдельных термодатчиков от показаний при стационарном (нормальном) ходе разливки. Это параметры, позволяющие выявить снижение показаний отдельных термопар. К ним, например, относятся:

- 1) снижение среднего (максимального, минимального) значения температуры в течение некоторого времени наблюдения;
- 2) изменение среднеквадратичного отклонения показаний термопар;
- 3) изменение наклона линии регрессии первого порядка, построенной по показаниям термопары, и т.п.

Ко второму типу отнесены параметры, сигнализирующие о значительном отклонении показаний термодатчиков от показаний остальных термодатчиков (фона). Данные параметры позволяют судить о локальном характере захлаживания области кристаллизатора. При статистическом анализе оценивались следующие параметры второго типа:

- 1) разница показаний термопары и среднего значения температуры в том же слое термопар.

2) разница наклона линии тренда показаний отдельной термопары и графика средней температуры по слою.

Для снижения влияния индивидуальных особенностей термопар на результат анализа к архивным данным применялась операция нормирования, заключающаяся во введении аддитивных составляющих в показания термопар, приводящих наиболее ранние показания к уровню среднего значения по слою.

К третьему типу отнесены параметры, сигнализирующие о значимом взаимозависимом изменении показаний термодатчиков одного столбца кристаллизатора (корреляционные параметры и комбинации параметров первых двух типов).

Расчёт параметров выполнялся следующим образом. В архивных данных определялся момент зарождения продольной трещины в теле отливаемой заготовки t_0 (рис. 3). Затем от этого момента формировались выборки показаний всех термопар объёмом $N_{до}$ отсчётов до момента t_0 и $N_{после}$ после момента t_0 . По этим выборкам рассчитывались параметры показаний термопар, например, среднее значений показаний термопары до момента образования трещины T_{CP} и после момента образования трещины T'_{CP} . Затем рассчитывались изменения анализируемого параметра около момента t_0 в абсолютных ($T_{CP} - T'_{CP}$) и относительных (T_{CP}/T'_{CP}) единицах. Подобные расчёты выполнялись для всех термопар, входящих в сечение кристаллизатора, а также для средних значений по слою термопар.

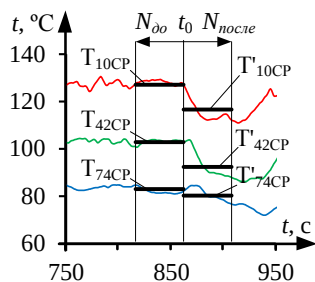


Рис. 3. Формирование массивов для расчёта параметров изменения показаний термопар

По результатам расчётов для шестнадцати случаев возникновения продольных трещин были построены диаграммы отклонений параметров, пример для которых для верхнего слоя термопар приведён на рис. 4. На верхнем графике рис. 4 чёрными точками обозначены изменения значений параметра T_{CP} для термопар верхнего слоя столбца ($\Delta T_{CP} = T_{CP} - T'_{CP}$), находящегося в области возникновения продольной трещины. Белыми точками обозначены средние значения изменения параметра по всем термопарам слоя (среднее значение величины $T_{CP} - T'_{CP}$ в слое, $\overline{\Delta T_{CP}}$). Чёрными сплошными линиями показаны максимальные и минимальные значения величины ΔT_{CP} в слое. Черными пунктирными линиями на графике обозначены границы доверительных интервалов наблюдения величины ΔT_{CP} , определённые по условию трёх стандартных отклонений. Аналогичные графические обозначения приняты на нижнем графике рис. 4 для относительных изменений параметра T_{CP} (т.е. для отношения $dT_{CP} = T_{CP}/T'_{CP}$).

С целью определения эффективности параметра по графикам рис. 4 было подсчитано количество экстремальных и достоверных отклонений параметра.

Под экстремальным отклонением параметра понимается случай, когда изменение анализируемого параметра для термопары, расположенной вблизи координат возникновения трещины, превышает (или меньше) изменений этого параметра для остальных термопар слоя, т.е. на графиках рис. 4 чёрная точка находится вне области между чёрными сплошными линиями.

Под достоверным отклонением параметра понималось изменение анализируемого параметра для термопары, расположенной вблизи координат возникновения трещины, выходящее за пределы доверительного интервала наблюдения, т.е. на графиках рис. 4 чёрная точка находится вне области между чёрными пунктирными линиями.

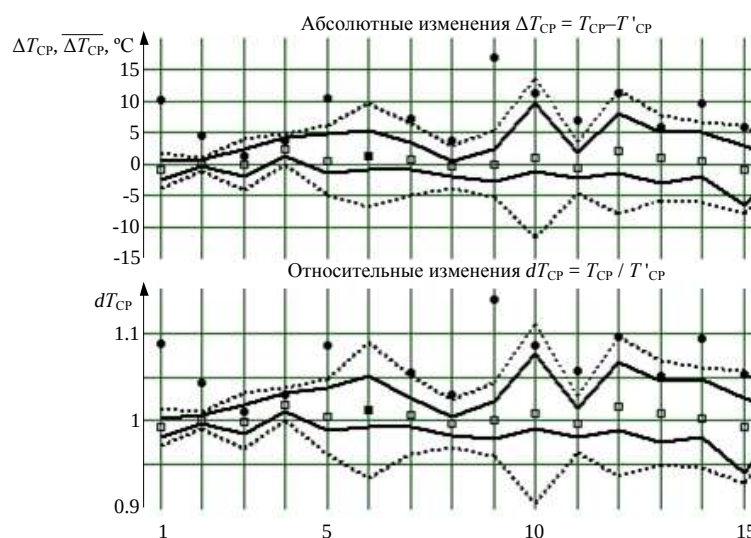


Рис. 4. Диаграммы отклонений параметра T_{CP}

Из рис. 4 следует, что для параметра T_{CP} из шестнадцати зафиксированных случаев возникновения продольной трещины в теле отливаемой заготовки в тринадцати случаях зафиксированы экстремальные отклонения параметра и в девяти – достоверные. Таким образом, экстремальное отклонение параметра T_{CP} может свидетельствовать о процессе возникновения продольной трещины в 81,25% случаев, а достоверное отклонение – в 56,25% случаев. Данное процентное соотношение названо наблюдаемостью. Высокая наблюдаемость параметра являлась основным критерием по включению параметра в алгоритм работы системы раннего детектирования продольных трещин.

Приведённая методика анализа применялась к тридцати двум различным параметрам изменения показаний термопар первого и второго типов. При этом все расчёты выполнены для нескольких диапазонов наблюдения $N_{до}$ и $N_{после}$: 15, 30, 60 и 90 с. Установлено, что наблюдаемость параметра T_{CP} при диапазоне $N = 15$ с составляет 70%, при $N = 30, 60$ и 90 с – 81,25%. Таким образом, увеличение диапазона наблюдения N более 30 с не приводит к более достоверному определению момента возникновения продольной трещины, а лишь увеличивает время генерации сигнала.

В результате для алгоритма раннего детектирования продольных трещин выбраны два параметра, показавшие в результате анализа наблюдаемость 96% на интервале $N = 30$ с. При этом в 72% случаев данные параметры позволяют детектировать появление продольной трещины в течение первых 15 с с момента её образования.

ВНЕДРЕНИЕ И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ СИСТЕМЫ РАННЕГО ДЕТЕКТОВАНИЯ ПРОДОЛЬНЫХ ТРЕЩИН

В результате обработки показаний термопар установлено, что технические характеристики существующей системы температурного контроля поверхности слитка в кристаллизаторе позволяют осуществлять детектирование продольных трещин. То есть для реализации системы раннего детектирования продольных трещин необходимо получить информацию от системы MMS. В этой системе используется программное обеспечение фирмы Beckhoff, архитектура которого подразумевает наличие ADS сервера для обмена информацией между полевым оборудованием и АСУ второго уровня. Таким образом, для получения необходимой информации в системе раннего детектирования продольных трещин было достаточно подключиться к серверу ADS. Кроме этого, из OPC сервера АСУ второго уровня в систему поступают дополнительные технологические параметры: скорость вытягивания заготовки и сечение отливаемой заготовки. Таким образом, технически система реализована в виде единственного промышленного компьютера, осуществляющего сбор и обработку информации, генерацию предупреждающего сигнала и визуализацию работы алгоритма на посту оператора МНЛЗ через дополнительный монитор.

Данная система была внедрена в опытно-промышленную на МНЛЗ №6 ОАО «ММК» в августе 2012 г. По результатам шести месяцев эксплуатации было установлено, что система детектирует 72% продольных трещин в теле отливаемой заготовки. Отсутствие предупреждающих сигналов в остальных 28% случаев вызваны следующими факторами: 1) имеют место продольные трещины, происхождение которых

не связано с процессом теплообмена поверхности слитка с поверхностями кристаллизатора, причиной возникновения подобных трещин является неудовлетворительное состояние (настройка) механического оборудования МНЛЗ-6 (выставка сегментов, конусность кристаллизатора и так далее), образование этих трещин происходит ниже расположения термопар, встроенных в кристаллизатор, и данным методом детектировать их образование невозможно; 2) часть трещин образуется в областях, расположенных между термопарами, и не отображается в показаниях датчиков.

Кроме этого, количество предупреждающих сигналов без образования трещины составляло, в среднем, 2,5 сигнала на плавку. Такое количество ложных сигналов было признано неудовлетворительным. Для повышения достоверности детектирования продольной трещины были проведены исследования по выявлению связи между химическим составом стали и склонностью её к трещинообразованию. В результате в алгоритм обработки показаний термопар было добавлено дополнительное условие на генерацию предупреждающего сигнала, зависящее от химического состава стали, полученного в результате лабораторного экспресс анализа. После внесения изменений в алгоритм работы системы в течение месяца эксплуатации был зафиксирован один предупреждающий сигнал без возникновения дефекта в отливаемой заготовке. Уточнение доверительных интервалов наблюдения остальных диагностических параметров с учётом условия анализа химического состава стали позволило повысить эффективность системы до 83% детектируемых продольных трещин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Производство стали. Том 4. Непрерывная разливка металла / Д.А. Дюдкин, В.В. Кисиленко, А.Н. Смирнов. М.: «Теплотехник», 2009. 528 с.
2. Смирнов А.Н., Куберский С.В., Штепан Е.В. Непрерывная разливка стали: учебник. Донецк: ДонГТУ, 2011. 482 с.

INFORMATION IN ENGLISH

DEVELOPMENT AND APPLICATION OF LONGITUDINAL CRACKS EARLY DETECTION SYSTEM FOR CONTINUOUS CAST SLABS

Pishnograev R.S., Suspitsin E.S., Shvidchenko D.V., Shvidchenko N.V., Apet A.A.

The OJSC "Magnitogorsk Iron & Steel Works" claims in its politics of quality management the continuous work aimed at improving the technology of steel production. The diagnostic systems that detect the technology process rejections and the product defects on early stages of progress are becoming more important since they make it possible to take corrective action in time and that way to increase the yield. One of those systems is the longitudinal cracks early detection system for continuous cast slabs developed and being used on the continuous caster No.6 of the OJSC "Magnitogorsk Iron & Steel Works". This article

contains information about the stages of the development of this system and practical results of its introduction.

REFERENCES

1. Dyudkin D.A., Kisilenko V.V., Smirnov A.N. *Proizvodstvo stali* [Steel production.]. Vol. 4. Continuous casting of metal. Moscow: "Heat engineer", 2009, 528 p.
2. Smirnov A.N., Kuberskiy S.V., Shtepan E.V.. *Nepreryvnaya razlivka stali* [Continuous casting of steel]. Textbook. Donetsk: DonGTU, 2011, 482 p.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Агапитов Евгений Борисович – д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой теплотехнических и энергетических систем, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия.

Андреев Сергей Михайлович – канд. техн. наук, зав. кафедрой автоматизированных систем управления, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия.

Апет Алексей Александрович – инженер ООО «ТехноМаг», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: apeta@gmail.com.

Ахметов Тимур Уралович – аспирант, инженер-электроник, ООО «Объединенная Сервисная Компания», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: Msrti@mail.ru.

Ахметова Айгуль Ураловна – студент, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия.

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

Гейко Геннадий Викторович – ст. преподаватель, аспирант, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», г. Харьков, Украина. E-mail: besitzer@i.ua.

Даниленко Кристина Вячеславовна – магистрант, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия.

Двойников Дмитрий Алексеевич – канд. техн. наук, ФГБН Институт машиноведения Уральского отделения РАН, », г. Екатеринбург, Россия. E-mail: dvoynikov@imach.uran.ru.

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

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

Зюзев Анатолий Михайлович – д-р техн. наук, с.н.с., профессор, ФГАОУ ВПО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия. E-mail: a.m.zyuzev@urfu.ru.

Конев Александр Александрович – студент кафедры электротехники и электрооборудования предприятий Уфимского государственного нефтяного технического университета, г. Уфа, Россия.

Конесев Сергей Геннадьевич – канд. техн. наук, доцент кафедры электротехники и электрооборудования предприятий Уфимского государственного нефтяного технического университета, г. Уфа, Россия. E-mail: KonesevSG@yandex.ru.

Леднов Роман Анатольевич – инженер по эксплуатации электрического оборудования ККЦ ОАО «ММК», г. Магнитогорск, Россия.

Мезенцев Николай Викторович – канд. техн. наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», г. Харьков, Украина.

Меньщикова Евгения Владимировна – магистрант, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия.

Мухаметшин Андрей Валерьевич – Аспирант кафедры электротехники и электрооборудования предприятий Уфимского государственного нефтяного технического университета, г. Уфа, Россия. E-mail: MukhametshinAV@yandex.ru.

Николаев Андрей Андреевич – мастер ЦЭСиП ОАО «ММК», г. Магнитогорск, Россия.

Николаев Николай Александрович – канд. техн. наук, начальник цеха электрических сетей и подстанций (ЦЭСиП) ОАО «ММК», г. Магнитогорск, Россия.

Омельченко Евгений Яковлевич – д-р техн. наук, проф. кафедры автоматизированного электропривода и мехатроники, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: momentum2@yandex.ru.

Парсункин Борис Николаевич – д-р техн. наук, проф. кафедры автоматизированных систем управления, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия.

Пишнограев Роман Сергеевич – кандидат технических наук, ведущий инженер ООО «ТехноМаг», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: r.s.pishnograev@gmail.com.

Сарваров Анвар Сабулханович – д-р техн. наук, проф. кафедры автоматизированного электропривода и мехатроники, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия.

Суспицын Евгений Сергеевич – кандидат технических наук, директор ООО «ТехноМаг», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: esuspitsin@gmail.com.

Тихонов Александр Васильевич – ассистент кафедры теплотехнических и энергетических систем, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: immortalis.animus@yandex.ru.

Шаяхметов Ильгиз Илдарович – магистр кафедры электротехники и электрооборудования предприятий Уфимского государственного нефтяного технического университета, г. Уфа, Россия.

Швидченко Дмитрий Владимирович – кандидат технических наук, заместитель директора ООО «ТехноМаг», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: schvidmit@gmail.com.

Швидченко Николай Владимирович – кандидат технических наук, инженер ООО «ТехноМаг», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: shvinikolaj@gmail.com.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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

Akhmetov Timur Uralovich – a post-graduate student, electronics engineer, "Joint Service Company", Magnitogorsk, Russia. E-mail: Msrti@mail.ru.

Akhmetova Aigul Uralovna – student of Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Andreev Sergey Mikhailovich – Ph.D. (Eng.), Head of the Department of Automated Control Systems, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Apet Aleksey Aleksandrovich – engineer, OJSC «TehnoMag», Magnitogorsk, Russia. E-mail: apeta@gmail.com.

Danilenko Kristina Vyacheslavovna – master's degree student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Dmitrienko Valerij Dmitrievich – D.Sc. (Eng.), Professor, National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute", Kharkov, Ukraine.

Dvoynikov Dmitry Alekseevich – Ph.D. (Eng.), FSBIS Ural Branch Of Russian Academy Of Sciences Institute Of Engineering Science, Yekaterinburg, Russia.

E-mail: dvoynikov@imach.uran.ru.

Gejko Gennadij Viktorovich – Assistant Professors, post-graduate student, National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute", Kharkov, Ukraine. E-mail: besitzer@i.ua.

Konev Aleksandr Aleksandrovich – Student, the Department of Electrical Engineering and Industrial Electrical Facilities, Ufa State Oil Technical University, Ufa, Russia.

Konesev Sergey Gennadievich – Ph.D. (Eng.), Associate Professor of the Department of Electrical Engineering and Industrial Electrical Facilities, Ufa State Oil Technical University, Ufa, Russia. E-mail: KonesevSG@yandex.ru.

Lednov Roman Anatoljevich – electrical facilities operation engineer of the Oxygen Converter Shop of the OJSC "MMK", Magnitogorsk, Russia.

Menshchikova Evgeniya Vladimirovna – master's degree student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Mezentsev Nickolaj Viktorovich – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute", Kharkov, Ukraine.

Mukhametshin Andrey Valerievich – post-graduate student, the Department of Electrical Engineering and Industrial Electrical Facilities, Ufa State Oil Technical University, Ufa, Russia.

E-mail: MukhametshinAV@yandex.ru.

Nikolaev Andrey Andreevich – foreman of Electrical networks and substations shop of the OJSC "MMK", Magnitogorsk, Russia.

Nikolaev Nikolay Alexandrovich – Ph.D. (Eng.), Head of Electrical networks and substations shop of the OJSC "MMK", Magnitogorsk, Russia.

Omelchenko Evgeniy Yakovlevich – D.Sc. (Eng.), Professor of Automated Electrical Drive and Mechatronics Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: momentum2@yandex.ru.

Parsunkin Boris Nikolayevich – D.Sc. (Eng.), Professor, the Department of Automated Control Systems, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Pishnograev Roman Sergeevich – Ph.D. (Eng.), leading engineer, OJSC «TehnoMag», Magnitogorsk, Russia. E-mail: r.s.pishnograev@gmail.com.

Sarvarov Anvar Sabulkhanovich – D.Sc. (Eng.), Professor of Automated Electrical Drive and Mechatronics Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Shayahmetov Ilgiz Ildarovich – Candidate for a master's degree, the Department of Electrical Engineering and Industrial Electrical

Facilities, Ufa State Oil Technical University, Ufa, Russia.

Shvidchenko Dmitriy Vladimirovich – Ph.D. (Eng.), deputy director, OJSC «TehnoMag», Magnitogorsk, Russia. E-mail: schvidmit@gmail.com.

Shvidchenko Nikolai Vladimirovich – Ph.D. (Eng.), engineer, OJSC «TehnoMag», Magnitogorsk, Russia. E-mail: shvinikolaj@gmail.com.

Suspitsin Evgeniy Sergeevich – Ph.D. (Eng.), director, OJSC «TehnoMag», Magnitogorsk, Russia. E-mail: esuspitsin@gmail.com.

Tikhonov Alexander Vasilyevich – teaching assistant of Heat and Electrical System Engineering Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

E-mail: immortalis.animus@yandex.ru.

Vasilyev Aleksandr Evgenievich – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Zakovorotnyj Aleksandr Juryevich – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, doctoral student, National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute", Kharkov, Ukraine.

E-mail: arcade@i.ua.

Zyuzev Anatoly Mikhailovich – D.Sc. (Engineering), senior staff scientist, Professor, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Professional Education "Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin", Yekaterinburg, Russia. E-mail: a.m.zyuzev@urfu.ru.