

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

ИЗДАЕТСЯ С ЯНВАРЯ 1996 Г.

№2(31), июнь 2016

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

Редакционный совет

Председатель редсовета:

С.И. Лукьянов – проф., д-р техн. наук, 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 – доц., д-р техн. наук, УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия;

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

Д.В. Чистяков – канд. социол. наук, исполнительный директор ЗАО «КонсОМ СКС».

Редакционная коллегия

Главный редактор:

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

Члены редакционной коллегии:

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

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

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

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

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

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

Ответственный редактор:

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

Технические редакторы:

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

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

© ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2016

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

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

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

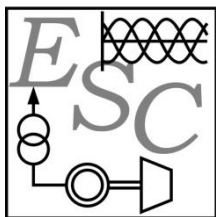
Адрес редакции:

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

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

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

Выход в свет 24.06.2016. Заказ 297. Тираж 500 экз. Цена свободная.



ELECTROTECHNICAL SYSTEMS AND COMPLEXES

PUBLISHED SINCE JAN., 1996

NO.2(31) JUNE, 2016

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

Editorial committee

Head of editorial committee:

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

Vice Chairman of editorial committee:

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

Members of Editorial committee:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

D.V. Chistyakov – Ph.D.(Sociology), chief executive «KonsOM SKS» JSC.

Editorial board

Editor-in-chief:

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

Editorial board members:

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

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

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

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

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

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

Executive editor:

V.R. Khrushin – Associate Professor, D.Sc. (Eng.), NMSTU, Magnitogorsk, Russia.

Typographers:

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

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

© FSBEI HE NMSTU, 2016

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

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

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

The publisher:

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

The Publishing House of Nosov Magnitogorsk State Technical University

e-mail: ecis.red@gmail.com

Printed by the NMSTU printing section,

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

Publication date: 24.06.2016. Order 297. Circulation: 500.

Open price.

СОДЕРЖАНИЕ

Теория и практика автоматизированного электропривода.....	4
<i>Мещеряков В.Н., Диденко Е.Е.</i> Метод идентификации температуры прокатываемой полосы в межклетевом промежутке чистовой группы стана горячей прокатки для коррекции управления электроприводом петледержателя.....	4
<i>Лукьянов С.И., Бодров Е.Э., Сафин И.Р., Мазитов Д.М.</i> Обеспечение требуемого качества глубины насечки на стальной арматуре электроприводом размоточного аппарата.....	9
<i>Шонин О.Б., Новожилов Н.Г., Крыльцов С.Б.</i> Наблюдатель частоты вращения ротора в скалярной системе управления асинхронным электроприводом	15
Электроэнергетика.....	20
<i>Ишметьев Е.Н., Чистяков Д.В., Панов А.Н., Гусей К.Е., Майорова Е.С.</i> Анализ скоростных режимов холодной прокатки стали в условиях стана 2000 ЛПЦ-11 ОАО «ММК» с целью минимизации потребления электроэнергии	20
<i>Баширов М.Г., Грибовский Г.Н., Галлямов Р.У., Гареев И.М., Хисматуллин А.С.</i> Рекомендации по повышению надежности электроснабжения промышленной площадки линейно-производственного управления магистральных газопроводов	23
Энерго- и ресурсосбережение	27
<i>Макаров А.Н., Кузнецов А.В.</i> Исследование влияния толщины слоя шлака и электромагнитного выдувания на КПД дуг в дуговых сталеплавильных печах.....	27
<i>Мугалимов Р.Г., Закирова Р.А., Мугалимова А.Р.</i> Энергоэффективные асинхронные двигатели, технико-экономические преимущества и оптимизация себестоимости их создания.....	30
Промышленная электроника, автоматика и системы управления	35
<i>Посохов И.А.</i> Визуализация и обработка информации о качестве непрерывнолитой заготовки.....	35
<i>Гаврилов Е.С., Якимов И.А., Фомин Н.В., Линьков С.А.</i> Мехатронная система паровой турбинной электростанции тушильной башни коксового цеха ОАО «ММК».....	44
<i>Кургузов С.А., Залетов Ю.Д., Косматов В.И., Гусева О.С., Шевцова И.Н.</i> Электролитно-плазменная очистка поверхности стального металлопроката	48
Мониторинг, контроль и диагностика электрооборудования.....	52
<i>Николаев А.А.</i> Внедрение системы мониторинга технического состояния трансформатора 80 МВА энергоблока ТЭЦ ОАО «ММК»	52
Сведения об авторах	58

CONTENT

Theory and practice of automated electric drive.....	4
<i>Mecheryakov V.N., Didenko E.E.</i> Method of strip temperature identification in the gap between two stand of finishing group of the hot rolling mill for adjustment of electric drive control of the looper	4
<i>Lukyanov S.I., Bodrov E.E., Safin I.R., Mazitov D.M.</i> Provision of required depths of notches on steel rebar by means of unwind machine electric drive	9
<i>Shonin O.B., Novozhilov N.G., Kryltsov S.B.</i> Observer of rotor speed in scalar control induction motor drive. 15	15
Power engineering.....	20
<i>Ishmetiev E.N., Chistyakov D.V., Panov A.N., Gusev K.E., Mayorova E.S.</i> Analysis of high-speed modes of steel cold rolling to minimize power consumption in workshop no.11 at OJSC «Magnitogorsk Iron and Steel Works»	20
<i>Bashirov M.G., Gribovsky G.N., Gallyamov R.U., Gareev I.M., Khismatullin A.S.</i> Recommendations for improving the reliability of electricity supply at industrial site of linear pipe operation	23
Energy- and resources-economy	27
<i>Makarov A.N., Kuznetsov A.V.</i> Research of the effect of slag layer depth and electromagnetic blowing on arc efficiency in arc steel melting furnaces	27
<i>Mugalimov R.G., Zakirova R.A., Mugalimova A.R.</i> Energy efficient asynchronous motors, their technical and economic advantages and cost optimization of their development	30
Power electronics, automation and control systems....	35
<i>Posokhov I.A.</i> Visualization and processing of data on the quality of continuous cast billet.....	35
<i>Gavrilov E.S., Yakimov I.A., Fomin N.V., Linkov S.A.</i> Mechatronic system of steam turbine power plant of quenching tower at OJSC "MMK" coke plant.....	44
<i>Kurguzov S.A., Zaletov Y.D., Kosmatov V.I., Guseva O.S., Shevtsova I.N.</i> Electrolytic and plasma cleaning of the surface of steel rolled metal product	48
Monitoring, diagnostics and control of electric equipment	52
<i>Nikolaev A.A.</i> Introduction of technical state monitoring system for 80 MVA transformer of power unit of chp at OJSC «MMK»	52
Information about the authors.....	58

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

УДК 621.313.333

Мещеряков В.Н., Диденко Е.Е.

ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет»

**МЕТОД ИДЕНТИФИКАЦИИ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРОКАТЫВАЕМОЙ ПОЛОСЫ
В МЕЖКЛЕТЕВОМ ПРОМЕЖУТКЕ ЧИСТОВОЙ ГРУППЫ СТАНА ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ
ДЛЯ КОРРЕКЦИИ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ПЕТЛЕДЕРЖАТЕЛЯ**

В статье приводится метод косвенного определения температуры прокатываемой полосы в первом межклетевом промежутке чистовой группы стана горячей прокатки для точного определения момента нагрузки и расчёта вращающего момента, развиваемого электроприводом петледержателя.

Ключевые слова: система автоматического регулирования натяжения, петледержатель, натяжение полосы, температура полосы.

ВВЕДЕНИЕ

Для эффективной работы системы регулирования натяжения полосы (САРН) чистовой группы стана горячей прокатки (особенно это касается САРН, построенных по косвенному принципу) необходимо как можно точнее определить момент нагрузки, действующий на вал петлерегулирующего устройства (петледержателя) со стороны прокатываемой полосы и, соответственно, как можно точнее рассчитать и сформировать крутящий момент электропривода петледержателя [1,2].

На вал петледержателя при прокатке действует момент нагрузки, определяемый выражением [3-5]:

$$M_{\text{нагр.}} = M_{\text{неур.}} + M_{\text{вес}} + M_{\text{нат.}} + M_{\text{изг.}}, \quad (1)$$

где $M'_{\text{неур.}}$ - момент от неуравновешанных частей при горизонтальном положении петледержателя; $M_{\text{вес}}$ - момент нагрузки на валу петледержателя от веса полосы; $M_{\text{нат.}}$ - момент нагрузки на валу петледержателя от натяжения; $M_{\text{изг.}}$ - момент нагрузки на валу петледержателя от изгиба. Все составляющие (1) являются функциями угла поворота рамы петледержателя.

Соотношение величин, составляющих общий момент нагрузки, не является константой и зависит от ряда факторов, в частности от толщины прокатываемой полосы, т.е. фактически от номера межклетевого промежутка чистовой группы. Рассмотрим соотношение $M_{\text{нат.}}$ и $M_{\text{изг.}}$. Например, для первого межклетевого промежутка толщина полосы значительна (более 20 мм для большинства отечественных станов горячей прокатки), межклетевые натяжения достаточно малы. При таких параметрах, например, отношение $M_{\text{нат.}}/M_{\text{изг.}}$ значительно меньше 1 [6]. Составляющая $M_{\text{изг.}}$ гораздо больше $M_{\text{нат.}}$. В то же время для последних промежутков чистовой группы соотношение меняется и $M_{\text{нат.}}$ становится больше $M_{\text{изг.}}$. Тем не менее для первого межклетевого промежутка величина $M_{\text{изг.}}$ является значительной и оказывает существенное влияние на общий момент нагрузки. Значение $M_{\text{изг.}}$ определяют выражением

$$M_{\text{изг.}} = 2B\sigma_s H_{i,i+1}^2 R \cos \alpha / L_{i,i+1}, \quad (2)$$

где σ_s - предел текучести прокатываемого металла; $H_{i,i+1}$ - толщина металла в межклетевом промежутке; B - ширина полосы металла; R - радиус рычага петледержателя; $L_{i,i+1}$ - длина межклетевого промежутка; α - угол подъёма петледержателя [1,2,10].

В данном выражении величины R , $L_{i,i+1}$ являются постоянными, B - условно постоянной [1-4]. Фактическая величина $H_{i,i+1}$ при прокатке может меняться, например, при работе нажимных устройств клеток. Угол подъёма также меняется при реакции петледержателя на различного рода возмущения, происходящие в электромеханической системе межклетевого промежутка и вызывающие, например, изменение секундных объёмов прокатываемой полосы при работе нажимных устройств. Рассмотрим, однако, выражение (2) с точки зрения зависимости величины $M_{\text{изг.}}$ от предела текучести σ_s .

Величину σ_s практически во всех САРН принимают в расчётах как постоянную величину. Тем не менее для расчёта предела текучести имеется следующее выражение [7]:

$$\sigma_s = \frac{A}{e^{m_1 T^\circ}}, \quad (3)$$

где T° - температура прокатываемого металла, °C; A , m_1 - эмпирически определяемые коэффициенты, индивидуальные для каждого металла (находятся по таблицам [7]). Из выражения (3) видно, что предел текучести прокатываемой полосы является функцией её температуры.

В то же время перепад температуры полосы от «головы», выходящей из черновой группы полосы к «хвосту», в ряде случаев может достигать значительных величин [11-14]. Достаточно типичные примеры графиков температуры подката за 5 клетью для стана горячей прокатки показаны на рис. 1. Также известно, что в зависимости от времени прокатки перепад температуры на входе в чистовую группу от переднего до хвостового конца полосы может изменяться от 45-50°C

для полос конечной толщиной 10-12 мм до 200-220°C для полос конечной толщиной 1,2-1,5 мм [8,9]. «Голова» полосы, как правило, имеет более высокую температуру. Можно утверждать, что температура полосы в первом промежутке также будет неодинакова по длине.

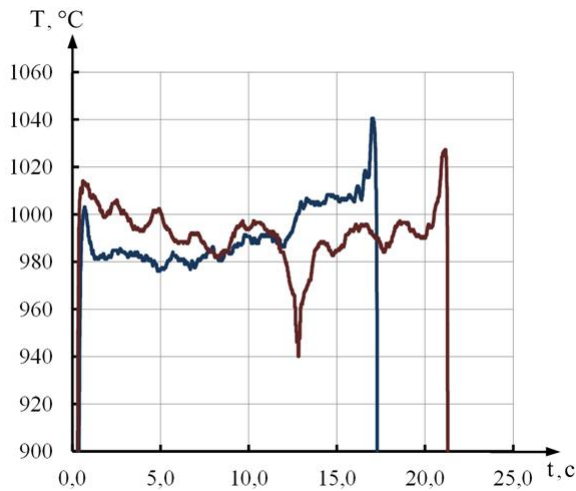


Рис. 1. Примеры температур подкатов за 5 клетью стана горячей прокатки

Неравномерность температуры полосы по длине при входе в чистовую группу определяется рядом факторов. К таковым относится разное время нахождения разных сечений полосы на промежуточном рольганге (и соответственно разное время охлаждения), неравномерность нагрева сляба в методических печах, наличие окалины [7,12]. Кроме того, на равномерность нагрева подката к чистовой группе влияет наличие «глиссажных меток». В случае прокатки металла в чистовой группе с ускорением «температурный клин» от промежутка к промежутку сглаживается и при определённых ускорениях может стать отрицательным (т.е. «хвост» полосы может стать горячее «головы»). Тем не менее если рассматривать первый межклетевой промежуток, то «температурный клин» ярко выражен и перепад температуры может достигать 85°C [7-9].

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Из выражений (1)-(3) видно, что т.к. от температуры прокатываемой полосы зависит составляющая $M_{изз}$, то соответственно и общий момент нагрузки на вал петледержателя. Если САРН в оценке момента нагрузки и при расчёте момента, развиваемого электроприводом петледержателя, будет исходить из постоянной величины предела текучести полосы в промежутке, то естественно, что изменяющаяся по длине температура металла будет негативно сказываться на работе системы, т.к. расчётный момент, развиваемый электроприводом петледержателя, не будет соответствовать фактическому, и петледержатель будет отклоняться в ту или иную сторону. При этом САРН данную ситуацию будет воспринимать, как изменение секундных объёмов полосы и будет пытаться регулировать натяжение полосы (хотя в данной ситуации изменения натяжения не происходит), выдавая коррекцию задания на скорость в смежные электроприводы клетей. Естественно, это будет ошибкой в работе САРН.

Очевидно, что для использования температуры

прокатываемой полосы в расчёте момента электропривода петледержателя для повышения эффективности работы САРН требуется её точное определение.

Рассмотрим идентификацию температуры полосы прокатываемого металла в первом межклетевом промежутке. Для этого используем стан горячей прокатки, состоящий из 5 черновых и 8 чистовых клетей, включая чистовой окатиноломатель. Перед 6 клетью располагается гидросбив окалины. Температура подката в чистовую группу определяется пирометром, расположенным за 5 клетью черновой группы (рис. 2). На отечественных станах горячей прокатки, в частности на стане 2000 ПГП ПАО «НЛМК», датчик температуры подката стоит только в указанном месте. Измерение температуры непосредственно перед чистовой группой, а тем более в межклетевых промежутках, широко распространёнными типами инфракрасных датчиков не представляется возможным из-за крайне агрессивной окружающей среды с наличием плотного пара (особенно в зимний период), брызг и потоков воды и т.д. Поэтому для определения «прогнозируемой» температуры полосы, в частности в первом межклетевом промежутке, предлагается использовать методику, изложенную в работе [7]. Данная методика применяется для оценки температуры в межклетевых промежутках чистовой группы и управления работой системы межклетевого охлаждения полосы и системы начальной настройки для расчёта заправочных скоростей, ускорения при прокатке с ускорением и т.д. Согласно предлагаемой методике конечная температура полосы после первой клетки чистовой группы (клеть №6) будет рассчитываться по формуле [7]

$$T_j = T_{j-1} - \Delta T_j^{ик} - \Delta T_j^{вл} + \Delta T_j^д - \Delta T_j^{гс}, \quad (4)$$

где T_j – температура металла после первой клетки чистовой группы; T_{j-1} – температура металла после последней клетки черновой группы (клеть №5 стана горячей прокатки), измеряемая датчиком температуры; $\Delta T_j^{ик}$ – потеря тепла от излучения и конвекции на пути полосы от 5 клетки до 6 (в основном на промежуточном рольганге); $\Delta T_j^{вл}$ – потеря тепла при контакте металла с валками при прокатке в 6 клетки (теплоотдача валкам); $\Delta T_j^д$ – нагрев полосы при прокатке – приращение температуры вследствие поглощения энергии деформации; $\Delta T_j^{гс}$ – потеря тепла от работы гидросбива перед 6 клетью.

Определение $\Delta T_j^{ик}$. Сначала находят температуру металла после охлаждения путём излучения по выражению

$$T_j^и = \frac{1000}{\sqrt[3]{\left(\frac{1000}{T_{j-1} + 273}\right)^3 + C_0 \cdot \frac{t_0}{h}}} - 273, \quad (5)$$

где T_{j-1} – температура металла после последней клетки черновой группы (клеть №5 стана горячей прокатки), измеряемая датчиком температуры; $C_0 = 0,055 \cdot 10^{-9}$ (мм/(K³·с)) – теплофизический коэффициент; t_0 – время охлаждения металла в ожидании прокатки.

Тогда падение температуры полосы вследствие

теплопотерь излучением

$$\Delta T_j^{\text{из}} = T_{j-1} - \sqrt[3]{\left(\frac{1000}{T_{j-1} + 273}\right)^3 + C_0 \cdot \frac{t_0}{h}} + 273. (6)$$

Теплоотдача металла окружающему воздуху конвекцией в начале прокатки при высокой температуре и малых скоростях очень мала. Считают, что она составляет 5-10% от потерь тепла излучением и учитывают введением поправки в падение температуры при лучистом теплообмене, используя для оценки совместного влияния излучения и конвекции формулу

$$\Delta T_j^{\text{ик}} = (1,05...1,07) \cdot \Delta T_j^{\text{из}}. (7)$$

Для расчёта приращения температуры полосы вследствие поглощения энергии деформации $\Delta T^{\text{д}}$ используем его прямую связь с расходом энергии на собственно прокатку:

$$\Delta T_j^{\text{д}} = 4,76 \cdot w_{\text{прj}}, (8)$$

где $w_{\text{прj}}$ – удельный расход энергии на прокатку (кВт·ч/т) в 6 клети (первая клетка чистовой группы).

Удельный расход энергии на прокатку будем вычислять по формуле (для полос толщиной свыше 1 мм)

$$w_{\text{прj}} = 24 \cdot k_w \cdot \ln(\ln h_{\text{п}} / \ln h_{\text{к}}), (9)$$

где k_w – поправочный коэффициент на марку стали.

Для определения теплоотдачи валкам $\Delta T^{\text{вл}}$ используем формулу

$$\Delta T_j^{\text{вл}} = 0,218 \cdot \frac{T_{j-1} - \Delta T_j^{\text{ик}} - T_j^{\text{вл}}}{h_{j-1} + h_j} \times \sqrt{\frac{l_{\text{сж}}}{v_j \cdot (1 + h_j/h_{j-1})}}, (10)$$

где $T_{j-1} - \Delta T_j^{\text{ик}}$ – температура металла в начале охлаждения, °С; $T_j^{\text{вл}}$ – температура вала, °С; $l_{\text{сж}}$ – сплюснутая дуга контакта, мм; h_j, h_{j-1} – толщина полосы до и после обжатия в клети, мм; v_j – скорость полосы, м/с.

$$l_{\text{сж}} = x_j + \sqrt{R \cdot \Delta h_j + x_j^2}, (11)$$

где R – несплюснутый радиус рабочих валков; x_j – протяжённость очага деформации за линию центров валков; Δh_j – абсолютное обжатие в клети.

При горячей прокатке сплюсывание валков имеет пренебрежимо малый эффект, особенно при прокатке крупных сечений, поэтому принимаем $x_j = 0$.

Влияние гидросбива окалина учитывается формулой И. Шварцера

$$\Delta T_j^{\text{гс}} = \frac{0,73 \cdot T}{h \cdot (1 + v)}, (12)$$

где T, h и v – температура, толщина и скорость полосы в зоне гидросбива соответственно, °С, мм и м/с.

На рис. 3 приведен пример функциональной схемы САРН для одного межклетового промежутка. В соответствии с данной схемой электропривод петледержателя развивает момент, определяемый заданием на ток I^* . В свою очередь, величина I^* обрабатывается блоком ограничения с регулируемым значением ограничения, которые определяются рассчитанной по формуле (1) величиной момента (в формате задания на ток). Поскольку система построена так, что регулятор позиции выдаёт сразу после заполнения полосой межклетового промежутка максимальное задание на ток, то фактически электропривод отрабатывает ограниченное значение $I_{\text{огр}}^*$, которое и определяется математическим расчётом (БРМ-блок расчёта момента) в соответствии с выражением (1).

Для повышения точности расчёта момента, учитывая температуру прокатываемой полосы, необходимо в БРМ учесть выражения (3)-(12). При этом БРМ необходимо обеспечить данными с пирометра за последней клетью черновой группы, необходимыми константами, участвующими в расчётах по вышеприведённым выражениям, значениями скорости полосы после окалиноломателя (в зоне гидросбива), значениями толщины подката и после обжатия в первой клети чистовой группы и др. В случае построения САРН на основе программируемых логических контроллеров и при интегрировании в АСУТП чистовой группы стана горячей прокатки указанные данные можно получить в САРН из смежных подсистем, например из системы начальной настройки стана.

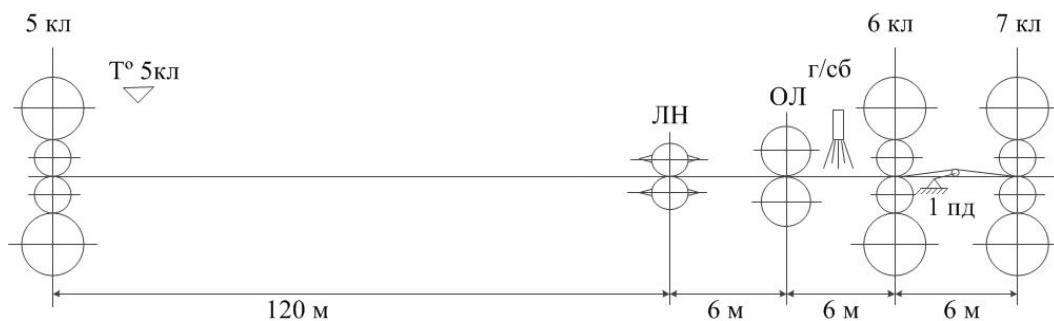


Рис. 2. Участок промежуточного рольганга непрерывного стана горячей прокатки

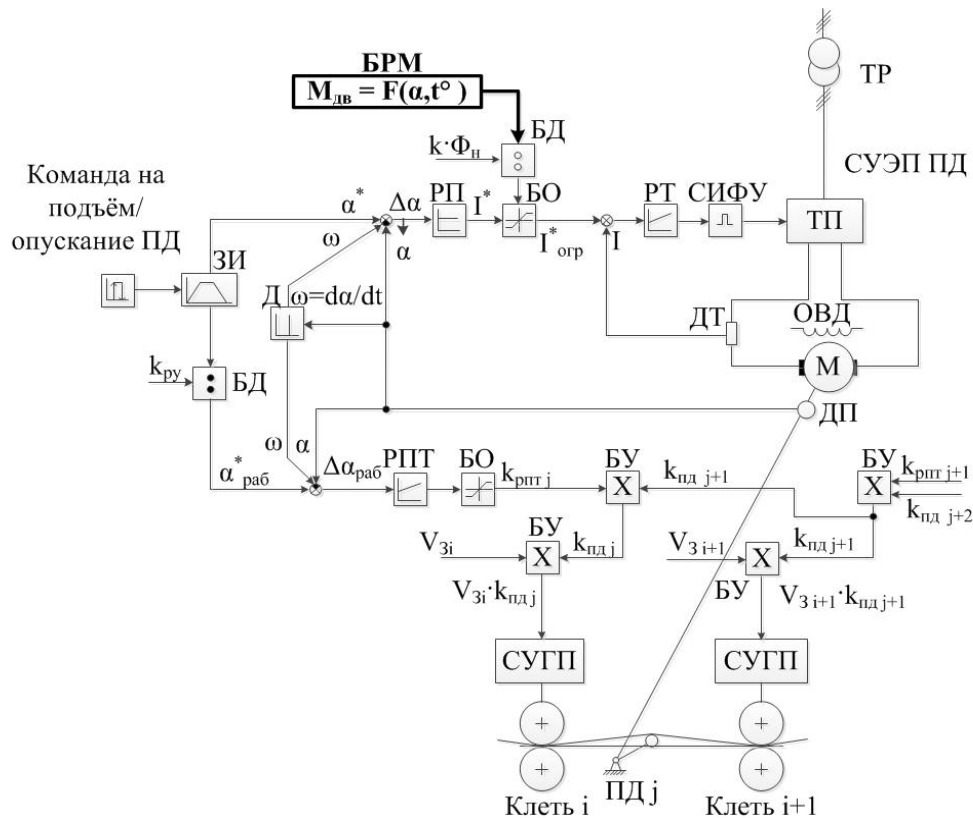


Рис. 3. Функциональная схема и САРН для одного межклетевого промежутка с коррекцией момента электропривода петледержателя по температуре полосы

На рис. 3 СУГП, СУЭП ПД – системы управления главными приводом петледержателя; М – электродвигатель; БУ – блок умножения; Д – дифференциальное звено; БО – блок ограничения; ДП, ДТ – датчики положения и тока; РП, РПТ – регулятор позиции петледержателя и регулятор петли; БД – блок деления; ЗИ – задатчик интенсивности; $k_{рпт}$ – выходной сигнал регулятора петли; $k_{пд}$ – результирующий сигнал коррекции скорости клетки i , при этом $k_{пдj} = k_{рптj} \cdot k_{пдj+1}$; V_{zi} – сигнал задания на скорость главного электропривода клетки; α – фактический угол поворота рамы петледержателя; α^* – задание на максимальный угол; $\alpha_{раб}^*$ – задание на рабочий угол петледержателя; $k_{ру}$ – коэффициент рабочего угла; ω – угловая скорость петледержателя; $\Delta\alpha = \alpha^* - \alpha - \omega$; $\Delta\alpha_{раб} = \alpha_{раб}^* - \alpha - \omega$; I^* – выходной сигнал регулятора позиции петледержателя; $I_{огр}^*$ – задание на ток электропривода петледержателя, рассчитанное как $I_{огр}^* = M_{дв} / k_{\Phi_n} = F(\alpha, t^o) / k_{\Phi_n}$. БРМ – блок расчёта момента электродвигателя петледержателя как $M_{дв} = F(\alpha, t^o)$ – расчёт, соответствующий выражению (1), но с учётом в расчёте $M_{изг}$ по формуле (2) температуры полосы при соответствующем расчёте σ_s в соответствии с выражениями (3)–(12).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для повышения точности расчёта момента электропривода петледержателя в первом межклетевом промежутке чистовой группы стана горячей прокатки рассмотрена методика косвенного определения температуры прокатываемой полосы. Предложена функциональная схема САРН для одного межклетевого промежутка с коррекцией момента электропривода петледержателя по температуре полосы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Система автоматического регулирования натяжения и петли с перекрестными связями для широкополосного стана горячей прокатки / А.С. Карандаев, С.А. Евдокимов, А.А. Чертоусов, В.Р. Храмшин // Изв. вузов. Электромеханика. 2004. №2. С. 21–27.
2. Храмшин В.Р. Разработка электротехнических систем непрерывной группы стана горячей прокатки при расширении сортамента полос: дисс. ... д-ра техн. наук; Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова. Магнитогорск, 2013. 393 с.
3. Стефанович В.Л. Автоматизация непрерывных и полунепрерывных широкополосных станов горячей прокатки. М.: Металлургия, 1975. 208 с.
4. Дружинин Н.Н. Непрерывные станы как объект автоматизации. М.: Металлургия, 1975. 336 с.
5. Математическая модель взаимосвязанных электротехнических систем непрерывной группы широкополосного стана / В.Р. Храмшин, А.С. Карандаев, И.Ю. Андрушин, А.Н. Гостев // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2013. №1. С.12–21.
6. Фомин Г.Г., Дубейковский А.В., Гринчук П.С. Механизация и автоматизация широкополосных станов горячей прокатки. М.: Металлургия, 1979. 232 с.
7. Зайцев В.С., Третьяков В.А. Проектирование параметров и режимов работы оборудования листопрокатных цехов: учеб. пособие. Липецк: ЛГТУ, 2009. 660 с.
8. Мешеряков В.Н., Диденко Е.Е. Влияние температуры подката чистовой группы стана горячей прокатки на работу электропривода петледержателя. // Электротехнические системы и комплексы. 2012. №20. С.41–52.
9. Мешеряков В.Н., Диденко Е.Е. Влияние температуры полосы в чистовой группе стана горячей прокатки на момент нагрузки электроприводов петледержателей // IX Международная научно-практическая конференции «Техника и технология: новые перспективы развития». - 2013. С. 16–21.

10. Мещеряков В.Н., Диденко Е.Е. Математическое описание сил и моментов нагрузки петледержателя // Электротехнические комплексы и системы. 2010. С. 18-23.
11. Khrumshin V.R. Study of Thickness Control of Strip Head Section Using Mathematical Simulation Methods / V.R. Khrumshin, A.S. Karandaev, A.A. Radionov, R.R. Khrumshin // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия Энергетика. Вып. 13. 2013. №1. С. 144–153.
12. Shilyaev P.V., Andryushin I.Yu., Golovin V.V., Radionov A.A., Karandaev A.S., Khrumshin V.R. Algorithms of a Digital Automatic System for Tension and Loop Control in a Wide_Strip Hot_Rolling Mill // Russian Electrical Engineering. 2013, vol.84, no.10, pp. 533–541. doi: 10.3103/S106837121310009X.
13. Radionov A.A., Karandaev A.S., Khrumshin V.R., Andryushin I.Yu., Gostev A.N. Speed and Load Modes of Rolling Hollow Billet at the Wide-Strip Rolling Mill. Proceedings of 2014 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS). 2014. 5 p. doi:10.1109/MEACS.2014.6986841.
14. Согласование скоростей взаимосвязанных электроприводов клетей черновой группы прокатного стана / А.С. Карандаев, В.Р. Храмшин, А.А. Радионов, И.Ю. Андрияшин, В.В. Галкин, А.Н. Гостев // VII Междунар. (XVII Всерос.) науч.-техн. конф. по автоматизированному электроприводу (АЭП-2012): сб. тр. Иваново: ИГЭУ, 2012. С. 652-657.

INFORMATION IN ENGLISH

METHOD OF STRIP TEMPERATURE IDENTIFICATION IN THE GAP BETWEEN TWO STAND OF FINISHING GROUP OF THE HOT ROLLING MILL FOR ADJUSTMENT OF ELECTRIC DRIVE CONTROL OF THE LOOPER

Mecheryakov V.N., Didenko E.E.

The article describes the method of indirect determination of temperature of the strip in the first gap of the finishing group of a hot rolling mill for accurate definition of loading torque and calculation of the torque of the looper electric drive.

Keywords: System of automatic tension control, looper, strip tension, loop regulator, strip temperature.

REFERENCES

1. Karandaev A.S., Evdokimov S.A., Chertousov A.A., Khrumshin V.R. Sistema avtomaticheskogo regulirovaniya natyazheniya i petli s perekryestnymi svyazami dlya shirokopolosnogo stana goryachey prokatki [Automatic System of Tension Control and Loops with Cross Couplings for Wide Strip Hot Rolling Mill]. *Proceedings of universities. Electrical engineering*. 2004, no.2, pp. 21-27.
2. Khrumshin V.R. *Razrabotka elektrotekhnicheskikh sistem nepreryvnoy gruppy stana goryachey prokatki pri rasshirenii sortamenta polos* [Development of Electrotechnical Systems of Continuous Group of Hot Rolling Mill to Extend the Product Range]: D.Sc. thesis in engineering. Novosibirsk State Technical University. Novosibirsk, 2013. 393 p.
3. Stefanovich V.L. *Avtomatizatsiya nepreryvnykh i poluneprieryvnykh shirokopolosnykh stanov goryachey prokatki* [Automation of Continuous and Semi-continuous Wide Strip Hot Rolling Mills]. Moscow: Metallurgy, 1975. 208 p.
4. Druzhinin N.N. *Neprieryvnye stany kak obyekty avtomatizatsii* [Continuous Rolling Mills as Automation Objects]. Moscow: Metallurgy, 1975. 336 p.
5. Khrumshin V.R., Karandaev A.S., Andryushin I.Yu., Gostev A.N. Matematicheskaya model vzaimosvyazannykh elektrotekhnicheskikh sistem nepreryvnoy gruppy shirokopolosnogo stana [Mathematical Model of Interrelated Electrotechnical Systems of Continuous Train of Wide Strip Mill]. *Machine-building: network electronic scientific journal*. 2013, no.1, pp.12-21.
6. Fomin G.G., Dubeykovskiy A.V., Grinchuk P.S. *Mekhanizatsiya i avtomatizatsiya shirokopolosnykh stanov goryachey prokatki* [Mechanization and Automation of Wide Strip Rolling Mills]. Moscow: Metallurgy, 1979. 232 p.
7. Zaytsev V.S., Tretyakov V.A. *Proektirovaniye parametrov i rezhimov raboty oborudovaniya listoprokatnykh tsekhov* [Parameter Planning and Design of Operating Modes of Facilities for Strip Rolling Mills]. Training manual. Lipetsk: LGTU, 2009. 660 p.
8. Mescheryakov V.N., Didenko E.E. Vliyanie temperatury podkata chistovoy gruppy stana goryachey prokatki na raboty elektroprivoda petlederzhatelya [Influence of Semi-finished Rolled Stock Temperature in Finishing Train of Hot Rolling Mill on the Operation of Looper Electric Drive]. *Electrotechnical systems and complexes*. 2012, no.20, pp.41-52.
9. Mescheryakov V.N., Didenko E.E. Vliyanie temperatury polosy v chistovoy grupe stana goryachey prokatki na moment nagruzki elektroprivodov petlederzhatelya [Influence of Strip Temperature in Finishing Train of Hot Rolling Mill on Torque of Looper Electric Drives]. *IX International scientific conference "Engineering and technology: new development trends"*. 2013, pp. 16-21.
10. Mescheryakov V.N., Didenko E.E. Matematicheskoe opisanie sil i momentov nagruzki petlederzhatelya [Mathematical Description of Forces and Torques of Looper Loads]. *Electrotechnical complexes and systems*. 2010, no.4. pp.18-23.
11. Khrumshin V.R., Karandaev A.S., Radionov A.A., Khrumshin R.R. Study of Thickness Control of Strip Head Section Using Mathematical Simulation Methods. *Bulletin of the South Ural State University, Series "Power Engineering"*. 2013, vol.13, no.1, pp.144–153.
12. Shilyaev P.V., Andryushin I.Yu., Golovin V.V., Radionov A.A., Karandaev A.S., Khrumshin V.R. Algorithms of a Digital Automatic System for Tension and Loop Control in a Wide_Strip Hot_Rolling Mill. *Russian Electrical Engineering*. 2013, vol.84, no.10. pp. 533–541. doi: 10.3103/S106837121310009X.
13. Radionov A.A., Karandaev A.S., Khrumshin V.R., Andryushin I.Yu., Gostev A.N. Speed and Load Modes of Rolling Hollow Billet at the Wide-Strip Rolling Mill. *Proceedings of 2014 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS)*. 2014. 5 p. DOI 10.1109/MEACS.2014.6986841.
14. Karandaev A.S., Khrumshin V.R., Radionov A.A., Andryushin I.Yu., Galkin V.V., Gostev A.N. Soglasovanie skorostey vzaimosvyazannykh elektroprivodov kletей черновой группы прокатного стана [Coordination of Speeds in Interrelated Electric Drives of Rolling Stands in Roughing Train of Rolling Mill]. *VII International (XVII All-Russian) scientific conference on automatic electric drive (AEP-2012): collection of scientific papers*. Ivanovo: IGEU, 2012, pp.652 – 657.

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТРЕБУЕМОГО КАЧЕСТВА ГЛУБИНЫ НАСЕЧКИ НА СТАЛЬНОЙ АРМАТУРЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ РАЗМОТОЧНОГО АППАРАТА

В работе приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований влияния параметров работы электроприводов стана по производству высокопрочной арматуры на глубину насечки. Показано, что существующая на действующих станах система управления электроприводами агрегатов не обеспечивает требуемые параметры глубины насечки. На основании моделирования натяжения в проволоке, создаваемого электроприводами стана, и статистической обработки показателей глубины насечки получены следующие научные результаты: доказана тесная корреляционная связь между изменением величины момента торможения электродвигателя размоточного аппарата и параметрами глубины насечки на арматуре; определены допустимые интервалы изменения натяжения на входе в клеть профилирования; предложена методика целесообразного изменения момента торможения электродвигателя размоточного аппарата для стабилизации натяжения в проволоке на входе в клеть профилирования при изменении радиуса заполнения катушки проволокой; определены дополнительные технологические требования к электроприводу стана; получены эмпирические выражения требуемого изменения момента электродвигателя размоточного аппарата. По итогам промышленной апробации разработанных технических решений получено снижение доли несоответствующей арматуры диаметром 5 мм с 7,2 до 1,1 % и арматуры диаметром 9,8 мм с 5,8 до 0 %.

Ключевые слова: высокопрочная арматура, глубина насечки, система управления, стан, электропривод размоточного аппарата.

ВВЕДЕНИЕ

Арматурный прокат для железобетонных конструкций, получаемый способом холодной деформации на станах по производству арматуры (СПА) типа ISF 5, является одним из самых массовых видов продукции черной металлургии в Российской Федерации. Технология производства высокопрочной стабилизированной арматуры, оборудование и системы управления электроприводами отдельных агрегатов СПА постоянно совершенствуются в направлении повышения качества продукции, производительности станов и снижения себестоимости арматуры. Однако, по данным служб контроля качества часть арматуры, предназначенной для изготовления ответственных изделий, например железобетонных шпал, переназначается для изготовления менее ответственных железобетонных изделий по причине несоответствия глубины насечки требуемым технологическими картами параметрам. Потери заявленного производства могут достигать пяти и более процентов от общего объема производства [1-2].

Анализ применяемых на СПА систем управления электроприводами показал, что они обеспечивают собственно технологию, безопасность и безаварийность процесса производства арматуры. Технологические требования и технические решения по обеспечению средствами автоматизированного электропривода требуемых показателей глубины насечки отсутствуют. Из технической литературы известно, что электропривод непрерывных проволочных станов может существенно влиять на геометрические размеры обрабатываемой проволоки. Исследования же о влиянии электроприводов СПА на показатели глубины насечки отсутствуют. Поэтому появилась необходимость проведения исследований и разработок, направленных на совершенствование существующих систем управления электропри-

водами СПА, обеспечивающих при безусловном выполнении известных технологических требований уменьшение доли арматуры, подлежащей переназначению по причине несоответствия глубины насечки требуемым параметрам [3-5].

Типовым исполнением конструкции стана с размещением операций нанесения насечки и стабилизации механических свойств в одном технологическом процессе и его основного оборудования является стан Mario Frigerio ISF 5, установленный в ОАО «ММК-МЕТИЗ» [6].

В рабочем режиме работы стана проволоку последовательно (**рис. 1**) сматывают и разгибают в размоточном аппарате (РА) 1; выпрямляют в роликовом правильном устройстве (РПУ) 2; протягивают через клеть профилирования (КП) 3, в которой осуществляют нанесение насечки на проволоку; с помощью первой группы кабестанов 6, 7 арматуру дополнительно выпрямляют в роликовом рихтовальном устройстве 4 и промывают водой в ванне 5; с помощью второй группы кабестанов 10, 11 арматуру нагревают в индукционной печи 8 и охлаждают в ванне 9 с целью формирования в металле требуемых механических свойств; с помощью подающих роликов 12 через отрезную станцию 13 арматуру (диаметром от 3 до 8 мм) сматывают в бунты на намоточных аппаратах 14 либо (диаметром более 8 мм) с помощью подающих роликов 15 режут на мерные прутки на отрезном станке 16. На СПА ISF 5 ОАО «ММК-МЕТИЗ» производят арматуру диаметром $d_1=5$ мм и $d_2=9,6$ мм, предназначенную для изготовления железобетонных шпал. Качество арматуры формируется на участках размотки и нанесения насечки и формирования механических свойств [7].

Электроприводы агрегатов стана выполнены по индивидуальной схеме силового питания асинхронных электродвигателей 17 от преобразователей частоты (ПЧ) 18 типа Simovert Masterdrives VC. Системы управления электроприводами всех агрегатов стана (см. **рис. 1**) выполнены однотипно и имеют два канала

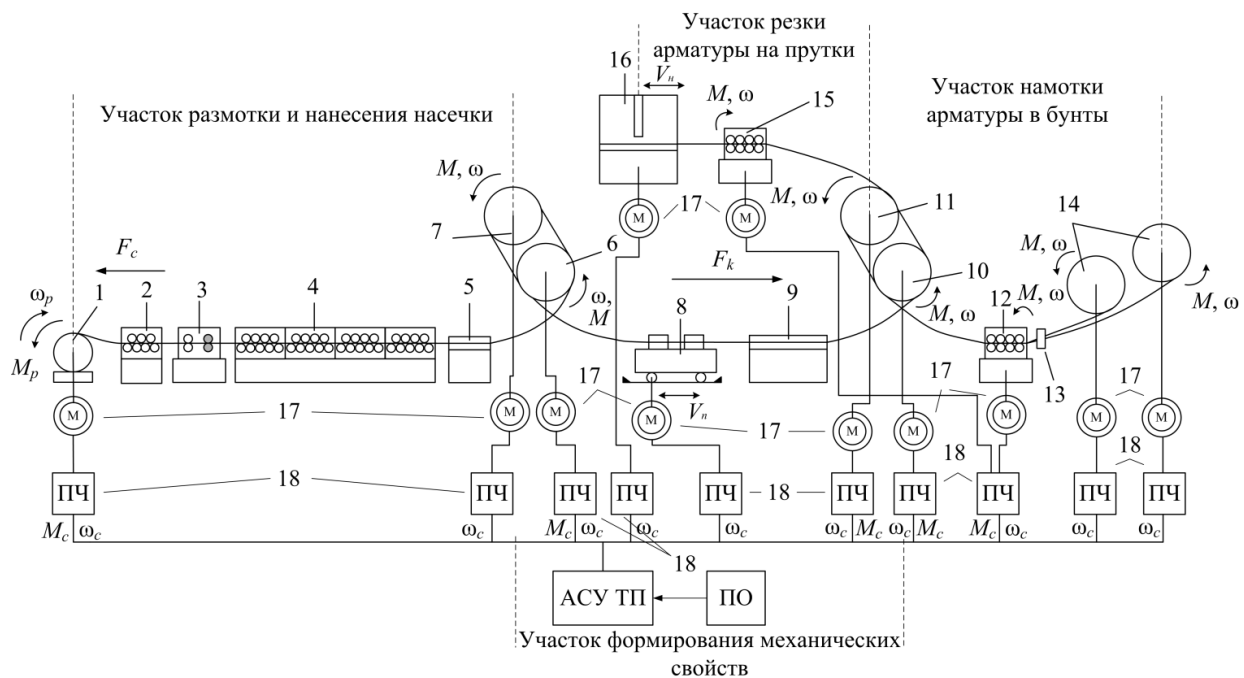


Рис. 1. Схема электропривода стана по производству арматуры ISF 5

регулирования: угловой скорости вращения электродвигателя и подчиненного ему канала регулирования момента электродвигателя. Технологические требования по регулированию натяжений в проволоке выполняются по второму каналу за счет задания на регулятор скорости максимального напряжения и изменения напряжений задания на ограничение момента [8].

В рабочем режиме обработки проволоки электропривод кабестана 7 является базовым и обеспечивает требуемую по технологии скорость обработки V_1 проволоки на стане. Электроприводы остальных агрегатов стана за счет стабилизации моментов электродвигателей обеспечивают необходимые по технологии натяжения F_i в проволоке между соответствующими агрегатами стана. Электропривод РА обеспечивает натяжение проволоки во всех пространствах между РА 1 и кабестаном 6. При этом электродвигатель РА 1 работает в режиме торможения. Электроприводы кабестанов 10, 11 обеспечивают необходимое натяжение проволоки на участке формирования ее механических свойств [10].

Технологическое требование к электроприводу РА по поддержанию на заданном уровне натяжения в проволоке на выходе из РА реализовано в АСУ ТП стана за счет расчета и коррекции задания на момент электродвигателя $M_{p,req}$ по известному в технической литературе выражению в функции изменения радиуса R_k заполнения катушки проволокой:

$$M_{p,req} = \frac{M_{p,max} R_k}{R_{k,max}}, \quad (1)$$

где $R_{k,max}$ – максимальный радиус заполнения катушки проволокой; $M_{p,max}$ – задание на момент электродвигателя РА при $R_k = R_{k,max}$.

В результате статистической обработки данных значений глубины насечки на стане ISF 5 ОАО «ММК-МЕТИЗ» было установлено, что вероятность несоответствия величин глубины насечки арматуры требу-

емым параметрам при изготовлении арматуры диаметром d_1 составляет 7,2%, а арматуры диаметром d_2 – 5,8%.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

С целью определения влияния электроприводов РА и кабестанов 10, 11 (см. рис. 1), создающих натяжения в проволоке, на глубину насечки на стане ISF 5 ОАО «ММК-МЕТИЗ» проведен активный двухфакторный эксперимент, в ходе которого варьировалось задание на момент торможения электродвигателя РА (фактор X_1) и задание на натяжение в проволоке, создаваемое кабестанами 10, 11 (фактор X_2). Эксперимент проводился отдельно для случаев изготовления арматуры диаметром $d_1 = 5$ мм и арматуры диаметром $d_2 = 9,6$ мм. Общий объем выборки изменения глубины насечки при изготовлении арматуры диаметром d_1 составил $N_1 = 300$ наблюдений, а арматуры диаметром d_2 – $N_2 = 180$ наблюдений.

В результате дисперсионного анализа экспериментальных данных было доказано: изменение момента торможения электродвигателя РА значительно влияет на изменение глубины насечки (Δa); влиянием фактора X_2 и взаимодействия факторов X_1 и X_2 можно пренебречь. По итогам 3-кратного дублирования эксперимента в различные интервалы времени доказана стационарность влияния электропривода РА на показатели глубины насечки (фактором «время» можно пренебречь).

С целью анализа влияния натяжения, создаваемого электроприводом РА, на глубину насечки на основе известных математических соотношений разработана общая математическая модель расчета натяжения в проволоке на входе в КП (F_c) с учетом изменения радиуса R_k заполнения катушки проволокой:

$$F_c = F_{dr} + F_{unb} + \frac{M_{id} \cdot i_p}{R_k} + \frac{M_p \cdot i_p}{R_k} + \frac{M_s}{R_k}, \quad (2)$$

где F_{dr} – усилие сопротивления протягиванию проволоки через РПУ; F_{unb} – усилие сопротивления разгибу проволоки; M_{id} – момент холостого хода электродвигателя РА с установленной пустой катушкой; M_p – момент торможения электродвигателя РА; M_s – момент сопротивления, обусловленный действием сил трения в опорах цапфы катушки от действия веса проволоки; i_p – эквивалентное передаточное число редуктора электропривода РА.

В технической литературе отсутствуют выражения для расчета величин M_{id} и M_s в функции изменения радиуса R_k . Поэтому предложена методика и для технологических параметров стана ISF 5 ОАО «ММК-МЕТИЗ», получены аналитические и эмпирические выражения для расчета величин M_{id} и M_s :

$$M_{id} = A_0 + A_1 \cdot \omega_p, \quad (3)$$

$$M_s = \frac{M_{s,0} \cdot (R_k - R_{k,0})}{R_{k,max} - R_{k,0}}, \quad (4)$$

где A_0, A_1 – коэффициенты уравнения регрессии; ω_p – угловая скорость вращения электродвигателя размоточного аппарата; $R_{k,0}$ – начальный радиус заполнения катушки проволокой; $M_{s,0}$ – величина начального момента сопротивления, определенная экспериментально [9].

Величина коэффициента A_1 определена экспериментальным путем и составляет 0,045 Н·м·с [9]. А величину коэффициента A_0 рассчитывают в начале каждого межремонтного интервала эксплуатации стана по выражению

$$A_{0,i} = M_{id,i} - 0,045 \cdot \omega_{p,i}, \quad (5)$$

где $M_{id,i}$ и $\omega_{p,i}$ – результаты единичного измерения величин момента холостого хода и угловой скорости вращения электродвигателя размоточного аппарата.

Доказана адекватность экспериментальным данным результатов расчета натяжений на математической модели (2) [9].

В результате замены величин момента торможения электродвигателя РА на величины натяжений, рассчитанные на математической модели (2), по итогам регрессионного анализа получены адекватные экспериментальным данным регрессионные зависимости Δa от F_c соответственно для арматуры диаметром d_1 и d_2 :

$$\Delta a' = 0,0087 - 0,0072 \cdot F_c' - 0,000334 \cdot F_c'^2, \quad (6)$$

$$\Delta a'' = 0,648 - 0,112 \cdot F_c'' - 0,0047 \cdot F_c''^2, \quad (7)$$

где $\Delta a = a - A$ – отклонение глубины насечки a от нормированного A показателя.

В результате анализа выражений (6) и (7) и их доверительных интервалов было доказано, что при производстве арматуры диаметром $d_1=5$ мм для обеспечения глубины насечки в пределах допусков величина допустимого натяжения $F_{c,alw}$ в проволоке между РПУ и КП не должна превышать 4,18 кН, а арматуры диаметром $d_2 = 9,6$ мм соответственно – 10,75 кН.

При условиях неизменности линейной скорости V_l обработки проволоки на стане ISF 5 и поддержания

величины натяжения F_c в проволоке между РПУ и КП на требуемом по технологии постоянном уровне $F_{c,req} = \text{const}$ на основе выражения (2) получено выражение требуемого изменения момента торможения $M_{p,req}$ электродвигателя РА [12]:

$$M_{p,req}(R_k) = \frac{(F_{c,req} - F_{unb}(R_k) - F_{dr}) \cdot R_k}{i_p} - M_{id}(R_k) - M_s(R_k). \quad (8)$$

Для технологических параметров стана ISF 5 ОАО «ММК-МЕТИЗ» и значений переменных параметров и коэффициентов был выполнен расчет требуемого изменения момента торможения $M_{p,req}$ электродвигателя РА по (8). Расчет изменения момента торможения M_p электродвигателя РА в существующей системе управления стана выполнен по выражению (1). Графическая иллюстрация результатов расчета для случаев изготовления арматуры диаметром d_1 и d_2 приведена на рис. 2.

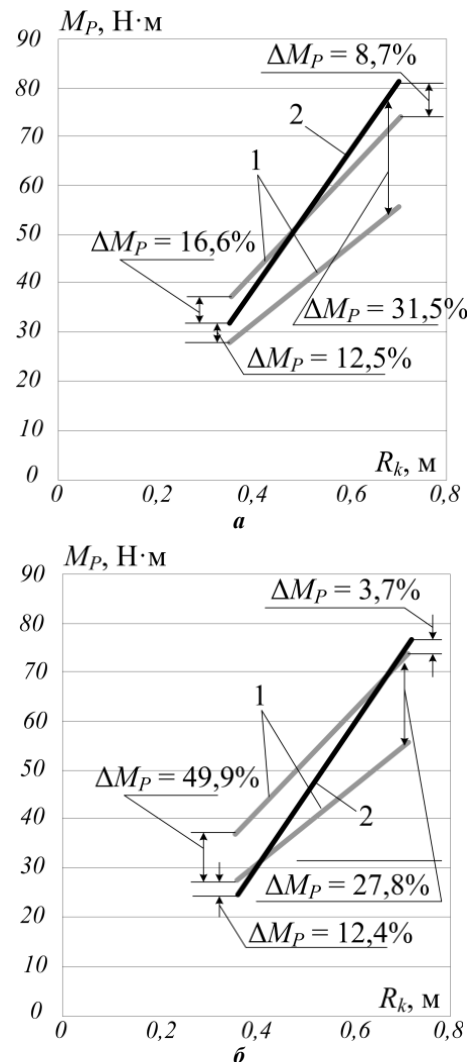


Рис. 2. Изменение момента торможения M_p в существующей системе управления электроприводом размоточного аппарата (графики 1) и требуемого изменения момента торможения $M_{p,req}$ электродвигателя размоточного аппарата (графики 2) в функции изменения радиуса R_k для случаев изготовления арматуры диаметром d_1 (а) и d_2 (б)

Из графиков **рис. 2** следует: изменение как требуемого момента торможения $M_{p,req}$, так и момента торможения M_p в существующей системе управления электроприводом размоточного аппарата соответствует линейному закону; расхождения ΔM_p между значениями моментов M_p и $M_{p,req}$ при изменении радиуса R_k заполнения катушки проволокой существенно и находится в пределах от 8,7 до 16,6 % (d_1) и от 3,7 до 49,9 % (d_2).

По данным графиков $M_p = f(R_k)$ и $M_{p,req} = f(R_k)$ (см. **рис. 2**) по выражению (2) рассчитано изменение величины натяжения F_c в проволоке между РПУ и КП для существующего M_p и требуемого изменения момента торможения $M_{p,req}$ электродвигателя РА. По результатам расчетов построены графики $F_c = f(R_k)$, приведенные на **рис. 3**.

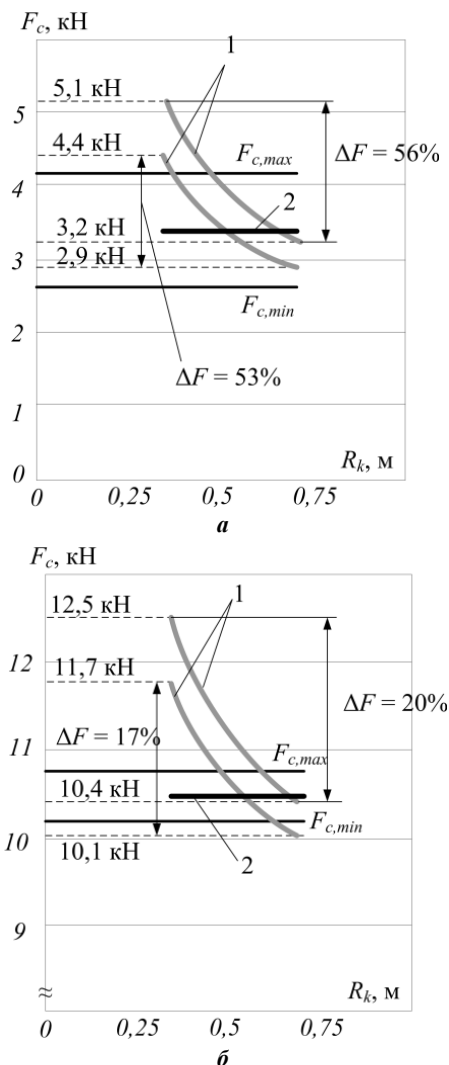


Рис. 3. Графики изменения величин натяжения F_c при изменении момента торможения M_p по алгоритму существующей системы (графики 1) и требуемого изменения момента торможения $M_{p,req}$ электродвигателя размоточного аппарата (графики 2) для случаев изготовления арматуры диаметром d_1 (а) и d_2 (б)

Из графиков (см. **рис. 3**) следует, что в существующей на стане ISF 5 системе управления по мере уменьшения радиуса заполнения катушки проволокой происходит (графики 1) существенное уменьшение натяжения в проволоке (с 5,1 до 3,2 кН для арматуры диаметром d_1 и с 12,5 до 10,4 кН для арматуры диамет-

ром d_2), выходящее за границы допустимого диапазона. Напротив, при изменении момента торможения электродвигателя РА по выражению (8) происходит (графики 2) стабилизация натяжения. Таким образом, существующая система управления электроприводом РА не обеспечивает стабилизацию величины натяжения F_c в проволоке между РПУ и КП при изменении величины радиуса R_k заполнения катушки проволокой в процессе её размотки, что может являться причиной появления отклонений глубины насечки арматуры вне допустимых пределов.

На основании проведенных исследований была предложена следующая методика определения изменения момента торможения электродвигателя РА с целью поддержания величины натяжения F_c в проволоке между РПУ и КП на заданном неизменном уровне [10]:

1. Задается величина требуемого натяжения $F_{c,req}$ в проволоке между РПУ и КП в пределах интервалов допустимого изменения натяжения F_c для диаметра d_w обрабатываемой проволоки.

2. По известным выражениям выполняется расчет усилий F_{dr} сопротивления протягиванию проволоки через РПУ и F_{unb} сопротивления разгибу проволоки [11, 12].

3. По выражениям (9) и (10) выполняется расчет текущей величины радиуса R_k заполнения катушки шириной b и угловой скорости вращения ω_p электродвигателя РА [12]:

$$R_k = \sqrt{R_{k,0}^2 - \frac{d_w^3}{4b} \cdot \int_0^t V_l(t) dt}; \quad (9)$$

$$\omega_p = \frac{i_p \cdot V_l}{R_k}. \quad (10)$$

4. Выполняется расчет величины момента холостого хода M_{id} и момента сопротивления M_s соответственно по выражениям (3) и (4).

5. По выражению (8) выполняется расчет величины требуемого момента торможения $M_{p,req}$ на валу электродвигателя РА.

На основании проведенных исследований определены дополнительные технологические требования к электроприводу РА с целью обеспечения глубины насечки арматуры в пределах допусков: в системе управления электроприводом РА должна быть предусмотрена возможность расчета требуемого изменения момента торможения электродвигателя РА по выражению (8); в системе управления электроприводом РА должна быть предусмотрена возможность изменения момента торможения электродвигателя РА в целях поддержания натяжения в проволоке между РПУ и КП в пределах допустимых значений [13].

В результате расчета для конкретных технологических условий изготовления арматуры диаметром d_1 и d_2 на стане ISF 5 ОАО «ММК-МЕТИЗ» требуемого изменения момента торможения $M_{p,req}$ электродвигателя РА в функции изменения радиуса R_k установлено, что искомые зависимости $M_{p,req}$ близки линейным и адекватно могут быть представлены следующими упрощенными регрессионными уравнениями соответст-

венно для случаев изготовления арматуры диаметром d_1 и d_2 :

$$M'_{p,req} = -17 + 140,7 \cdot R_k, \quad (11)$$

$$M''_{p,req} = -27,3 + 148,9 \cdot R_k. \quad (12)$$

Сделан вывод: на стане ISF 5 ОАО «ММК-МЕТИЗ» техническое выполнение первого дополнительного технологического требования можно существенно упростить и реализовать в существующей системе АСУ ТП СПА в алгоритме расчета задания на момент электродвигателя РА посредством замены выражения (1) на выражения (11) и (12).

Для технических параметров электропривода (см. **рис. 1**) разработаны функциональная схема и алгоритм системы управления электроприводом РА. В алгоритме управления предусмотрено, что система управления работает только в рабочем режиме изготовления арматуры. В заправочных и аварийных режимах система управления отключена и не влияет на работу СПА [8]. С целью оценки технической и экономической эффективности предложенных технических решений на стане ISF 5 ОАО «ММК-МЕТИЗ» проведен промышленный эксперимент, в ходе которого в ручном режиме по выражениям (11) и (12) выполнялась коррекция задания на момент торможения электродвигателя РА. По итогам эксперимента было выполнено измерение показателей глубины насечки арматуры. В результате получено уменьшение доли арматуры, не соответствующей по показателям глубины насечки требуемым величинам, диаметром $d_1=5$ мм с 7,2 до 1,1%, а арматуры диаметром $d_2=9,6$ мм с 5,8 до 0%. Ожидаемый экономический эффект составил 320 тыс. руб. в год.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате экспериментального и теоретического исследования работы электроприводов стана ISF 5 ОАО «ММК-МЕТИЗ» на показатели глубины насечки на арматуре доказано, что изменение момента торможения электродвигателя РА значительно влияет на изменение глубины насечки на арматуре. Разработана адекватная экспериментальным данным модель расчета натяжения в проволоке математическая между РПУ и КП с учетом аналитических и эмпирических зависимостей изменения в процессе размотки проволоки с катушки величин момента холостого хода электропривода РА и момента сопротивления, обусловленного действием сил трения в опорах цапфы катушки от действия веса проволоки. Предложены методика расчета допустимого, с позиции обеспечения глубины насечки на арматуре в пределах допусков, изменения натяжения в проволоке, создаваемого электроприводом РА между РПУ и КП и методика расчета целесообразного изменения момента торможения электродвигателя РА при изменении радиуса заполнения катушки проволокой. Разработаны дополнительные технологические требования к системе управления электроприводом РА с позиций обеспечения глубины насечки арматуры в пределах допустимых значений

за счет стабилизации натяжения в проволоке между РПУ и КП посредством целесообразного изменения момента торможения электродвигателя РА в функции изменения радиуса заполнения катушки проволокой. В результате апробации на действующем стане ISF 5 ОАО «ММК-МЕТИЗ» доказана техническая и экономическая эффективность предложенных технических решений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тихонов И.Н., Гвоздева А.А., Стеблов А.Б. Арматурный прокат для крупнопанельного домостроения // Жилищное строительство. 2011. №8. С.10-12.
2. Перспективы производства высокопрочной стальной арматуры для железобетонных шпал нового поколения на основе термомодеформационного наноструктурирования / М.В. Чукин, Г.С. Гун, А.Г. Корчунов, М.А. Полякова // Бюлл. «Черная металлургия». 2012. №4. С.100-105.
3. Радионов А.А. Автоматизированный электропривод станов для производства стальной проволоки: монография. Магнитогорск: ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», 2007. 311 с.
4. Устройство регулирования размеров проката: а.с. 942639 СССР / В.П. Бычков, И.А. Селиванов, В.В. Шохин, И.Л. Лебединский, С.И. Лукьянов. Опул. в Б.И., 1982. № 26.
5. E.I. Khlusova and V.V. Ryabov, Influence of the production technology and alloying of high-strength steel on its ease of cold deformation // Steel in Translation, April 2013, vol. 43, issue 4, pp. 221-224.
6. Mario Frigerio PC Wire [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.mariofrigerio.com/PC_wire.htm (дата обращения: 05.09.2014).
7. PC WIRE LINE ISF5: док. к обор. Italia: Mario Frigerio S.p.A., 2006. 166 с.
8. Сафин И.Р., Лукьянов С.И., Бодров Е.Э. Система управления электроприводом размоточного аппарата стана по производству стальной арматуры // Электротехнические системы и комплексы. 2014. №3(24). С.17-24.
9. Сафин И.Р., Лукьянов С.И., Бодров Е.Э. Методика оценки влияния электропривода размоточного аппарата на качество периодического профиля стальной арматуры // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2014. Т.14, №3. С.71-78.
10. Совершенствование системы управления электроприводом размоточного аппарата стана по производству стальной арматуры / И.Р. Сафин, С.И. Лукьянов, О.С. Логунова, Е.Э. Бодров // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2015. Т.15. №2. С.77-83.
11. Тарнавский А.Л. Силовые условия волочения с использованием роликовых окалинломателей. // Сталь. 1965. №2. С.182-184.
12. Радионов А.А., Карандаев А.С. Автоматизированный электропривод намоточно-размоточных устройств агрегатов прокатного производства: монография. Магнитогорск: МГТУ, 1999. 131 с.
13. Сафин И.Р., Лукьянов С.И., Бодров Е.Э. Разработка технологических требований к электроприводу размоточного аппарата линии по производству арматуры // Труды VIII Международной (XIX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2014: в 2 т. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2014. Т.2. С. 315-319.

INFORMATION IN ENGLISH

PROVISION OF REQUIRED DEPTHS OF NOTCHES ON STEEL REBAR BY MEANS OF UNWIND MACHINE ELECTRIC DRIVE

Lukyanov S.I., Bodrov E.E., Safin I.R., Mazitov D.M.

The paper describes the results of theoretical and experimental research of the effect made by wire rebar production line electric drive parameters to the depths of notches on the rebar. It was shown that the control systems of the existing production line units did not provide the required depths of notches. The new scientific results were obtained by means of modeling the wire tension created by the line electric drives and statistical processing of the notch depths data. The following results were obtained: correlation between the unwind machine electric drive breaking torque alteration and depths of notches variation was proved; the allowable range of the wire tension variation at the inlet of profile stand was found; the method of unwind machine electric drive breaking torque efficient alteration, which was needed to stabilize wire tension at the inlet of profile stand under the wire fill-in radius variation, was developed; additional technological requirements to the line electric drives were proposed; empirical equations for unwind machine electric drive torque were obtained. After industrial approbation of the developed technical solutions there was achieved reduction in off-grade rebar percentage from 7.2 % to 1.1 % for 5 mm wire diameter and from 5.8 % to 0 % for 9.8 mm wire diameter.

Keywords: High-strength rebar, production line, unwind machine, electric drive, depth of notches, control system.

REFERENCES

1. Tihonov I.N., Gvozdeva A.A., Steblov A.B. Armaturniy prokat dlya krupnopanelnogo domostroeniya [Reinforcing bar for panel construction]. *House building*. 2011. no.8. pp.10-12.
2. Chukin M.V., Gun G.S., Korchunov A.G., Polyakova M.A. Perspektivi proizvodstva visokoprochnoi stalnoi armatury dlya zhelezobetonnykh shpal novogo pokoleniya na osnove termodeformatsionnogo nanostrukturirovaniya [Prospects of high-strength steel reinforcement for the new generation reinforced concrete sleepers of thermal-based nanostructuration]. *Bulletin "Ferrous metallurgy"*. 2012, vol.4, pp. 100-105.
3. Radionov A.A. Avtomatizirovannyi elektropriwod stanov dlya proizvodstva stalnoy provoloki [Automatic electric drive of steel wire production lines]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2007, 311 p.
4. Bychkov V.P., Selivanov I.A., Shohin B.B., Lebedinsky I.L., Lukyanov S.I. Ustroistvo regulirovaniya razmerov prokata [Control device for drawn metal dimensions]. Authorship certificate of USSR 942639, 1982. no. 26.
5. E.I. Khlusova and V.V. Ryabov. Influence of the production technology and alloying of high-strength steel on its ease of cold deformation, *Steel in Translation*, April 2013, vol. 43, issue 4, pp. 221-224.
6. Mario Frigerio PC Wire, [http:// www.mariofrigerio.com /PC_wire.htm](http://www.mariofrigerio.com/PC_wire.htm).
7. PC wire line ISF5, Hardware documentation. Italia: Mario Frigerio S.p.A., 2006, 166 p.
8. Safin I.R., Lukyanov S.I., Bodrov E.E. Sistema upravleniya elektropriivodom razmotochnogo apparata stana po proizvodstvu stalnoi armatury [Unwinding apparatus electric drive control system of steel fittings production line]. *Electrotechnical systems and complexes*, 2014, no.3(24), pp.17-24.
9. Safin I.R., Lukyanov S.I., Bodrov E.E. Metodika otsenki vliyaniya elektropriivoda razmotochnogo apparata na kachestvo periodicheskogo profilya stalnoi armatury [Evaluation of un-winding apparatus electric drive Influence on steel fitting periodic profile quality definition technique]. *Bulletin of the South Ural State University, Series "Power Engineering"*. 2014, vol.14, no.3, pp. 71-78.
10. Safin I.R., Lukyanov S.I., Logunova O.S., Bodrov E.E. Sovershenstvovanie sistemi upravleniya elektropriivodom razmotochnogo apparata stana po proizvodstvu stalnoi armatury [Improving of unwinding apparatus electric drive control system on steel fittings production line]. *Bulletin of the South Ural State University, Series "Power Engineering"*. 2015, vol. 15, no.2, pp. 77-83.
11. Tarnavsky A.L. Silovye usloviya volocheniya s ispolzovaniem rolikovih okalinolomatelei [Pressure conditions of drawing using roller descaling]. *Steel*. 1965, no. 2. pp.182-184.
12. Radionov A.A., Karandaev A.S. Avtomatizirovannii elektropriwod namotochno-razmotochnykh ustroystv agregatov prokatnogo proizvodstva [Automated electric drive of winding-unwinding devices of rolling manufacturing aggregates: monograph]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 1999, 131 p.
13. Safin I.R., Lukyanov S.I., Bodrov E.E. Razrabotka tekhnologicheskikh trebovaniy k elektropriivodu razmotochnogo apparata linii po proizvodstvu armatury [Development of process requirements to unwind machine electric drive at fitting production line]. *Proceedings of the VIII International (XIX All-Russian) conference on automated electric drive AED-2014*, vol.2. Saransk: University of Mordovia. 2014, pp. 315-319.

НАБЛЮДАТЕЛЬ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ РОТОРА В СКАЛЯРНОЙ СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ АСИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

В работе рассматривается бездатчиковая система скалярного управления асинхронным приводом с контурами регулирования скорости и активной составляющей тока. Скорость ротора вычисляется по линеаризованной зависимости частоты скольжения от активной составляющей тока, полученной для схемы с IR -компенсацией. Активная составляющая тока определяется как сумма проекций измеренных α, β -компонент тока на обобщенный вектор напряжения. Произведена оценка погрешности линеаризации. Построена модель подчиненного регулирования с предложенным наблюдателем скорости ротора, с помощью которой произведена оценка точности работы наблюдателя при изменении задаваемой скорости вращения ротора и определен диапазон регулирования, при котором статическая ошибка не превышает 1%.

Ключевые слова: частотно-регулируемый привод, ШИМ, диапазон регулирования скорости, активная составляющая тока статора, частота скольжения.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время большое внимание уделяется разработке систем управления электроприводом без датчика скорости на валу двигателя. Такая тенденция вызвана стремлением к уменьшению стоимости и повышению надежности электропривода. В некоторых случаях отказ от применения датчиков скорости обусловлен конструктивными особенностями привода, исключающими возможность установки такого датчика.

Большинство работ, посвященных косвенному определению скорости ротора, относятся к векторным системам частотного управления, используемых для обеспечения высокого качества регулирования ответственных приводных механизмов [1-8].

Применительно к системам скалярного частотного управления вопросу построения наблюдателя скорости уделяется недостаточно внимания. Отметим, что предложенные в публикациях [9,10] способы косвенного определения скорости не обеспечивают точности, сравнимой с точностью, достигаемой в векторных системах. В то же время скалярные системы управления до сих пор востребованы и входят в базовый набор функций преобразователей частоты как отечественного, так и зарубежного производства. Область применения систем скалярного управления стремятся расширить за счет придания этим системам динамических свойств векторных систем. Примеры таких приводов на основе датчиков положения ротора рассмотрены в публикациях [11,12].

В настоящее время основной областью применения систем скалярного управления является привод механизмов с вентиляторной характеристикой, режим работы которых характеризуется небольшим диапазоном регулирования (1:10) и отсутствием в процессе работы резких изменений момента сопротивления. Ввиду широкого использования вентиляторов и насосов в различных технологических установках отказ от датчиков положения ротора в системах скалярного частотного управления приводом позволит заметно улучшить стоимостные показатели и показатели надежности таких установок. Очевидно, что в этом слу-

чае наблюдатель скорости, как и сама система скалярного управления, должен быть относительно простыми и не требовать сложных вычислений.

Работа посвящена созданию бездатчиковой системы скалярного частотного управления приводом на основе наблюдателя, использующего связь скорости вращения ротора с активной составляющей тока статора.

I ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ

Для косвенного измерения скорости вращения ротора асинхронного двигателя $\omega = \omega_s - \omega_r$ необходимо знать частоту вращающегося магнитного поля ω_s и частоту ЭДС ротора или частоту скольжения ω_r . Частота ω_s задается законом управления частотно-регулируемым приводом, частота ω_r требует вычисления на основе непосредственно измеряемых величин – напряжения и тока статорных обмоток.

Рассмотрим определение скорости вращения ротора АД на основе зависимости активной составляющей тока статора от частоты ЭДС ротора. Для получения этой зависимости воспользуемся Γ -образной схемой замещения АД (рис. 1). Схема замещения построена для скалярной системы управления, в которой используется IR -компенсация. Функция компенсации падения напряжения на активном сопротивлении статора является стандартной в современных преобразователях частоты [1].

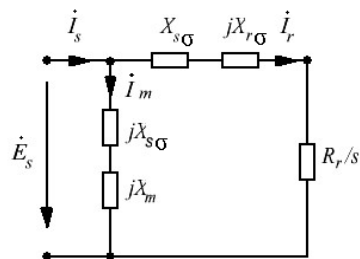


Рис. 1. Γ -образная схема замещения АД

Ток статора $I_s = I_{sa} - jI_{sr}$ определяется напряжением и проводимостью ветвей схемы замещения АД

$$I_{sa} = \frac{E_s(R_r/s)}{(R_r/s)^2 + (X_{r\sigma} + X_{s\sigma})^2}; \quad (1)$$

$$I_{sr} = \frac{E_s(X_{r\sigma} + X_{s\sigma})}{(R_r/s)^2 + (X_{r\sigma} + X_{s\sigma})^2} + \frac{E_s}{X_{s\sigma} + X_m}, \quad (2)$$

где R_r – активное сопротивление ротора; $X_{r\sigma}$, $X_{s\sigma}$ – индуктивное сопротивление рассеяния ротора и статора; s – скольжение.

Для получения явной зависимости активной составляющей тока от частоты тока ротора преобразуем формулу (1) с учетом закона управления $(E/\omega_s) = \gamma = \text{const}$ и выражения $s = \omega_r/\omega_s$:

$$I_{sa} = \frac{\gamma \omega_r R_r}{1 + \omega_r^2 \tau^2}, \quad \tau = (L_{s\sigma} + L_{r\sigma})/R_r. \quad (3)$$

С учетом малости величины $\omega_r \tau \ll 1$ выполним линеаризацию зависимости (3).

$$I_{sa} = k_a \omega_r. \quad (4)$$

Коэффициент пропорциональности k_a определим из условия совпадения нелинейной зависимости (3) с линеаризованной функцией (4) в номинальном режиме:

$$k_a = \frac{\gamma \omega_{rnom}}{R_r} \frac{1}{1 + (\omega_{rnom} \tau)^2} = \frac{I_{sanom}}{\omega_{rnom}}. \quad (5)$$

Активная составляющая тока статора и частота роторной ЭДС в номинальном режиме определяются по паспортным данным двигателя:

$$\omega_{pnom} = \omega_{0nom} s_{nom}, \quad I_{sanom} = I_{nom} \cos \varphi_{nom}.$$

Оценка частоты скольжения по измеренному значению активной составляющей тока статора позволяет определить скорость вращения ротора по формуле

$$\omega = (\omega_s - k_\omega I_{sa}) / z_p, \quad k_\omega = 1/k_a, \quad (6)$$

где z_p – число пар полюсов.

Для оценки текущего значения активной составляющей тока используется представление параметров режима в неподвижной α, β и системе координат x, y , вращающейся со скоростью ω_s (рис. 2).

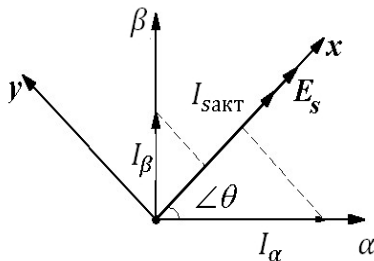


Рис. 2. Векторная диаграмма токов статора в системах координат α, β и x, y

Положение вектора основной гармоники напряжения $\vec{E}_s$ задается обобщенным вектором системы модулирующих напряжений ШИМ инвертора $\vec{e}_s$, который

ориентирован вдоль оси x

$$\theta(t) = \int_0^t \omega_s(t) dt. \quad (7)$$

При известном угле положения θ и измеренных α, β – компонентах вектора тока $\vec{I}_s$ активная составляющая тока I_{sa} вычисляется как сумма проекций токов i_α и i_β на ось x :

$$I_{sa} = i_\alpha \cos \theta + i_\beta \sin \theta. \quad (8)$$

Для получения проекций i_α и i_β по измеренным токам i_a, i_b, i_c используется преобразование

$$i_\alpha = i_a, \quad i_\beta = (i_b - i_c)/\sqrt{3}. \quad (9)$$

II ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ ЛИНЕАРИЗАЦИИ

Найдем ошибку вычисления частоты скольжения по линеаризованной формуле

$$W = (1 - \omega_r^*/\omega_r) \cdot 100\%, \quad (10)$$

где ω_r^* – оценка частоты скольжения; ω_r – решение уравнения (3) для рабочего участка механической характеристики,

$$\omega_r = \frac{\gamma}{2R_r \tau^2 I_{sa}} + \sqrt{\frac{\gamma^2}{(2R_r \tau^2 I_{sa})^2} - \frac{1}{\tau^2}}. \quad (11)$$

Из формулы (11) следует, что при использовании ИР-компенсации погрешность линеаризации зависит от параметров схемы замещения и не зависит от частоты поля статора. График зависимости относительной погрешности линеаризации от скольжения для двигателей разной мощности 7,5, 37 и 160 кВт показан на рис. 3.

Влияние мощности двигателя на погрешность связано с зависимостью параметра τ от мощности двигателя. Например, для двигателя мощностью 160 кВт имеем $\tau^2 \approx 10^{-3}$, для двигателя 7,5 кВт – $\tau^2 \approx 10^{-5}$.

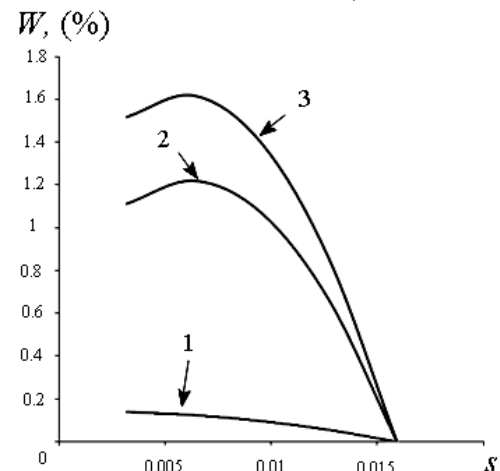


Рис. 3. Относительная погрешность определения частоты скольжения для двигателей мощностью 7,5 кВт (кривая 1), мощностью 37 кВт (кривая 2) и мощностью 160 кВт (кривая 3)

Из графиков видно, что при снижении механиче-

ской нагрузки двигателя погрешность линеаризации возрастает до значения $W=1,6\%$.

III СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ

Исследование предложенного способа бездатчикового определения скорости вращения ротора в системе скалярного управления асинхронным двигателем выполнено с помощью модели привода в среде MatLab/Simulink. Модель включает асинхронный двигатель, автономный инвертор напряжения, модель вентильной нагрузки, датчики тока и блок синусоидальной ШИМ. Использовался двигатель 4A200M2Y3 с параметрами [14]: $P_{\text{ном}}=37$ кВт, $U_{\text{ф.н}}=220$ В, $\omega_s=3000$ об/мин, $s=0,02$, $R_s=0,084$ Ом, $L_{\text{sc}}=0,0009$ Гн, $R_r'=0,0564$ Ом, $L_{\text{r}\sigma}'=0,0011$ Гн, $L_m=0,0109$ Гн, $U_{\text{dc}}=540$ В.

рис. 4. Входными сигналами для системы управления служат токи статора i_a, i_b, i_c , которые затем преобразуются в проекции вращающегося вектора на оси α, β стационарной системы координат. Используя данные о положении θ обобщенного вектора трехфазной системы модулирующих напряжений, α, β – компоненты проецируются на ось вращающейся системы координат, в результате чего формируется активная составляющая тока статора I_{sa} . Частота скольжения оценивается по линейной зависимости $\omega_s = k_{\omega} I_{sa}$. Сравнение вычисленной частоты вращения ротора по формуле (5) с заданным значением тока дает ошибку $\Delta\omega = \omega^* - \omega^{est}$, которая поступает на вход ПИ-регулятора скорости, выходом которого является задание по активной составляющей тока I_{sa}^* для внутреннего контура регулирования тока.

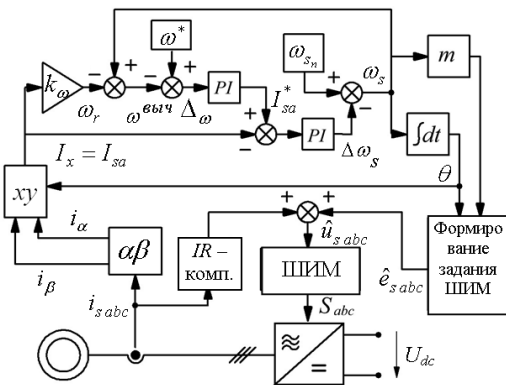


Рис. 4. Структура системы управления

Выходным сигналом ПИ-регулятора тока является величина $\Delta\omega_s$, с помощью которой формируется частота модулирующего напряжения $\omega_s = \omega_{snom} - \Delta\omega_s$, где ω_{snom} – номинальная частота. Частота ω_s используется для формирования с помощью интегратора угла θ , а также коэффициента модуляции m . Коэффициент модуляции при законе регулирования $E/\omega_s = \text{const}$ определяется как отношение частот $m = \omega_s/\omega_{snom}$. По относительной амплитуде m и текущему углу $\theta(t)$ формируется симметричная трехфазная система модулирующих сигналов $\hat{e}_a(t), \hat{e}_b(t), \hat{e}_c(t)$, которая затем корректируется слагаемыми, учитывающими ИР-компенсацию [13]. Сравнение полученных модулирующих напряжений $\hat{u}_a(t), \hat{u}_b(t), \hat{u}_c(t)$ с опорным сигналом ШИМ дает функции переключения S_a, S_b, S_c , управляющие IGBT – модулями инвертора напряжения.

IV РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Задача моделирования состояла в оценке погрешности косвенного определения скорости ротора в зависимости от нагрузки привода и соотношении этой погрешности с точностью современных бездатчиковых систем векторного управления, которая в соответствии с данными работы [1,4] составляет $\pm 1\%$.

Для оценки погрешности использовались данные измерительного блока двигателя $\omega^{\text{изм}}$ и результат расчета системы управления $\omega^{\text{выч}}$.

$$W_{\omega} = \frac{\omega^{\text{ИЗМ}} - \omega^{\text{ВЫЧ}}}{\omega^{\text{ИЗМ}}} \cdot 100\%. \quad (12)$$

Исследование предложенной системы управления электроприводом производилось следующим образом. Сначала осуществлялся разгон двигателя до номинальной частоты вращения и затем включалась система регулирования скорости. В системе регулирования задавалось ступенчатое изменение скорости вращения по закону

$$\hat{\omega}(t) = 1 - \sum_{k=1}^{10} \Delta \hat{\omega} \delta_1(t - kT_1), \quad (13)$$

где δ_1 – единичная ступенчатая функция; $\Delta\hat{\omega}$ – шаг приращения скорости; T_1 – длительность одной ступени приращения.

Время $T_1=2$ с выбрано из условия получения стационарного режима на каждом шаге изменения скорости $\Delta\hat{\omega}=0,1$. На последнем шаге приращение скорости составляло $\Delta\hat{\omega}=0,05$.

Графики скорости вращения ротора и относительная ошибка ее оценки по формуле (12) представлены на **рис. 5**. Из **рис. 5, б** следует, что с уменьшением задания по скорости растет ошибка оценивания. Такой же вывод вытекает из результатов теоретического анализа раздела II. В диапазоне относительных скоростей от 1 до 0,1 статическая ошибка не превышает 0,5%. При уменьшении скорости вращения до значения 0,05 ошибка увеличивается до 1,5%.

Приведенные результаты свидетельствуют о том, что представленная система бездатчикового скалярного управления электроприводом позволяет осуществлять регулирование скорости вращения ротора в диапазоне 1:10 с ошибкой косвенного вычисления скорости, не превышающей ошибки, характерной для бездатчиковых систем векторного управления $W_{0\leq 1}\%$.

Полученные результаты справедливы для случая, когда параметры двигателя соответствуют паспортным данным. Однако эксплуатационные параметры двигателя могут отличаться от номинальных значений вследствие их зависимости от ряда факторов и влиять тем самым на оценку скорости с помощью наблюдателя [4,6,7]. Рассмотрим влияние температурной зависимости $R(T)$ активных сопротивлений обмоток статора и ротора [14] на ошибку косвенного измерения скорости:

$$R(T) = R^{(20)}[1 + \alpha(T - 20)], \quad (14)$$

где $R^{(20)}$ – сопротивление при температуре $T=20^{\circ}\text{C}$; $\alpha=0,004$ – температурный коэффициент сопротивления меди.

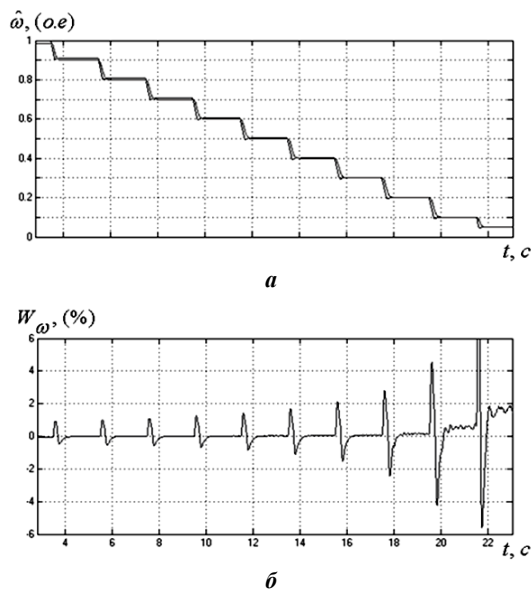


Рис. 5. Скорость вращения ротора (а) и относительная ошибка оценивания скорости (б)

Для оценки погрешности наблюдателя сохраним в системе управления исходные параметры, а в компьютерной модели исследуемого двигателя 4A200M2У3 установим другие значения сопротивлений ротора и статора, которые вследствие нагрева двигателя превышают номинальные значения сначала на 13 % и затем на 50 %.

Оценку скорости вращения производили на каждом шаге ступенчатого изменения задания по скорости вращения (13) и сравнивали с измеренным значением. Зависимость относительной погрешности (12) от заданного значения скорости $W(\omega)$ определяли по временной диаграмме $W_\omega(t)$ (рис. 6) с учетом ступенчатой аппроксимации линейной зависимости изменения задания по скорости от времени (12). Например, интервалу времени $12 \leq t \leq 14$ соответствовала оценка погрешности скорости $\omega = 0,5\omega_{ном}$.

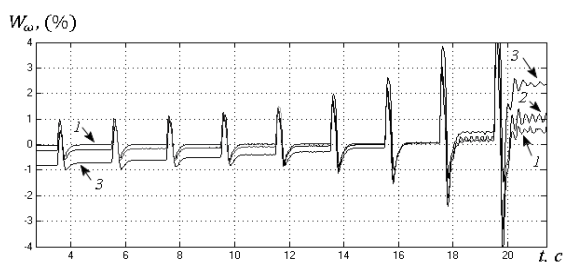


Рис. 6. Относительная ошибка оценивания скорости вращения ротора при номинальных значениях параметров (кривая 1) и при изменении сопротивления ротора и статора на 13% (кривая 2) и на 50% (кривая 3)

Из полученных данных следует, что при изменении сопротивлений на 13% ошибка не превышает $W \leq 1\%$ в диапазоне регулирования скорости 1:10, достигая предельно допустимого значения для относительной скорости $\hat{\omega}=0,1$.

При отличии сопротивления от номинального значения на 50% ошибка достигает $W = -1\%$ при номинальной скорости $\hat{\omega}=1$ и значения $W = 2\%$ при скорости $\hat{\omega}=0,1$. В последнем случае область регулирования при условии $W \leq 1\%$ снижается до интервала 1:5 по сравнению с диапазоном 1:10, который имеет место в

случае оценки скорости в номинальном режиме.

Полученные характеристики бездатчикового привода со скалярным законом частотного управления удовлетворяют требованиям наиболее распространенных приводных механизмов, имеющих вентиляторную характеристику, например вентиляторов главного проветривания шахт [15], аппаратов воздушного охлаждения [16] и др.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе дано обоснование косвенного измерения скорости вращения асинхронного двигателя в приводе со скалярной системой частотного управления. Оценка производится по результатам $\alpha\beta$ -преобразования измеренных токов статора, нахождения активной составляющей тока и использовании линеаризованной зависимости активной составляющей тока от частоты тока ротора. Предложена двухконтурная структура бездатчиковой системы скалярного управления. По результатам моделирования привода в среде MatLab/Simulink произведена оценка точности работы наблюдателя скорости. Показано, что в диапазоне регулирования скорости вращения ротора 1:10 относительная погрешность определения скорости не превышает 1% – значения, характерного для бездатчиковых систем векторного управления. Для сохранения 1%-й точности оценки скорости изменение активного сопротивления статорной и роторной цепи двигателя не должно превышать 13 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Усольцев А.А. Электрический привод: учеб. пособие. СПб.: Изд-во НИУ ИТМО, 2012. 238 с.
2. Виноградов А.Б. Векторное управление электроприводами переменного тока. Иваново: Изд-во ИГЭУ, 2008. 298 с.
3. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. М.: Академия, 2006. 265 с.
4. Вейнмейстер А.В. Косвенное измерение скорости вращения в электроприводе с асинхронным двигателем на основе идентификатора состояния: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / Вейнмейстер Андрей Викторович; СПбГЭТУ «ЛЭТИ». СПб., 2013. 17 с.
5. Reddy P. Nagasekhar, Reddy P. Linga, J. Amarnath Sensorless control of induction motor using Simulink by direct synthesis technique // International Journal of Electrical Engineering. 2011. V.4, №1. P. 23–32.
6. Holtz J. Sensorless Control of Induction Motor Drives // Proceedings of the IEEE. 2002. V. 90, № 8. P. 1359–1394.
7. Виноградов А., Сибирцев А., Колодин И. Адаптивно-векторная система управления бездатчикового асинхронного электропривода серии ЭПВ // Силовая электроника. 2006. №3. С. 50-55.
8. Сравнительное экспериментальное тестирование систем бездатчикового управления асинхронными двигателями / С.М. Пересада, С.Н. Ковбаса, А.Б. Воронко, Д.Л. Приступа // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. 2012. Т.19, №3. С. 137-141.
9. Умурзакова А.Д. Косвенный контроль выходных механических переменных асинхронного электродвигателя в электроприводе: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / Умурзакова Анара Даукеновна; ТПУ; науч. рук. Ю.Н. Дементьев. Томск, 2015. 116 с.
10. Мельников В.Ю., Умурзакова А.Д. Способы измерения угловой скорости вращения и крутящего момента асинхронного электродвигателя // Материалы докладов шестнадцатой Всероссийской научно-технической конфе-

- ренции «Энергетика: Экология, надежность, безопасность». 2010. С. 404–406.
11. Емельянов А.П., Чуркин Б.А. Скалярное управление асинхронным короткозамкнутым двигателем по активной составляющей тока статора // Вестник Южно-Уральского государственного университета. 2014. Т.14. №3 С.85-90.
 12. Толочко О.И., Чекавский Г.С., Розкаряка П.И. Скалярное частотное управление асинхронным электроприводом с улучшенными динамическими // Электромеханика і енергозберігаючі системи. 2012. Т.19, №3. С. 309-312.
 13. Дементьев Ю.Н., Чернышев А.Ю., Чернышев И.А. Электрический привод: учеб. пособие. Томск: Изд-во

- ТПУ, 2010. 232 с.
14. Асинхронные двигатели серии 4А: справочник / А.Э. Кравчик, М.М. Шлаф, В.И. Афонин, Е.А. Соболевская. М.: Энергоатомиздат, 1982. 504 с.
 15. Шонин О.Б., Пронько В.С. Повышение энергетической эффективности главных вентиляторных установок шахт на основе многоцелевой системы управления частотно-регулируемым приводом // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2014. Т.195, №2. С. 49-57.
 16. Захаров П.А., Крюков О.В. Принципы инвариантного управления электроприводами газотранспортных систем при случайных возмущениях // Вестник ИГЭУ. 2008. Вып. №2. С.1-7.

INFORMATION IN ENGLISH

OBSERVER OF ROTOR SPEED IN SCALAR CONTROL INDUCTION MOTOR DRIVE

Shonin O.B., Novozhilov N.G., Kryltsov S.B.

The paper is devoted to speed-sensorless scalar control system of an induction motor drive consisting of two loops for control of the rotor speed and the active component of stator current. The rotor speed estimation is based on the linearized dependence of the slip frequency on the active component of the stator current obtained for an IR-compensation scheme. The active current component is calculated as a sum of projections of measured alpha-beta current components onto the voltage vector. The computer model of control system with the proposed rotor speed observer has been implemented to estimate the observer accuracy for different rotor speeds. The control range of the rotor speed has been determined under conditions of the static error being kept less than 1 %.

Keywords: Variable frequency drive, PWM, speed operating range, active component of stator current, slip frequency.

REFERENCES

1. Usoltsev A.A. *Electricheskiy privod: uchebnoe posobie* [Electrical drive: tutorial]. St. Petersburg: ITMO University publ., 2012. 238 p.
2. Vinogradov A.B. *Vektornoe upravlenie elektroprivodami peremennogo toka* [Vector control of AC electrical drive]. Ivanovo: ISPU publ., 2008. 298 p.
3. Sokolovskii G.G. *Elektroprivodi peremennogo toka s chastotnim regulirovaniem* [Frequency controlled AC motor drives]. Moscow: Academy, 2006. 265 p.
4. Veynmeyster A.V. *Kosvennoe izmerenie skorosti vrasheniya v elektroprivode s asinhronnim dvigatelem na osnove identifikatora sostoyaniya* [Indirect measurement of speed of rotation in the drive with asynchronous motor on the basis of state ID]: Ph.D. thesis in engineering. St. Petersburg, 2013. 17 p.
5. Nagasekhar Reddy P., Reddy P. Linga, J. Amarnath Sensorless control of induction motor using Simulink by direct synthesis technique. *International Journal of Electrical Engineering*. 2011, vol.4, no. 1, pp. 23–32.
6. Holtz J. Sensorless Control of Induction Motor Drives. *Proceedings of the IEEE*. 2002, vol. 90, no.8, pp. 1359–1394.
7. Vinogradov A., Sibircev A., Kolodin I. Adaptivno-vektornaya sistema upravleniya bezdatchikovogo asinhronnogo elektroprivoda serii EPV [Adaptive-vector control system of sensorless induction motor series EPV]. *Power Electronics*. 2006, no.3, pp. 50-55.
8. Peresada S.M., Kovbasa S.N., Voronko A.B., Pristupa D.L. Sravnitelnoe eksperimentalnoe testirovanie sistem bezdatchikovogo upravleniya asinhronnimi dvigatelyami [Comparative experimental testing of sensorless control for asynchronous motors]. *Elektromekhanichni i energozberigayuchi. Sistemi*. 2012, vol.19, no. 3, pp. 137-141.
9. Umurzakova A.D. *Kosvennii kontrol viodnih mekhanicheskikh peremennih asinhronnogo elektrodvigatelya v elektroprivode* [Indirect control of mechanical output variable induction motor in electric drive]: Ph.D. thesis. Tomsk, 2015, 116 p.
10. Melnikov V.Y., Umurzakova A.D. *Sposobi izmereniya uglovoi skorosti vrasheniya i krutyashego momenta asinhronnogo elektrodvigatelya* [Methods for measuring angular velocity and torque of asynchronous motor]. *Proceedings of the Sixteenth All-Russia scientific-technical conference "Energy: Ecology, reliability, security"*. 2010, pp. 404–406.
11. Emelyanov A.P., Churkin B.A. *Skalyarnoe upravlenie asinhronnim korotkozamknutim dvigatelem po aktivnoi sostavlyayushei toka statora* [Scalar control of squirrel-cage induction motor with stator active current]. *Bulletin of the South Ural State University*. 2014, vol.14, no.3, pp. 85-90.
12. Tolochko O.I., Chekavsky G.S., Rozkaryaka P.I. *Skalyarnoe chastotnoe upravlenie asinhronnim elektroprivodom s uluchshennimi dinamicheskimi harakteristikami* [Scalar frequency control asynchronous electric drive with improved dynamic characteristics.]. *Electrical engineering energy saving systems*. 2012, vol.19, no.3, pp. 309-312.
13. Dementiev U.N., Chernyshov A.U., Chernyshev I.A. *Electricheskii privod: uchebnoe posobie* [Electrical Drive: tutorial]. Tomsk: TPU publ., 2010. 232 p.
14. Krawczyk A.E., Shlaf M.M., Afontin V.I., Sobolevskaya E.A. *Asinhronnie elektrodvigateli serii 4A: spravochnik* [Induction motors series 4A: reference book]. Moscow: Energoatomisdat, 1982. 504 p.
15. Shonin O.B., Pronko V.S. *Povishenie energeticheskoi effektivnosti glavnykh ventilyatornykh ustanovok shaht na osnove mnogocelovoi sistemi upravleniya chastotno-reguliruemim privodom* [Improving the energy efficiency of the main mine fan installations on the basis of multi-purpose variable frequency drive control system]. *St. Petersburg State Polytechnic University journal*. 2014, vol.195, no.2, pp. 49-57.
16. Zakharov P.A., Kryukov O.V. *Printsipy invariantnogo upravleniya elektroprivodami gazotransportnykh sistem pri sluchainykh vozmusheniyyah* [Principles of invariant control electronic gas transportation systems with random perturbations]. *"Vestnik of IGEU" journal*. 2008, vol. no.2, pp.1-7.

АНАЛИЗ СКОРОСТНЫХ РЕЖИМОВ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ СТАЛИ В УСЛОВИЯХ СТАНА 2000 ЛПЦ-11 ОАО «ММК» С ЦЕЛЬЮ МИНИМИЗАЦИИ ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Снизить расход электроэнергии без дополнительных финансовых затрат можно путем оптимизации технологии производства. С этой целью был разработан алгоритм обработки параметров процесса прокатки на стане 2000 ЛПЦ-11 ОАО «ММК», который обеспечивает минимизацию удельного расхода электроэнергии и реализацию корректировки скоростного режима.

Ключевые слова: холодная прокатка, электроэнергия, расход, математическая модель.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из приоритетных задач промышленности России является минимизация использования энергоресурсов по видам выпускаемой продукции. Снижение затрат на энергоресурсы позволит промышленным предприятиям страны уменьшить стоимость производства, цены на выпускаемую продукцию, тем самым обеспечить рост объема продаж [1].

Металлургия – наиболее крупный потребитель электроэнергии и других энергоресурсов: доля энергозатрат в себестоимости продукции черной металлургии составляет 20-25%, цветной металлургии – 15-20%. В ОАО «ММК» целенаправленно реализуется комплексная программа по повышению эффективности использования энергоресурсов, развивается и совершенствуется система их учета. В рамках ежегодно издаваемого приказа по энергосбережению ведется приборный учет покупных энергоресурсов – природный газ, электроэнергия, пожарно-питьевая вода (остальные виды энергоресурсов, которые используются в технологии, комбинат вырабатывает самостоятельно), осуществляется учет выработки и потребления собственных энергетических ресурсов [2].

Новый комплекс холодной прокатки стана 2000 предназначен для выпуска высококачественного холоднокатаного и оцинкованного металлопроката для нужд автомобилестроения, производителей бытовой техники и строительной отрасли. Для организации аналитики потребления электроэнергии в условиях стана 2000 ЛПЦ-11 ОАО «ММК» специалистами инжиниринговой компании ЗАО «КонсОМ СКС» было выполнено исследование скоростных режимов холодной прокатки. Целью проекта является получение объективной информации о реальном потреблении электроэнергии на производстве; анализ полученных данных с целью выявления потерь и неэффективного потребления электроэнергии; разработка мероприятий, позволяющих повысить энергоэффективность предприятий.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Количество электроэнергии, необходимое для прокатки одного рулона стали, определяется момен-

том, скоростью и временем прокатки. Момент прокатки прямо зависит от усилий прокатки.

Мощность прокатки определяется выражением

$$P = M \cdot \omega, \quad (1)$$

где P – мощность прокатки; M – момент прокатки; ω – угловая скорость валков.

С увеличением скорости будет расти мощность прокатки, а время прокатки – уменьшаться и наоборот.

Количество электроэнергии для прокатки одного рулона определяется как мощностью, так и временем прокатки:

$$W = \int P dt, \quad (2)$$

т.е. увеличение скорости прокатки уменьшает время, но увеличивает мощность прокатки. Очевидно, что для каждого сортамента существует скорость, при которой потребление электроэнергии для прокатки одного рулона будет минимальным.

Для решения поставленной задачи была сделана и обработана выборка следующих параметров:

- усилие прокатки;
- электрическая мощность;
- момент прокатки;
- скорость линии прокатки после пятой клетки.

Первые три параметра регистрировались для каждой клетки стана холодной прокатки 2000. Данные записывались за один час, при прокатке одного сортамента, с дискретой 5 с. Всего было сделано около 1000 записей, что позволило получить после обработки достоверные данные. Частичный объем выборки представлен в таблице.

На рис. 1, 2 приведены зависимость расхода электроэнергии для прокатки пяти и восьми рулонов соответственно при разных скоростях прокатки, построенные по таблице.

Установившиеся скорости для каждого рулона: 1 – 1149 м/мин; 2 – 1256 м/мин; 3 – 1273 м/мин; 4 – 1280 м/мин; 5 – 1290 м/мин.

Из графиков видно, что зависимость расхода электроэнергии от скорости прокатки, при прочих равных условиях, носит нелинейный характер и представляет из себя U-образную кривую с выраженным минимумом.

С другой стороны, уменьшение скорости прокатки ведет к снижению производительности, поэтому для определения оптимальной скорости прокатки, с целью минимизации расхода электроэнергии и сохранения приемлемой производительности стана, необходимо

оценивать удельный расход электроэнергии на тонну проката на основе выборки для всего сортамента ЛПЦ-11. Для достижения этой цели была разработана математическая модель, блок-схема которой приведена на рис. 3.

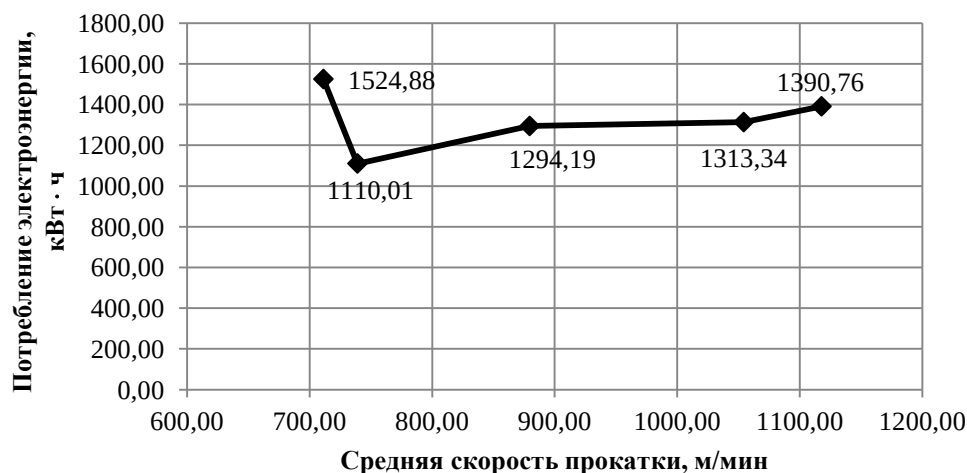


Рис. 1. Расход электроэнергии для прокатки пяти рулонов



Рис. 2. Расход электроэнергии для прокатки восьми рулонов

Частичный объем обрабатываемой выборки

TIMER	Усилие прокатки, клеть 1, кН	Эл. энергия, клеть 1, кВт·ч	Мощность прокатки, клеть 1, кВт	Усилие прокатки, клеть 2, кН	Эл. энергия, клеть 2, кВт·ч	Мощность прокатки, клеть 2, кВт	Усилие прокатки, клеть 3, кН	Эл. энергия, клеть 3, кВт·ч	Мощность прокатки, клеть 3, кВт	Скорость линии, м/мин
15:02:00	11523,54		301,20	11305,62		752,00	10429,54		719,00	179,99
15:02:00	11567,29	0,42	298,50	11124,08	1,04	714,00	10433,05	1,00	692,00	212,92
15:02:00	11668,94	0,41	305,90	10650,94	0,99	733,00	10076,96	0,96	1265,00	514,74
15:02:23	11607,81	0,42	889,80	10435,57	1,02	1923,00	9890,95	1,76	1830,00	619,90
15:02:28	11810,83	1,24	1180,90	10157,84	2,67	1924,00	9626,49	2,54	3177,00	938,22
15:02:33	11842,32	1,64	1594,30	10285,02	2,67	3694,00	9587,51	4,41	3095,00	1008,40
15:02:38	12210,59	2,21	2103,40	10345,99	5,13	3378,00	9595,52	4,30	4824,00	1110,29
15:02:43	11983,39	2,92	2017,80	10379,76	4,69	4107,00	9616,25	6,70	4837,00	1208,15
15:02:48	11898,16	2,80	2169,80	10372,54	5,70	4617,00	9619,75	6,72	4061,00	1208,15
15:02:53	11677,70	3,01	1977,20	10458,61	6,41	4555,00	9544,47	5,64	4061,00	1271,57
15:02:58	11712,07	2,75	2068,40	10557,98	6,33	4764,00	9559,40	5,64	4633,00	1324,07
15:03:03	12005,08	2,87	2365,50	10593,28	6,62	4987,00	9615,50	6,43	5435,00	1298,34
15:03:08	11675,87	3,29	2210,30	10499,82	6,93	4763,00	9626,04	7,55	4457,00	1273,75
15:03:13	11671,23	3,07	2080,40	10515,11	6,62	4764,00	9649,81	6,19	4153,00	1274,06
15:03:18	11776,06	2,89	2091,70	10621,19	6,62	4758,00	9651,27	5,77	4325,00	1274,23
15:03:23	11673,86	2,91	2205,70	10652,30	6,61	4946,50	9710,78	6,01	4308,50	1274,41
15:03:30	11750,78	3,06	2211,40	10544,96	6,87	4809,00	9726,11	5,98	4308,00	1274,71
15:03:35	11552,04	3,07	2236,00	10548,61	6,68	4877,00	9707,63	5,98	4310,00	1275,23
15:03:40	11290,64	3,11	2059,60	10699,91	6,77	4925,00	9682,15	5,99	4253,00	1276,38

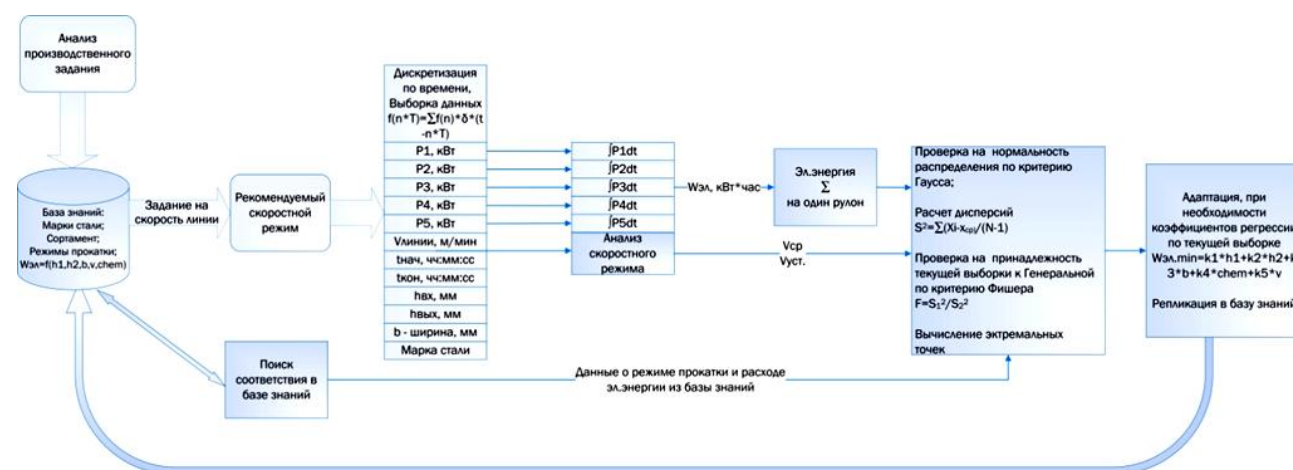


Рис. 3. Алгоритм работы математической модели

Алгоритм работы математической модели состоит из следующих шагов:

1. Анализ производственного задания.
2. Формирование задания на скорость технологической линии из базы знаний на основе информации об используемой марке стали, прокатываемого сортамента, режима прокатки и технологических параметров и рекомендуемый скоростной режим.
3. Выборка параметров прокатки с дискретизацией по времени.
4. Вычисление расхода электроэнергии на один рулон и анализ скоростного режима.
5. Проверка текущей выборки значений на принадлежность генеральной выборке, хранящейся в базе данных по критерию Фишера.
6. Адаптация при необходимости коэффициентов регрессии и репликация их в базу знаний.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренные в статье вопросы экономии электроэнергии и повышения энергоэффективности прокатного производства являются актуальными. В статье

рассмотрены скоростные режимы холодной прокатки стали для различного сортамента и марок сталей. Показано, что для каждого сортамента существует оптимальная с точки зрения расхода электроэнергии скорость прокатки. Разработанная адаптивная модель позволяет в реальном времени выбирать рекомендованную скорость прокатки для текущего сортамента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Оптимизация потребления энергоресурсов на предприятии / Е.С. Майорова, В.А. Ошурков, М.Г. Бубер, Л.С. Цуприк // Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве: сборник докладов IV Всерос. науч.-практ. конференции студентов, аспирантов и молодых учёных (ТИМ'2015) с международным участием, посвящённой 95-летию основания кафедры и университета (Екатеринбург, 26–27 марта 2015 г.). Екатеринбург: УрФУ, 2015. 384 с.
2. <http://www.mcena.ru/novosti/4725>.
3. <http://www.rudmet.ru/news/4870/>.
4. Основы инженерного эксперимента: учеб. пособие / Лукьянов С.И., Панов А.Н., Васильев А.Е. М.: ИЦ РИОР: НИЦ ИНФРА-М, 2014. 99 с.

INFORMATION IN ENGLISH

ANALYSIS OF HIGH-SPEED MODES OF STEEL COLD ROLLING TO MINIMIZE POWER CONSUMPTION IN WORKSHOP NO.11 AT OJSC «MAGNITOGORSK IRON AND STEEL WORKS»

Ishmetiev E.N., Chistyakov D.V., Panov A.N., Gusev K.E., Mayorova E.S.

Optimization of production processes helps to reduce electric power consumption without additional financial outlays. To achieve this objective an algorithm was developed, which makes it possible to manipulate cold rolling process parameters, minimize electric power consumption and adjust mill roll speed.

Keywords: Cold rolling, electric power, consumption, mathematical model.

REFERENCES

1. Mayorova E.S., Oshurkov V.A., Buber M.G., Tsuprik L.S. Optimizatsiya potrebleniya energoresursov na predpriyatii [Optimization of Power Consumption of Enterprise]. *Heat*

engineering and informatics in education, science and manufacture: collection of reports of IV All-Russian scientific conference of students, post-graduate students and young scientists (TIM'2015) with foreign participants devoted to the 95th anniversary of the Department and University foundation (Yekaterinburg, March 26–27, 2015). Yekaterinburg, UrFU, 2015, 384 p.

2. <http://www.mcena.ru/novosti/4725>
3. <http://www.rudmet.ru/news/4870/>
4. Lukyanov S.I., Panov A.N., Vasilyev A.E. *Basics of engineering experiment: training manual*. Moscow: Publishing center RIOR, NITs INFRA-M, 2014, 99 p.

Филиал ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» в г. Салавате

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПОВЫШЕНИЮ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННОЙ ПЛОЩАДКИ ЛИНЕЙНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОГО УПРАВЛЕНИЯ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ

Современная промышленная площадка линейно-производственного управления магистральных газопроводов представляет сложную техническую систему опасных производственных объектов, техническое состояние которых влияет на непрерывность и безопасность технологических процессов. Задача обеспечения надежности систем электроснабжения включает в себя целый комплекс технических, экономических и организационных мероприятий, направленных на сокращение ущерба от нарушения нормального режима работы потребителей электроэнергии. В работе предлагается осуществить модернизацию схемы электроснабжения промышленной площадки с помощью существующей резервной дизельной электростанции, которая автоматически обеспечивала бы электроснабжение промышленной площадки в автоматическом режиме при исчезновении, снижении, повышении уровня напряжения, обрыве фаз, нарушении порядка чередования фаз питающего трехфазного напряжения на секциях шин.

Ключевые слова: электроснабжение, оценка технического состояния, надежность, резервная дизельная электростанция, узел технологической связи, магистральный газопровод.

ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение надежности является одной из важнейших проблем при создании и эксплуатации любой технической системы. Особенно актуальна она для сложных систем, таких как системы электроснабжения [1-10]. Задача обеспечения их надежности включает в себя целый комплекс технических, экономических и организационных мероприятий, направленных на сокращение ущерба от нарушения нормального режима работы потребителей электроэнергии:

- выбор критериев и количественных характеристик надежности;
- испытания на надежность и прогнозирование надежности действующего оборудования;
- выбор оптимальной структуры проектируемых (реконструируемых) систем электроснабжения по критерию надежности;
- обеспечение заданных технических и эксплуатационных характеристик работы потребителей;
- разработка наиболее рациональной, с точки зрения обеспечения надежности, программы эксплуатации системы (обоснование режимов профилактических работ, норм запасных элементов и методов отыскания неисправностей).

Кроме того, в современных рыночных условиях надежность электроснабжения неразрывно связана с экономическими показателями и энергетической безопасностью промышленных предприятий.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ, ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ, ТЕХНИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДИКИ

Согласно ГОСТ 27.002-95 «Надежность в технике. Основные понятия, термины и определения» **надежность** определяется, как «способность объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах».

Применительно к электроэнергетическим системам, и в частности к системам электроснабжения, необходимо учитывать их большую размерность (по числу элементов и взаимосвязей между ними), зависимость от смежных технических систем (топливно-энергетического комплекса и технологии предприятия-потребителя) и неразрывность во времени процессов производства, распределения и потребления электроэнергии.

Поэтому под **надежностью электроснабжения** следует понимать непрерывное обеспечение потребителей электроэнергией заданного качества в соответствии с графиком электропотребления и по схеме, которая предусмотрена для длительной эксплуатации.

Электроприемники рассматриваемой промышленной площадки по надежности электроснабжения относятся ко второй категории. Промышленная площадка является структурным подразделением линейно-производственного управления магистральных газопроводов (ЛПУМГ).

На промышленной площадке расположены:

- радио-релейная станция, осуществляющая прием-передачу данных в ЦДС (центральную диспетчерскую службу) по объему, температуре, давлению и т.д. перекачиваемого газа в магистральных газопроводах (МГ);
- узел технологической связи (УТС), осуществляющий обслуживание, ремонт оборудования телефонной связи между объектами ЛПУМГ, газораспределительными станциями (ГРС), автомобильными газонаполнительными компрессорными станциями (АГНКС) и т.д.;
- котельная газовая сезонная, осуществляющая теплоснабжение, горячее водоснабжение зданий площадки;
- автозаправочная станция, ремонтно-механические мастерские, гаражи, склады, сварочный, токарный участки;
- служба безопасности (СБ), осуществляющая функции контроля внутри пропускного режима, состояние охранно-пожарной сигнализации, видеонаб-

людения.

Рассмотрим электроснабжение промышленной площадки по схеме, приведенной на рисунке.

Как видно из рисунка, электроснабжение ГПП-1 110/35 кВ РЭС осуществляет по двухцепной ВЛ 110 кВ от районной подстанции, находящейся на расстоянии 20 км, а электроснабжение ГПП-2 35/10 кВ РЭС – по двухцепной ВЛ 35 кВ на расстоянии 10 км от ГПП-1 110/35. Причем двухцепные ВЛ 110 кВ и ВЛ 35 кВ находятся на одной опоре.

Электроснабжение промышленной площадки от ГПП-2 35/10 кВ осуществляется по двум отдельным линиям электропередачи на стойках железобетонных, вибрированных (СВ 110) проводами АС. Промышлен-

ная площадка находится на расстоянии 0,5 км от ГПП-2 35/10 кВ.

Очевидно, что двухцепные ВЛ (110/35 и 35/10 кВ) РЭС, находящиеся на одной опоре, не могут являться независимыми, взаимно резервируемыми.

Если произошло повреждение двухцепной ЛЭП РЭС, требующее отключения обеих цепей (например, обрыв грозозащитного троса, одновременное разрушение изоляторов цепей), то электроснабжение потребителя прекращается на время ремонтных работ, что является недопустимым. Авария с одним источником электроснабжения (ЭС) не должна влиять на организацию ЭС с другого источника.

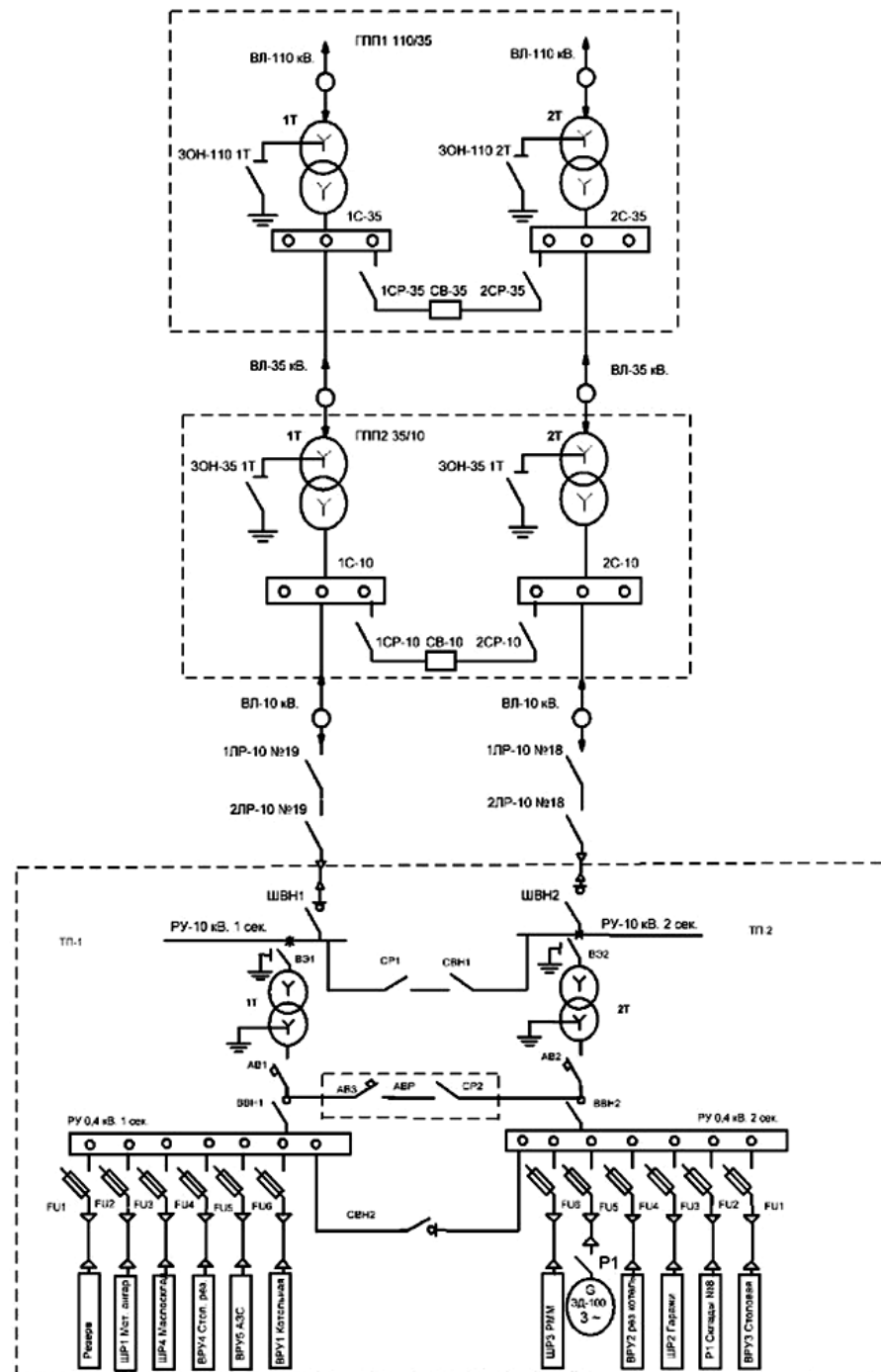


Схема электроснабжения промышленной площадки

Если произошла авария, например обрыв грозозащитного троса ЛЭП 110 кВ РЭС в нерабочее время, происходит отключение электроэнергии на площадке. На большинстве промышленных площадках линейно-производственного управления магистральных газопроводов установлена, как минимум, резервная дизельная электростанция (ДЭС), работающая в ручном режиме. Постоянный дежурный электротехнический персонал на площадке отсутствует. Запуск, включение ДЭС, восстановление электроснабжения площадки в нерабочее время, выходные, праздничные дни осуществляется аварийной восстановительной бригадой (АВБ), собранной согласно плану ликвидации аварий (ПЛА). Время сбора согласно ПЛА составляет 2,5 ч. В зимнее время, при неблагоприятных погодных условиях, длительный перерыв в электроснабжении площадки может привести к разморозке тепловых сетей, сетей теплопотребления, водяных калориферов приточных вентиляционных установок, размещенных в зданиях, цехах промышленной площадки, к прерыву телефонной связи, к отсутствию видеонаблюдения, контроля за пожарно-охранной сигнализацией зданий и т.д.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предлагается осуществить модернизацию схемы электроснабжения промышленной площадки с помощью существующей резервной дизельной электростанции, которая автоматически обеспечивала бы электроснабжение промышленной площадки в автоматическом режиме при исчезновении, снижении, повышении уровня напряжения, обрыве фаз, нарушении порядка чередования фаз питающего трехфазного напряжения на секциях шин ТП-1, ТП-2 площадки.

В настоящее время при аварийном отключении электроэнергии в нерабочее время, выходные, праздничные дни аварийное электроснабжение осуществляется следующим образом:

1. При исчезновении напряжения на обоих высоковольтных вводах ТП-1 и ТП-2 диспетчер узла технологической связи и служба безопасности докладывают диспетчерам по направлениям об отсутствии электроэнергии на площадке.

2. Осуществляется сбор оперативно-ремонтного персонала. Производится запуск электростанции, персонал действует согласно инструкции по переводу электроснабжения промышленной площадки на резервный источник.

3. Контроль за восстановлением электроснабжения по нормальной схеме производят по световой сигнализации в РУ-10 кВ. в первой и второй секции шин, или уточняют по телефонной связи у диспетчера РЭС.

Очевидно, что при существующей схеме (см. **рисунки**) электроснабжения промышленной площадки восстановление нормальной схемы электроснабжения занимает в среднем 2,5 ч, что нежелательно, особенно в зимнее время. Поэтому необходимо внедрение на промышленной площадке линейно-производственного управления магистральных газопроводов устройств автоматического ввода резерва (АВР), обеспечивающих восстановление электроснабжения промышленной площадки в автоматическом режиме.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Газизова О.В., Абдулхаликова А.А. Исследование пропускной способности питающих линий электропередачи крупного промышленного энергетического узла // Электротехнические системы и комплексы. 2014. №2(23). С.48-52.
2. Муллакаев М.С. Ультразвуковая интенсификация технологических процессов добычи и переработки нефти, очистки нефтезагрязненных вод и грунтов: дис. ... д-ра техн. наук. Московский государственный университет инженерной экологии. М., 2011. 391 с.
3. Прахов И.В., Фарваев И.Р., Бикметов А.Г. Влияние человеческого фактора на безопасную эксплуатацию электрических сетей // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. 2015. № 1. С. 27-30.
4. Математическое моделирование систем электроснабжения, обеспечивающих безотказную работу / А.С. Хисматуллин, А.Г. Хисматуллин, Е.И. Буланкин., А.Р. Камалов // Современные наукоемкие технологии. 2016. № 1-1. С.51-54.
5. Хисматуллин А.С., Вахитов А.Х., Феоктистов А.А. Исследование теплопереноса в промышленных силовых трансформаторах с элегазовым охлаждением под воздействием вибрации // Успехи современного естествознания. 2015. № 12-0. С. 173-176.
6. Хисматуллин А.С., Гареев И.М. Исследование переноса интегрального параметра в жидкости с газовыми пузырьками // Экологические системы и приборы. 2015. № 7. С.38-42.
7. Bashirov M.G., Minlibayev M.R., Hismatullin A.S. Increase of efficiency of cooling of the power oil transformers // Электронный научный журнал. Нефтегазовое дело. 2014. № 2. С. 358-367.
8. Huang D., Wu Z., Sundén B., Li W. A brief review on convection heat transfer of fluids at supercritical pressures in tubes and the recent progress // Applied Energy. 2016. Т. 162. С. 494-505.
9. Nigmatullin R.I., Filippov A.I., Khismatullin A.S. Transcillatory heat transfer in a liquid with gas bubbles // Thermophysics and Aeromechanics. 2012. Т. 19. С.589.
10. Wang N., Zhou J., Pan Y., Wang H. Experimental investigation on flow patterns of RP-3kerosene under sub-critical and supercritical pressures // Acta Astronautica. 2014. Т. 94. № 2. С.834-842.

INFORMATION IN ENGLISH

RECOMMENDATIONS FOR IMPROVING THE RELIABILITY OF ELECTRICITY SUPPLY AT INDUSTRIAL SITE OF LINEAR PIPE OPERATION

Bashirov M.G., Gribovsky G.N., Gallyamov R.U., Gareev I.M., Khismatullin A.S.

Modern industrial site linear production of main gas pipelines management is a complex technical system of hazardous production facilities, one of the elements of which is the reliability of power supply, the technical condition, which

affects the continuity and safety of production processes. The task of ensuring the reliability of power supply system includes a set of technical, economic and organizational measures aimed at reducing the damage caused by violations of normal operation of

electricity consumers. The paper proposes to modernize the power supply scheme of the production site, using existing backup diesel power plant, which would automatically provide power supply for the industrial site in the automatic mode with the disappearance, reducing, increasing the voltage level, phase failure, violation of order of phase rotation of the supply three-phase voltage on the bus sections.

Keywords: Power supply, evaluation of technical condition, reliability, backup diesel power plant, technological communication center, the main gas pipeline.

REFERENCES

1. Gazizova O.V., Abdulhalikova A.A. Issledovanie propusknoy sposobnosti pitayuschikh liniy elektropredachi krupnogo promyshlennogo energeticheskogo uzla [Research of transmission line transfer capacity of large industrial energy hub]. *Electrotechnical systems and complexes*. 2014, no.2(23), pp.48-52.
2. Mullakaev M.S. *Ultrazvykovaya intensifikatsiya tekhnologicheskikh protsessov dobychi i pererabotki nefti, ochistki neftezagryaznennykh vod i gruntov* [Ultrasonic intensification of technological processes of extraction and processing of oil, cleaning oil-polluted water and soil]. Doctoral thesis in Engineering. Moscow State University of Environmental Engineering. Moscow. 2011, 391 p.
3. Prahov I.V., Farvaev I.R., Bikmetov A.G. Vliyanie chelovecheskogo faktora na bezopasnuyu ekspluatatsiyu elektricheskikh setey [Impact of human factors on electrical network safe operation]. *Transport and storage of petroleum products and hydrocarbons*. 2015, no.1, pp.27-30.
4. Hismatullin A.S., Hismatullin A.G., Bulankin E.I., Kamalov A.R. Matematicheskoe modelirovanie system elektrosnabzheniya obespechivayuschikh bezotkaznuyu raboty [Mathematical modeling of power systems providing reliable operation]. *Modern high technologies*. 2016, no.1-1, pp.51-54.
5. Hismatullin A.S., Vahitov A.K., Feoktistov A.A. Issledovanie teploperenosa v promyshlennykh silovyykh transformatorakh s elegazovym ohlazhdeniem pod vozdeystviem vibratsii [Investigation of heat transfer in industrial high-voltage gas-insulated transformers cooled under the influence of vibration]. *Successes of modern science*. 2015, no.12-0, pp.173-176.
6. Hismatullin A.S., Gareev I.M. Issledovanie perenosa integralnogo parametra v zhidkosti s gazovymi puzyrkami [Research of integral parameter transfer in a liquid with gas bubbles], *Ecological systems and devices*. 2015, no.7, pp.38-42.
7. Bashirov M.G., Minlibayev M.R., Hismatullin A.S. Increase of efficiency of cooling of power oil transformers. *Electronic Journal of Oil and Gas Business*. 2014, no.2, pp.358-367.
8. Huang D., Wu Z., Sundén B., Li W. A brief review on convection heat transfer of fluids at supercritical pressures in tubes and the recent progress. *Applied Energy*. 2016, vol.162, pp.494-505.
9. Nigmatulin R.I., Filippov A.I., Khismatullin A.S. Transcillatory heat transfer in a liquid with gas bubbles. *Thermophysics and Aeromechanics*. 2012, vol.19, pp.589.
10. Wang N., Zhou J., Pan Y., Wang H. Experimental investigation on flow patterns of RP-3kerosene under sub-critical and supercritical pressures. *Acta Astronautica*. 2014, vol.94, no.2, pp.834-842.

Информация о других журналах издательства

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

Издается с 2003 г.

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

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

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

Электронная версия журнала доступна:

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

ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ

УДК 621.316

Макаров А.Н., Кузнецов А.В.

ФГБОУ ВПО «Тверской государственный технический университет»

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТОЛЩИНЫ СЛОЯ ШЛАКА И ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ВЫДУВАНИЯ НА КПД ДУГ В ДУГОВЫХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧАХ

В статье рассмотрены основные причины тепловых потерь излучением и возможности их уменьшения в дуговой сталеплавильной печи трехфазного тока. По результатам исследования представлена зависимость КПД дуги от высоты слоя шлака. Выявлена зависимость КПД дуги от электрического режима и соотношения заглубления дуги в металл и шлак к длине дуги.

Ключевые слова: дуговая сталеплавильная печь, электрическая дуга, заглубление, электромагнитное выдувание.

ВВЕДЕНИЕ

С разработкой авторами методики расчета КПД дуг появилась возможность анализировать влияние толщины слоя шлака на КПД дуг и расход электроэнергии в дуговых сталеплавильных печах (ДСП).

В дуговой сталеплавильной печи в начале и середине периода плавления шихты электрические дуги экранируются ломом. По мере расплавления металлошихты происходит открытие дуг, что вызывает интенсивное облучение стен и свода. Электрические дуги образуют в расплаве мениск и частично погружаются в него, однако этого недостаточно для экранирования электрических дуг. Поэтому на современных ДСП для уменьшения тепловых потерь излучением электрической дуги на стены и свод, а также увеличения срока службы водоохлаждаемых панелей используют экранирование электрических дуг вспененным шлаком [1]. Использование устройств для вспенивания шлака позволяет достичь высокого КПД дуг и низкого удельного расхода электроэнергии на печах [2]. Толщина слоя шлака в печах трёхфазного тока (ДСПТТ), как и в дуговых сталеплавильных печах постоянного тока (ДСПСТ) вместимостью 150 т, составляет 250-500 мм.

ИССЛЕДОВАНИЯ И РАСЧЕТЫ

Проведённые нами расчеты для ДСП-100 показали, что при увеличении высоты шлака на 28% до $h_{ш} = 450$ мм, при которой отношение высоты заглубления h_3 к длине дуги l_d составляет $h_3/l_d = 1,2$ и торец электрода находится на 100 мм ниже уровня шлака, КПД дуги увеличивается на 6% $\eta_d = 0,73$. При $h_{ш} = 550$ мм, $h_3/l_d = 1,4$, $\eta_d = 0,76$, при $h_{ш} = 100$ мм, $h_3/l_d = 0,5$, $\eta_d = 0,51$. При отсутствии шлака $h_{ш} = 0$, $h_3/l_d = 0,3$, $\eta_d = 0,47$. Результаты расчетов сведены в таблицу.

По данным таблицы построен график $\eta_d = f(h_3/l_d)$ (рис. 1). Как видно из рис. 1 и данных таблицы, при отсутствии шлака КПД дуги низкий $\eta_d = 0,47$, с ростом высоты шлака КПД дуги увеличивается и принимает предельное значение $\eta_d = 0,76$ при высоте шлака $h_{ш} = 550$ мм, оставаясь практически неизменным при дальнейшем увеличении высоты шлака. Таким образом, вследствие выдувания дуги в высокомошных

ДСПТТ достичь КПД дуги выше 0,76 практически невозможно, так как дуга выбрасывает из углубления шлак, металл и выходит в конце полупериода протекания тока на поверхность жидкометаллической ванны, излучая около одной четвертой своей мощности в объем печи, заполненный газом, и на водоохлаждаемые панели стен и свода. При полностью погруженной в металл и шлак дуге вследствие электромагнитного выдувания 24% мощности дуги излучается в свободное пространство, поглощается внутривспенными газами и водой стеновых и сводовых панелей и уносится из печи в виде потерь.

На рис. 1 изображены результаты аналитического исследования влияния электромагнитного выдувания и высоты слоя шлака на КПД дуг. С увеличением высоты слоя шлака КПД дуг увеличивается.

Зависимость КПД дуги от высоты слоя шлака в дуговой сталеплавильной печи трехфазного тока

l_d , мм	$h_{ш}$, мм	h_3 , мм	h_3/l_d	η_d
500	0	150	0,3	0,47
500	100	250	0,5	0,51
500	350	500	1,0	0,67
500	450	600	1,2	0,73
500	550	700	1,4	0,76

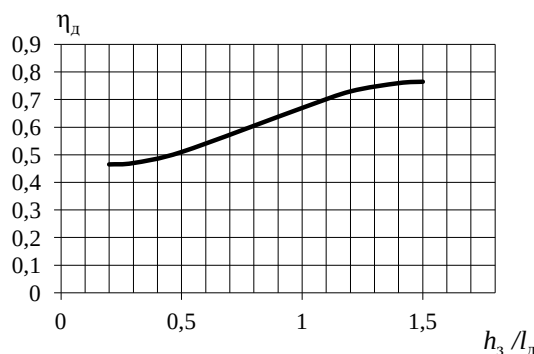


Рис. 1. Зависимость КПД дуги от отношения высоты заглубления дуги в металл и шлак к длине дуги для печи ДСП-100, $U_d = 500$ В, $I_d = 50$ кА

Большую часть жидкого периода плавки высокомошные ДСП работают с КПД дуги $\eta_d = 0,57-0,69$. При высоте шлака в высокомошных дуговых сталеплавильных печах трехфазного тока $h_{ш} = 450-550$ мм мож-

но достичь предельного КПД дуги $\eta_d = 0,73-0,76$, дальнейшее увеличение высоты шлака не приводит к увеличению КПД дуги и снижению удельного расхода электроэнергии.

Результаты аналитического исследования КПД дуг подтверждены экспериментальными исследованиями на 120-т ДСП в ОАО «Уральская сталь» [3]. На опытных плавках вспенивание шлака проводили вдуванием углеродосодержащего материала с помощью инжекторов и присадкой коксовой мелочи через отверстие в своде. Анализировали изменение технико-экономических показателей работы ДСП от толщины вспененного шлака. Из результатов исследования [3] следует, что при увеличении высоты слоя шлака с 238 до 356 мм расход электроэнергии снизился с 260 до 203 кВт·ч/т жидкой стали, что объясняется уменьшением тепловых потерь дуги, повышением КПД дуги вследствие увеличения толщины шлака и улучшения экранирования излучения дуги шлаком.

Анализ электромагнитных сил в дуговых сталеплавильных печах трехфазного тока показал, что на дугу воздействуют две электромагнитные силы – осевая F_1 и отклоняющая F_2 . Осевая электромагнитная сила оказывает положительное влияние на теплообмен, так как под действием осевой силы дуга горит соосно с электродом, погружается в металл и шлак, и полезная мощность, усваиваемая металлом, и КПД дуги увеличиваются [4]. Отклоняющая электромагнитная сила оказывает отрицательное влияние на теплообмен, так как под действием отклоняющей силы дуга выдувается из-под электрода в сторону стенок, ее излучение в свободное пространство увеличивается, а на металл и шлак уменьшается, полезная мощность и КПД дуги уменьшаются. Из осуществленного анализа следует, что для повышения КПД дуг необходимо уменьшить или устранить отклоняющую электромагнитную силу, которую создает ток, протекающий горизонтально по ванне металла.

Электромагнитное выдувание можно уменьшить, изменив электрический режим печи. Исследование влияния электромагнитного выдувания и заглабления дуг в металл и шлак на коэффициент полезного действия дуги было проведено на ДСП 100-150-т. Диапазон изменения напряжения на дуге составлял от 150 до 500 В, ток дуги от 40 до 60 кА. Результаты расчета зависимости КПД дуг от соотношения высоты заглабления дуги к длине дуги и электрического режима приведены на **рис. 2**. Как видно из этого рисунка, чем больше соотношение высоты заглабления дуги к длине дуги, тем больше КПД дуги. Электрический режим влияет на КПД дуги следующим образом. В первом электрическом режиме дуга короче, ток дуги больше, восстанавливающая электромагнитная сила больше и дуга меньше выдувается из-под электрода. Во втором электрическом режиме дуга длиннее, ток дуги меньше, восстанавливающая сила меньше и дуга далеко выдувается из-под электрода, ее излучение на стены и свод возрастают (**рис. 3**). Потери мощности во втором случае выше.

Как видно из **рис. 2, 3**, чем больше соотношение h_3/l_d , тем больше дуга заглаблена в металл и шлак, больше доля мощности дуги, усваиваемая металлом, и тем меньше мощности излучения дуги выходит наружу

из заглабления в металле и шлаке, тем меньше потери мощности дуги. И наоборот, чем меньше соотношение h_3/l_d , тем меньше дуга заглаблена в металл и шлак, меньше излучение дуги на металл и больше мощности излучения дуги выходит наружу из заглабления в металле и шлаке, тем больше потери мощности дуги.

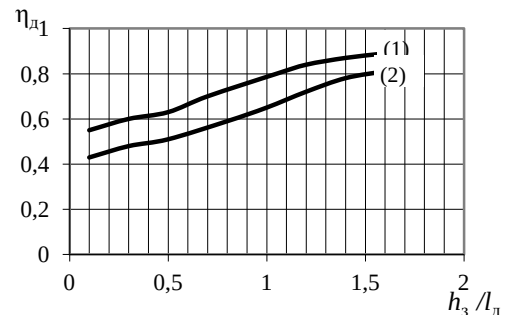


Рис. 2. Зависимость КПД дуги (η_d) от соотношения высоты заглабления к длине дуги и электрического режима: 1 – $U_d = 200$ В, $I_d = 60$ кА; 2 – $U_d = 500$ В, $I_d = 50$ кА

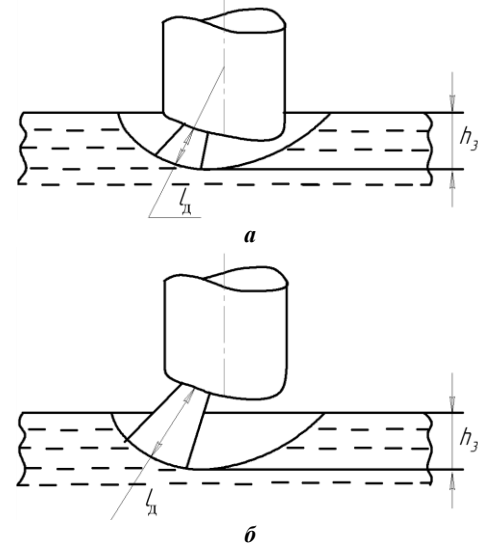


Рис. 3. Внешний вид (разрез) углубления в металле, дуги, электрода для двух электрических режимов:
а – $I_d = 60$ кА, $U_d = 200$ В, $h_3/l_d = 1,5$, $l_d = 200$ мм, $h_3 = 300$ мм, $h_{ш} = 120$ мм, $\eta_d = 0,86$;
б – $I_d = 50$ кА, $U_d = 500$ В, $h_3/l_d = 1,2$, $l_d = 500$ мм, $h_3 = 600$ мм, $h_{ш} = 450$ мм, $\eta_d = 0,75$

В результате выполненных нами расчетов выявлена зависимость КПД дуги от электрического режима и соотношения заглабления дуги в металл и шлак к длине дуги: чем больше это соотношение, тем больше КПД дуги. При превышении высотой заглабления длины дуги в 1,5 раза КПД дуги равен 80-86%, при равенстве высоты заглабления и длины дуги КПД дуги – 65-78%, при превышении длины дуги высоты заглабления на 25% КПД дуги – 45-55% [4].

Проведенными исследованиями установлено, что вследствие электромагнитного выдувания в дуговых сталеплавильных печах трехфазного тока достичь КПД дуги равным единице практически невозможно даже при полутора-, двухкратном заглаблении дуги, то есть таком заглаблении, когда длина дуги в 1,5-2 раза меньше высоты заглабления и дуга горит ниже уровня ванны металла вследствие потерь мощности дуги на излучение, исходящее наружу из заглабления в метал-

ле. Уменьшить электромагнитное выдувание дуги из-под электрода, расход электроэнергии за плавку можно, регулируя электрический режим работы печи, однако диапазон регулирования электрического режима в современных ДСП невелик [5].

Для устранения отклоняющей электромагнитной силы необходимо, чтобы ток на всем пути электрод, дуга, ванна жидкого металла не менял своего направления, то есть чтобы ось тока в ванне металла совпадала с осью электрода. Такой путь тока существует в дуговых сталеплавильных печах постоянного тока с двумя электродами, одним сводовым графитовым и одним водоохлаждаемым подовым, установленным соосно с графитовым электродом. В этих печах путь тока по ванне металла вертикальный и отклоняющая электромагнитная сила отсутствует. Вертикального направления тока в ванне металла ДСПТТ можно достичь при питании дуг от трех независимых фазных цепей и установке трех подовых электродов таким образом, чтобы их оси симметрии совпадали с осями симметрии трех графитовых электродов [6]. Зарегистрирован способ плавки стали в ДСП тремя вертикальными дугами с их заглублением в жидкий металл [7] и независимым питанием от трех независимых фазных цепей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная методика расчета КПД дуг позволяет анализировать влияние толщины слоя шлака на КПД дуг и расход электроэнергии в дуговых сталеплавильных печах. В современных ДСП даже при полно-

стью погруженных дугах в шлак в результате излучения дуг в свободное пространство и на водоохлаждаемые панели, мощность потерь дуг может составлять 30% их мощности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Роль вспенивания шлака в оптимизации тепловой работы ДСП переменного тока / П. Поррачин, Д. Онести, А. Гроссо, Ф. Миани // *Сталь*. 2005. №44. С.84-86.
2. Кожухов А.А. Исследование роли металлургических окатышей при вспенивании шлака в современных ДСП // *Электрометаллургия*. 2012. №12. С.11-16.
3. Влияние массы металлошихты и толщины шлака на технологию выплавки стали с дуговой печи / М.С. Кузнецов, Е.В. Якушев, С.А. Кулагин, Г.И. Котельников, А.Е. Семин, К.Л. Косырев, Р.С. Кулиш // *Электрометаллургия*. 2010. №2. С. 2-6.
4. Макаров А.Н. Теплообмен в электродуговых и факельных металлургических печах и энергетических установках: учеб. пособие. СПб.: Издательство Лань, 2014. С.267-268.
5. Макаров А.Н., Окунева В.В., Галичева М.К. Повышение энергоэффективности электродуговых и факельных металлургических печей // *Вестник Тверского государственного технического университета*. 2015. Вып. 28. С.43-48.
6. Пат. 2333438 РФ, МКИ F27B 3/08. Дуговая сталеплавильная печь трехфазного тока / А.Н. Макаров, Ю.А. Шарова, В.Ю. Галкин // *Изобретения*. 2008. №25.
7. Пат. 2368670 РФ, МКИ C21C 5/52. Способ плавки стали в дуговой сталеплавильной печи трехфазного тока / А.Н. Макаров, А.Ю. Соколов // *Изобретения*. 2009. №27.

INFORMATION IN ENGLISH

RESEARCH OF THE EFFECT OF SLAG LAYER DEPTH AND ELECTROMAGNETIC BLOWING ON ARC EFFICIENCY IN ARC STEEL MELTING FURNACES

Makarov A.N., Kuznetsov A.V.

The article discusses the main reasons causing heat losses by radiation and the opportunities to decrease them in a three phase arc steel melting furnace. According to the results of the study, the relation between the arc efficiency and the slag layer depth is presented. The investigation revealed the relation between the arc efficiency and electric regime and the ratio of arc penetration into the metal and slag to the arc length.

Keywords: Arc steel melting furnace, electric arc, penetration, electromagnetic blowing.

REFERENCES

1. Porrachin P., Onesti D., Grosso A., Miani F. Rol vspenivaniya shaka v optimizaciy teplovoy raboty DSP peremennogo toka [Role of Slag Foaming in Optimization of Thermal Operation of AC Electric Arc Furnace]. *Steel*. 2005, no.44, pp.84-86.
2. Kozhukhov A.A. Issledovanie roli metallizirovannykh oratyshei pri vspenivaniy shlaka v sovremennykh DSP [Role of Metallized Pellets in Slag Foaming in Modern Arc Steelmaking Furnaces]. *Electrometallurgy*. 2012, no.12, pp.11-16.
3. Kuznetsov M.S., Yakushev E.V., Kulagin S.A., Kotelnikov

G.I., Semin A.E., Kosyrev K.L., Kulish R.S. Vliyanie massy metallosihty i tolshiny shlaka na tehnologiyu vyplavki stali v dugovoi pechi [Effect of Metal Charge Mass and Slag Thickness on Technology of Steel Making in Arc Furnace]. *Electrometallurgy*. 2010, no.2, pp.2-6.

4. Makarov A.N. *Teploobmen v elektrodugovykh i fakelnykh metallurgicheskikh pechakh i energeticheskikh ustanovkakh* [Heat Exchange in Electric Arc and Torch Furnaces and Metallurgical Power Plants]. Textbook. Saint-Petersburg. Publishing house "LAN". 2014, pp. 267-268.
5. Makarov A.N., Okuneva V.V., Galicheva M.K. Povyshenie energoeffektivnosti elektrodugovykh i fakelnykh metallurgicheskikh pechey [Energy Efficiency Improvement of Electric Arc and Torch Furnaces]. *Vestnik of Tver State Technical University*. 2015, vol.28, pp.43-48.
6. Makarov A.N., Sharov Y.A., Galkin V.Y. *Dugovaya staleplavilnaya pech trehfaznogo toka* [Three-phase Electric Arc Furnace]. Patent RF, no.2333438, 2008, no.25.
7. Makarov A.N., Sokolov A.Yu. *Sposob plavki stali v dugovoi staleplavilnoi pechi trehfaznogo toka* [Method of Melting Steel in Three-phase Electric Arc Furnace] Patent RF no. 2368670 C21C 5/52, 2009, no.27.

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЕ АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ, ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПРЕИМУЩЕСТВА И ОПТИМИЗАЦИЯ СЕБЕСТОИМОСТИ ИХ СОЗДАНИЯ

В работе показано, что повышение класса энергоэффективности асинхронных двигателей в европейских странах достигается увеличением массы активных материалов. Это повышает стоимость электродвигателей. В Российской Федерации высокий класс энергоэффективности асинхронных двигателей достигается не за счет увеличения массы активных материалов, как это принято у европейских производителей, а за счет перераспределения массы меди одной трехфазной обмотки статора на две трехфазные обмотки и применения малогабаритного компенсирующего устройства – трехфазного конденсатора регламентированной емкости. Для создания энергоэффективных электродвигателей разработаны математические модели, алгоритм и программа для расчета и оптимизации стоимости капитального ремонта асинхронных электродвигателей с повышением класса энергоэффективности по стандарту IEG60034-30. Методика основана на учете технологических операций ремонта и модернизации асинхронных двигателей. Рассматриваются технологические операции традиционного ремонта и технологические операции ремонта с повышением класса энергоэффективности асинхронных двигателей. Трудозатраты и затраты материальных ресурсов рассчитываются по математическим моделям. Математические модели содержат параметры: номинальные данные ремонтируемого двигателя; размеры магнитной системы электрической машины; тип обмотки; форму паза; штатное расписание ремонтного участка; квалификацию ремонтного персонала; стоимость рабочего времени; длительность выполнения технологической операции; затраты материальных ресурсов и их цену; расходные коэффициенты. Результаты расчета трудовых и материальных затрат представляются пользователю по каждой технологической операции и ремонта в целом в виде таблиц и диаграмм. Разработка позволяет обосновать целесообразность модернизации традиционного асинхронного двигателя на асинхронный двигатель с индивидуальной компенсацией реактивной мощности ($\cos\varphi=1,0$) повышенного класса энергоэффективности и осуществлять оптимизацию затрат на его создание. Программный комплекс рекомендуется специалистам электромашиностроительных и электроремонтных предприятий.

Ключевые слова: математическая модель, алгоритм, расчет, оптимизация, программа для ЭВМ, технология, ремонт, модернизация, асинхронный двигатель, стоимость, энергоэффективность.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из направлений повышения энергоэффективности технологических участков промышленных предприятий является модернизация существующих электротехнических комплексов и систем на основе применения современных достижений науки и техники в области силовой электроники и электромашиностроения. Практикой доказано, что применение регулируемого электропривода переменного тока на основе частотных преобразователей (ПЧ) и асинхронных двигателей (АД) – систем «ПЧ-АД» позволяет экономить от 25 до 45% электрической энергии, повысить конкурентную способность выпускаемой продукции. Вместе с тем доля нерегулируемого асинхронного электропривода составляет не менее 65-70% от всего парка электроприводов переменного тока. В этих электроприводах, преимущественно, используются отечественные трехфазные асинхронные двигатели номинальной мощностью от 0,25 до 100 кВт, напряжением 380/220, 660/380 В с низким классом энергоэффективности IE1 по международному стандарту IEG60034-30 [1, 2].

Международный стандарт IEG60034-30 предусматривает ограничения на применение и изготовление АД с классом энергоэффективности IE1. Российское законодательство, директивные материалы правительства РФ обязывают потребителей и производителей АД изготавливать и применять в электротехнических комплексах асинхронные двигатели с высоким классом энергоэффективности – IE2, IE3. Применение таких АД, как показывает зарубежный опыт, позволяет по-

высить энергоэффективность электротехнических комплексов и систем на 2,5-4,5% [3-7]. Поэтому потребители и производители государств, входящих в ЕС, уже в 2015 году перешли на производство и применение АД с классом энергоэффективности IE2, IE3.

Повышение класса энергоэффективности АД в европейских странах достигается увеличением массы активных материалов – электротехнической стали, меди и алюминия. Повышение КПД АД на 1,5-3% достигается увеличением веса электротехнической стали на 30-35%, меди – на 20-25%, алюминия – на 10-20%. Это, естественно, повышает себестоимость и рыночную цену электрической машины. Для российских потребителей АД приобретение европейских энергоэффективных асинхронных двигателей, в связи с повышением курса доллара, становится недоступным, а отечественные производители АД продолжают выпускать двигатели низкого класса энергоэффективности IE1.

В ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» совместно с ООО НИИОКБ «Энергосбережение» и ООО «МГТУ-Энергосбережение +» (г. Магнитогорск) разработаны, исследованы, изготовлены и внедрены в различные электротехнические комплексы и системы опытно-промышленные энергоэффективные асинхронные двигатели (ЭАД) с классом энергоэффективности IE2, IE3.

Высокий класс энергоэффективности ЭАД достигается не за счет увеличения массы активных материалов АД, как это принято у европейских производителей, а за счет перераспределения массы меди одной трехфазной обмотки статора на две трехфазные обмотки и применения малогабаритного компенсирующего

устройства – трехфазного конденсатора регламентированной емкости.

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПРЕИМУЩЕСТВА ЭАД

Отличительная особенность технических характеристик ЭАД заключается в том, что он, в отличие от энергоэффективных АД зарубежных производителей, в установившихся режимах работы не потребляет от источника питания (электросети) реактивную мощность (реактивный ток) индуктивного характера. Коэффициент мощности ЭАД равен единице ($\cos\varphi=1,0$). Следовательно, при одинаковой полезной мощности АД и ЭАД последний потребляет значительно меньший ток. Например, трехфазный асинхронный двигатель с номинальной мощностью P_{2H} 5 кВт, частотой вращения магнитного поля $n_1=750$ об/мин, номинальным напряжением $U_H = 380/220$ В, $\eta_{HАД} = 90\%$, $\cos\varphi_{HАД} = 0,9$ и ЭАД такой же мощности, но с $\cos\varphi_{HЭАД} = 1,0$, $\eta_{HЭАД} = 0,92$ потребляют токи:

$$I_{1АД} = \frac{P_{2H}}{m \cdot U_H \cdot \eta_{HАД} \cdot \cos\varphi_{HАД}} =$$

$$= \frac{5000}{3 \cdot 220 \cdot 0,9 \cdot 0,9} = 9,35 А;$$

$$I_{1ЭАД} = \frac{P_{2H}}{m \cdot U_H \cdot \eta_{HЭАД} \cdot \cos\varphi_{HЭАД}} =$$

$$= \frac{5000}{3 \cdot 220 \cdot 0,92 \cdot 1,0} = 8,25 А.$$

То есть ЭАД потребляет из электросети ток, который меньше тока АД на 12 %. Ток ЭАД создает меньшие потери активной мощности в силовой цепи электропривода и системе электроснабжения технологического участка – кабелях, коммутирующей и защитной аппаратуре, шинпроводах, силовых трансформаторах.

Известно, что потери активной мощности ΔP пропорциональны квадрату тока I_1 и определяются известной формулой

$$\Delta P = m \cdot I_1^2 \cdot R_{\Sigma}, \quad (3)$$

где m – число фаз; I_1 – потребляемый ток; R_{Σ} – эквивалентное сопротивление силовой цепи электропривода и системы электроснабжения.

Сравним потери активной мощности от уменьшения тока ЭАД и выразим разницу потерь мощностей в процентах с потерями мощности от тока АД.

$$\Delta P = \Delta P_{АД} - \Delta P_{ЭАД}.$$

Токи, потребляемые АД и ЭАД, определяются отношениями:

$$I_{1АД} = \frac{K_3 P_{2H}}{m \cdot U_1 \cdot \eta_{АД} \cdot \cos\varphi_{АД}}; \quad (4)$$

$$I_{1ЭАД} = \frac{K_3 P_{2H}}{m \cdot U_1 \cdot \eta_{ЭАД} \cdot \cos\varphi_{ЭАД}}, \quad (5)$$

где K_3 – коэффициент загрузки двигателя; $\eta_{АД}$, $\eta_{ЭАД}$, $\cos\varphi_{АД}$, $\cos\varphi_{ЭАД}$ – коэффициенты полезного действия, коэффициенты мощности двигателей для заданных коэффициентов загрузки.

Выразим разность потерь активной мощности $\Delta P, \%$ в силовой части электротехнического комплекса для случаев применения АД и ЭАД зависимостью

$$\Delta P, \% = \left(\frac{\Delta P_{АД} - \Delta P_{ЭАД}}{\Delta P_{АД}} \right) \cdot 100, \quad (6)$$

или с учетом выражений (3)-(5) зависимость (6) примет вид

$$\Delta P, \% = \frac{(\eta_{ЭАД}^2 \cos^2\varphi_{ЭАД} - \eta_{АД}^2 \cos^2\varphi_{АД}) 100}{\eta_{ЭАД}^2 \cos^2\varphi_{ЭАД}}. \quad (7)$$

Например, для двигателей мощностью 5 кВт при заданных выше номинальных данных КПД, $\cos\varphi$ и $K_3 = 1$ уменьшение потерь активной мощности в силовой части электропривода от применения ЭАД составляет

$$\Delta P, \% = \frac{(0,92^2 1,0^2 - 0,9^2 0,9^2) \cdot 100}{0,92^2 1,0^2} = 22,5\%.$$

То есть для рассматриваемого примера снижение потерь активной мощности в электротехническом комплексе от применения ЭАД составляет 22,5%. При коэффициентах загрузки двигателей $K_3 < 1$ снижение потерь активной мощности возрастает, так как уменьшаются значения КПД и коэффициента мощности электрических машин.

Кроме того, применение ЭАД при проектировании новых электротехнических комплексов позволяет за счет уменьшения потребляемого тока снизить затраты на приобретение коммутирующей и защитной аппаратуры, кабельной продукции, силовых трансформаторов и шинпроводов системы электроснабжения. Применение ЭАД в действующих электротехнических комплексах позволяет сохранить ресурс вышеперечисленных элементов, увеличить энерговооруженность технологических участков, повысить средний взвешенный $\cos\varphi$.

Однако на создание ЭАД требуются дополнительные ресурсы – трудовые и материальные. Опыт создания ЭАД в условиях электроремонтных предприятий путем модернизации существующих АД при их капитальном ремонте показывает, что трудовые и материальные ресурсы увеличиваются на 15-28% от стоимости традиционного ремонта. Это обусловлено тем, что трудовые ресурсы растут за счет укладки в пазы статора двух трехфазных обмоток вместо одной трехфазной обмотки, применяемой при традиционном ремонте. Кроме того, возникают трудозатраты на пересчет обмоточных данных исходного двигателя на обмоточные данные ЭАД. Дополнительные ресурсы требуются на приобретение и создание блока компенсирующих конденсаторов.

При создании ЭАД, естественно, возникает проблема уменьшения дополнительных затрат. В этой связи разработаны алгоритм и программа для ЭВМ, по-

звolyающие количественно оценивать трудовые и материальные затраты [7]. Разработанный алгоритм и программа для ЭВМ не предусматривает оптимизацию вышеперечисленных затрат по заданным критериям.

ПОСТАНОВКА И РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ

В данном разделе исследования поставлена задача по разработке алгоритма и программы, позволяющих осуществлять не только расчет себестоимости создания ЭАД, но и ее оптимизацию по заданным критериям, с учетом условий и ограничений на модернизацию АД в ЭАД.

В основу разработки положены известный алгоритм и технология модернизации АД в ЭАД [2,7]. Эти разработки дополнены модулем оптимизации. Блок-схема расчета и оптимизации себестоимости модернизации АД в ЭАД представлена на **рис. 1**.

После ввода исходных данных (блок 2) и расчета трудовых и материальных затрат (блок 3) осуществляется выбор вариантов оптимизации (блок 4):

1) оптимизация по варианту 1 (блок 5) предусматривает минимизацию трудовых и материальных затрат для заданного времени ремонта (T_3) - так называемый «срочный ремонт»;

2) оптимизация по варианту 2 (блок 6) предусматривает минимизацию трудовых и материальных затрат при среднестатистическом времени ремонта T_{cp} .

Детализация алгоритма блока оптимизации по варианту 1 (блок 5) представлена на **рис. 2, а**. На **рис. 2, а**, блоки реализуют следующие функции:

- в блоке 5-1 осуществляется формирование вариантов сетевых моделей ремонта АД (модернизации АД в ЭАД) по критерию минимума себестоимости для заданного времени, T_3 ;

- в блоке 5-2 осуществляется расчет критического времени T_{ki} выполнения i -й технологической операции, а также всего ремонта и расчета себестоимости C_i по i -м технологическим операциям всех вариантов сетевых моделей; в блоке 5-3 осуществляется выбор наилучшего варианта сетевой модели, обеспечивающего минимум времени ремонта, т.е. осуществляется выбор критического времени ремонта

$$T_K = \sum_{i=1}^{i=n} T_{Ki} \leq T_3,$$

где n – число технологических операций;

- в блоке 5-4 осуществляется расчет трудовых C_T и материальных C_M затрат и их сумма $C = C_T + C_M$ для выбранного критического пути ремонта;

- в блоке 5-5 осуществляется сравнение суммарных затрат себестоимости C со среднестатистическими затратами C_{cp} на ремонт, рассчитанных в блоке 3. Если $C > C_{cp}$, расчет возвращается в блок 5-4 для минимизации трудовых ресурсов. Если $C \leq C_{cp}$, он принимается за оптимальный, и результаты подаются на вывод, блок 7.

При оптимизации по варианту 2 (**рис. 2, б**):

- в блоке 6-1 осуществляется формирование вариантов сетевых моделей ремонта (модернизации) по критерию минимума себестоимости при среднестатистическом времени ремонта;

- в блоке 6-2 осуществляется расчет себестоимости

$C = C_T + C_M$ и продолжительности ремонта T по вариантам сетевых моделей;

- на следующем этапе осуществляется выбор наилучшего варианта сетевой модели, обеспечивающего минимум себестоимости при среднестатистическом времени ремонта. Если $C > C_{cp}$, расчет возвращается в блок 6-2. Если $C \leq C_{cp}$ и время ремонта $T < T_{cp}$, он принимается за оптимальный и осуществляется вывод результатов, блок 7.

Принципиальный отличительный признак формирования вариантов сетевых моделей при оптимизации заключается в следующем.

Формирование вариантов сетевых моделей при оптимизации себестоимости по варианту 1 предусматривает:

- выполнение параллельно максимального числа технологических операций, т.е. используется принцип разделения операций во времени;

- выполнение технологических операций с привлечением всех исполнителей с учетом штатного расписания и их квалификации.

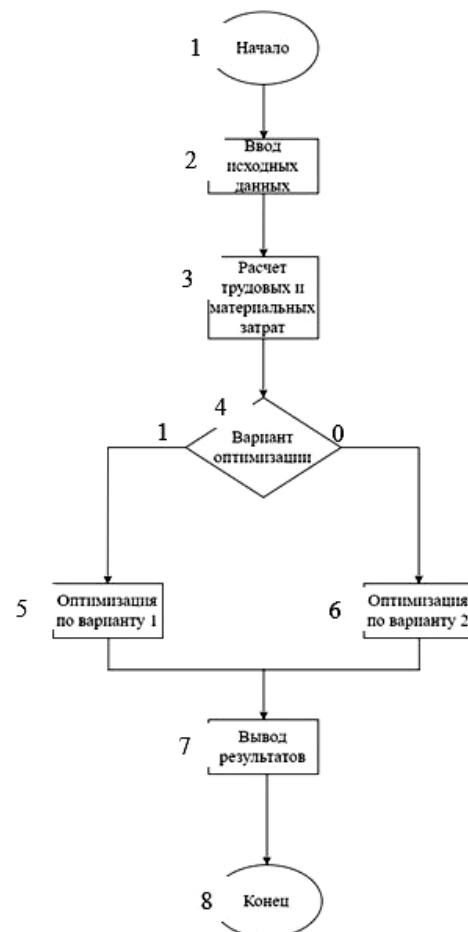


Рис. 1. Блок-схема расчета и оптимизации себестоимости модернизации АД в ЭАД

Принцип формирования вариантов сетевых моделей при оптимизации себестоимости по пути 2 предусматривает:

- привлечение минимального числа исполнителей для выполнения технологических операций;
- выполнение технологических операций в соответствии с базовой схемой ремонта (модернизации) [2].

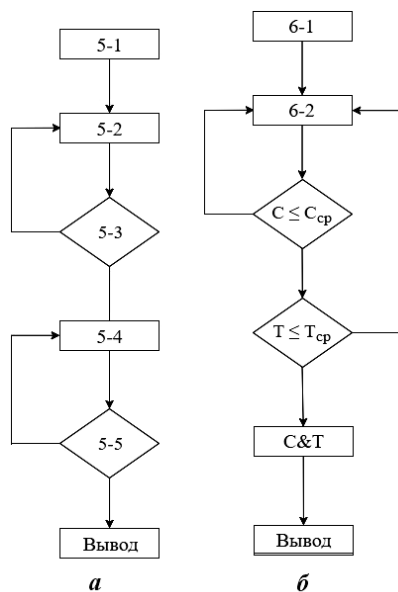


Рис. 2. Блок-схемы алгоритмов оптимизации по варианту 1 и 2

Формирование вариантов сетевых моделей при оптимизации по пути 1,2 осуществляется по логическим (переключательным) функциям, составленным на основе таблиц истинности.

При формировании вариантов сетевых моделей учитываются следующие условия и ограничения: число рабочих мест для выполнения i -й технологической операции; число специалистов с учетом их квалификации; возможность реализации i -й технологической операции одним или несколькими специалистами; число ремонтируемых (модернизируемых) электрических двигателей.

В таблицах истинности главными входными аргументами являются j -е специалисты m -й квалификации. Выходными аргументами таблицы истинности является реализация i -й технологической операции. Число вариантов сетевых моделей i -й технологической операции определяется уравнением $k=2^n$, где $n=j^m$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Асинхронные двигатели с индивидуальной компенсацией реактивной мощности (ЭАД), обладающие $\cos\varphi=1,0$ и электрическим КПД 90-91% с классом энергоэффективности IE1, эквивалентны европейским асинхронным двигателям, обладающим $\cos\varphi=0,9-0,92$ и электрическим КПД 91,5-93 % с классом энергоэффективности IE2, IE3.

Дополнительные затраты на создание асинхронных двигателей с индивидуальной компенсацией реактивной мощности в 1,5-2,5 раза ниже, чем на создание европейских энергоэффективных двигателей, требующих увеличение массы активных материалов электри-

ческой машины.

Моделирование себестоимости ремонта (модернизации) АД в ЭАД в условиях электроремонтных предприятий с применением разработанных алгоритма и программы показало:

- оптимизация по варианту 1 для заданного времени ремонта (T_3), так называемый «срочный ремонт», позволяет констатировать, что он требует увеличения трудозатрат C_T от 20 до 35%;
- оптимизация по варианту 2, предусматривающему минимизацию трудовых и материальных затрат при среднестатистическом времени ремонта, $T_{ср}$, позволяет уменьшить себестоимость ремонта (модернизации) не более 5-7 % за счет рационального использования трудовых ресурсов;
- разработка рекомендуется для специалистов электромашиностроительных и электроремонтных предприятий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мугалимов Р.Г. Асинхронные двигатели с индивидуальной компенсацией реактивной мощности и электроприводы на их основе: монография. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова. 2011. 250 с.
2. Мугалимов Р.Г., Мугалимова А.Р. Технология реконструкции традиционных асинхронных двигателей на энергосберегающие варианты // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2013. №1. С. 56-61.
3. Экспериментальные исследования энергосберегающих электроприводов насосных агрегатов / Р.Г. Мугалимов, В.И. Косматов, А.Р. Мугалимова, А.Р. Губайдуллин // Известия вузов. Электромеханика. № 4. 2011. С. 95-101.
4. Мугалимов Р.Г., Мугалимова А.Р. Определение емкости компенсирующего конденсатора асинхронного двигателя с индивидуальной компенсацией реактивной мощности // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 3: в 5 ч. Тула: Изд-во ТулГУ, 2010. Ч. 4. С. 115-120.
5. Мугалимов Р.Г., Косматов В.И., Мугалимова А.Р. Математическое описание электропривода на основе энергосберегающего асинхронного двигателя с индивидуальной компенсацией реактивной мощности // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2013. №2. С. 78-89.
6. Мугалимов Р.Г., Мугалимова А.Р., Боков А.И. Методика и аппаратно-программный комплекс для экспериментальной экспресс-оценки параметров схемы замещения асинхронных двигателей // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. 2014. Т.1, №2. С.44-50.
7. Мугалимов Р.Г., Закирова Р.А., Мугалимова А.Р. Программный комплекс для расчета и оптимизации себестоимости традиционного капитального ремонта и ремонта с повышением класса энергоэффективности асинхронных электродвигателей: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016610278. Зарегистрирован в Реестре программ для ЭВМ 11.01.2016 г.

INFORMATION IN ENGLISH

ENERGY EFFICIENT ASYNCHRONOUS MOTORS, THEIR TECHNICAL AND ECONOMIC ADVANTAGES AND COST OPTIMIZATION OF THEIR DEVELOPMENT

Mugалиmov R.G., Zakirova R.A., Mugalimova A.R.

It is shown that increasing the energy efficiency class of asynchronous motors in European countries makes it possible to increase the weight of active material. This increases the cost of electric motors. In the Russian Federation the highest energy efficiency class of asynchronous motors is achieved not by increasing the weight of active material, as is common among European manufacturers, but by the redistribution of mass of copper of a single three-phase stator winding into two three-phase windings and the use of small-sized compensating device such as a regulated three-phase capacitor capacitance. To create energy-efficient electric motors, the research group developed mathematical models, algorithms and programs for calculation and optimization of the cost of major repairs of asynchronous motors with energy efficiency class standard IEG60034-30. The technique is based on the account of repair and modernization of asynchronous motors during manufacturing operations. We consider the process steps of traditional maintenance and repair as technological operations with energy efficiency classes of asynchronous motors. Mathematical models calculate labor costs and the cost of material resources. Mathematical models contain the following parameters: nominal data of the repaired engine; dimensions of the magnetic system of the electric machine; coil type; groove shape; staffing the repair site; qualified maintenance personnel; the cost of working time; the duration of technological operations; costs of material resources and their price; coefficient of materials consumption. The calculation results are presented to the user on labor and material costs for each processing operation and repairs as a whole in the form of tables and diagrams. The development makes it possible to prove the feasibility of the modernization of a traditional asynchronous motor to a asynchronous motor with individual compensation of reactive power of high energy class and energy efficiency and to carry out optimization of its development costs. The software package is recommended to professionals and electric machine building and maintenance enterprises.

Keywords: Mathematical model, algorithm, calculation, optimization, computer software, technology, repair, modernization, induction motor, energy efficiency.

REFERENCES

1. Mugalimov R.G. *Asinkhronnye dvigateli s individualnoy kompensatsiyey reaktivnoy moshchnosti i elektroprivody na ikh osnove* [Induction Motors with Individual Compensation of Reactive Power and Electric Drives on Based on them]. Magnitogorsk, NMSTU. 2011, 250 p.
2. Mugalimov R.G., Mugalimova A.R. Technology for Reconstruction of Traditional Induction Motors to Energy Saving Variants. *Russian Internet Journal of Industrial Engineering*. 2013, no.1, pp. 56-61.
3. Mugalimov R.G., Kosmatov V.I., Mugalimova A.R., Gubaidullin A.R. Eksperimentalnye issledovaniya energosberegayushchikh elektroprivodov nasosnykh agregatov [Experimental Studies of Energy Saving Electric Drives of Pump Units]. *News of universities. Electromechanics*. 2011, no.4, pp. 95-101.
4. Mugalimov R.G., Mugalimova A.R. Opredeleniye yemkosti kompensiruyushchego kondensatora asinkhronnogo dvigatelya s individualnoy kompensatsiyey reaktivnoy moshchnosti [Definition of Capacity of Compensating Capacitor Induction Motor with Individual Reactive Power Compensation]. *Proceedings of TulGU. Technical sciences*. 2010, issue 3, vol.4, pp. 115-120.
5. Mugalimov R.G., Kosmatov V.I., Mugalimova A.R. Mathematical Description of Electric Drive Based on Energy-saving Induction Motor with Individual Reactive Power Compensation. *Russian Internet Journal of Industrial Engineering*. 2013, no.2, pp. 78-89.
6. Mugalimov R.G., Mugalimova A.R., Bokov A.I. Method and Firmware Complex for Experimental Rapid Assessments of Equivalent Circuit Parameters of Asynchronous Motor. *Russian Internet Journal of Electrical Engineering*. 2014, vol.1, no. 2, pp. 44-50.
7. Mugalimov R.G., Zakirova R.A., Mugalimova A.R. Software System for Calculation and Optimization of Cost of Traditional Overhaul and Repair to Increase Energy Efficiency Class of Induction Motors. Certificate of state registration of computer software 2016610278, registered in the Register of computer programs on 01.11.2016.

Информация о других журналах издательства

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

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

Электронная версия журнала доступна:

- на информационном портале ФГБОУ ВПО «МГТУ» www.mgtu.ru (раздел «Автоматизированные технологии и производства»);
- на платформе eLIBRARY;
- в научной электронной библиотеке КиберЛенинка.

ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА, АВТОМАТИКА И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

УДК 004.43

Посохов И.А.

ЗАО «РУТЬЮБ»

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ О КАЧЕСТВЕ НЕПРЕРЫВНОЛИТОЙ ЗАГОТОВКИ

Целью исследования в работе является повышение эффективности функционирования системы получения экспертной информации по результатам обработки и анализа изображений серных отпечатков непрерывнолитой заготовки. В ходе исследования рассмотрены вопросы анализа традиционных способов визуализации и получения экспертной информации о качестве непрерывнолитой заготовки, разработки специального математического и алгоритмического обеспечения классификации изображений серных отпечатков на основе формообразующих характеристик гистограммы яркости и нечетких множеств. Исследования проводились для машин непрерывного литья заготовок, используемых в технологической цепочке получения непрерывнолитых заготовок квадратного сечения в 2011–2015 годах. Исследования проводились с использованием методов системного анализа при исследовании способов получения экспертной информации о качестве непрерывнолитой заготовки; обработки и классификации изображений трех уровней контрастности; морфологической обработки изображения; теории нечетких множеств. В результате получены формализованное описание структуры изображения серного отпечатка, методика каскадной классификации изображений, структурированный показатель эффективности функционирования новой системы получения экспертной информации и многоуровневая адаптивная траектория обработки графической информации. Значения структурированных показателей эффективности продемонстрировали превосходство новой системы с учетом классификации изображений над традиционной визуальной в среднем на 25%.

Ключевые слова: графическая информация, визуализация, классификация изображений, серный отпечаток, непрерывнолитая заготовка.

ВВЕДЕНИЕ

Управление современным промышленным производством опирается на использование информации большого объема и различной природы. Одним из видов используемой информации в системах управления являются изображения, на основе которых принимается решение о качестве готовой продукции. В технологической цепочке получения металлургической продукции представлено несколько точек, в которых происходит сбор и обработка графической информации: участок подготовки шихтовых материалов, участок разлива стали и участок получения холоднокатаного листа. Все токи контроля образуют сложную систему, работающую в непрерывном цикле [1].

Сложность алгоритмов, используемых при получении и обработке графической информации, ограничивает диапазон ее применения, и до настоящего времени для получения и принятия решений привлекаются человеческие ресурсы, которые позволяют представить результаты экспертной оценки. Традиционная технология принятия решений на основе визуальной оценки вносит ошибки, обусловленные влиянием человеческого фактора и, в частности, квалификацией эксперта. До настоящего времени остается актуальным разработка специального математического и алгоритмического обеспечения для получения и обработки экспертной информации в металлургической промышленности. Наличие такого обеспечения позволяет снизить влияние человеческого фактора в процессе принятия решений о качестве продукции.

В области теории и практики визуализации, получения, анализа, обработки информации и принятия решений на основе изображений накоплен значитель-

ный опыт в работах российских и зарубежных ученых. Вопросы теоретического исследования специального математического и алгоритмического обеспечения представлены в трудах Вудса Р., Гонсалеса Р. [2], Varma V. [3], Zisserman A., Прэтта У., Шапиро Л. [4]. Труды Cannon R., Dave J., Визильтера Ю., Афанасьева А., Чинаева В. определяют алгоритмы сегментации изображений для принятия решений в картографии, медицине, биологии и других областях [5, 6]. Широкий круг работ, в том числе труды Vapnik V., Chapeiie O., Foddy G., Bar-Hen A., Кузьмицкого Н., посвящен развитию методов и алгоритмов классификации изображений и объектов регулярной формы [7, 8]. Возможность применения нечеткой логики к принятию решений и управлению системами /объектами обоснована в трудах Заде Л. [9], Wang F., Giordani P., Kiers H., Вятчина Д., Dave J., Gitman J., Тэрano Т. [10]. Для металлургической промышленности проводятся активные исследования в области проектирования и создания системы управления Спириным Н.А., Лавровым В.В., Цаплевым В.М., Ханзеным Ш., Логуновой О.С. [11–16].

Проведенный теоретико-информационный анализ показал, что до настоящего времени остаются актуальными проблемы в области обработки и использования графической информации:

1) в промышленных условиях формируются большие и сложные системы, для управления которыми используются все виды информации, в том числе и информация графического вида. Однако обработка и использование графической информации затруднены в силу принятия решений на основе уникального квалификационного опыта экспертов;

2) при наличии мощного теоретического аппарата и современных технических средств для обработки графической информации сложность сбора информа-

ции и ее последующего использования ограничивается отдельными узкоспециализированными задачами в промышленных условиях;

3) исследование в области обработки информации в узкоспециализированных областях не рассматривает применимость традиционных методов обработки графической информации в зависимости от параметров изображения, требующих разбиения изображения на классы, что приводит к трудоемкому интерактивному выбору параметров процедур предварительной обработки изображения и последующей сегментации.

Учитывая отраслевые особенности графической информации, получаемой при оценке качества непрерывнолитой заготовки, и существующие проблемы в области обработки и использования этой информации в системах управления, автором определена **цель** исследования: повышение эффективности функционирования системы получения экспертной информации по результатам обработки и анализа изображений серных отпечатков непрерывнолитой заготовки.

Для достижения поставленной цели автором в работе решены **задачи**:

1) анализ традиционных способов визуализации и получения экспертной информации о качестве непрерывнолитой заготовки для выявления их достоинств и недостатков, а также обоснование разработки системы получения экспертной информации на основе обработки изображений серных отпечатков;

2) разработка специального математического и алгоритмического обеспечения классификации изображений серных отпечатков на основе формообразующих характеристик гистограммы яркости;

3) разработка специального математического и алгоритмического обеспечения классификации изображений серных отпечатков на основе теории нечетких множеств;

4) обоснование и разработка структурированного показателя эффективности функционирования системы получения экспертной информации о качестве непрерывнолитой заготовки;

5) проведение вычислительного эксперимента для оценки эффективности применения каскадной методики классификации в системе получения экспертной информации о качестве непрерывнолитой заготовки.

АНАЛИЗ ТРАДИЦИОННЫХ СПОСОБОВ ВИЗУАЛИЗАЦИИ И ПОЛУЧЕНИЯ ЭКСПЕРТНОЙ ИНФОРМАЦИИ О КАЧЕСТВЕ НЕПРЕРЫВНОЛИТОЙ ЗАГОТОВКИ

Результаты анализа показали, что все металлургические предприятия имеют многостадийную структуру, включающую, как минимум, три основных взаимосвязанных передела: подготовительное производство, сталеплавильное производство и прокатное производство. Информация о качестве получаемой продукции формируется на основе экспертных оценок.

На этапе контроля поступивших материалов и качества полуфабрикатов используется традиционная экспертная визуальная оценка объекта, которая вносит в информацию субъективный фактор. В работе построена система визуализации и получения экспертной информации на основе изображения серного отпечатка. Подробная декомпозиция процесса получения экспертных оценок позволила выявить достоинства и не-

достатки каждого способа получения информации. Основными недостатками способа визуальной оценки изображения являются: наличие ошибочных решений при классификации дефектов непрерывнолитой заготовки; высокие трудовые затраты на подсчет и определение формы объектов нерегулярной формы; зависимость результата от опыта эксперта, определяющего качество заготовок. Автоматизированный способ получения экспертной информации также не лишен недостатков, среди которых наиболее существенным является отсутствие ответственности при неверно принятом решении о развитии дефектов заготовки.

Подробная декомпозиция процесса получения экспертных оценок позволила выявить достоинства и недостатки каждого способа получения информации (табл. 1 и 2).

Таблица 1
Достоинства и недостатки метода визуального получения экспертной информации о качестве непрерывнолитой заготовки

Достоинства	Недостатки
1. Высокая скорость получения результатов, получаемых на основе работы нейронов человеческого мозга	1. Наличие ошибочных решений при классификации дефектов непрерывнолитой заготовки
2. Однократное обучение эксперта с возможностью последующего накопления опыта проведения экспертизы	2. Высокие трудовые затраты на подсчет и определение формы объектов нерегулярной формы
3. Наличие лица, принимающего решения с ответственностью за получаемый результат	3. Зависимость результата от опыта эксперта, определяющего качество заготовки

Таблица 2
Достоинства и недостатки автоматизированного метода получения экспертной информации о качестве непрерывнолитой заготовки

Достоинства	Недостатки
1. Отсутствие ошибочных решений при классификации дефектов непрерывнолитой заготовки	1. Долгосрчный и трудоемкий процесс обучения системы классификации на большом количестве исходных данных
2. Отсутствие трудовых затрат на подсчет и определение формы объектов нерегулярной формы	2. Высокие требования к ресурсам памяти для хранения графической информации
3. Возможность многократного обучения системы на основе обучающих выборок и опыте экспертов	3. Отсутствие ответственности при неверно принятом решении о классификации

Изучение структуры изображения серного отпечатка позволило предложить его *формализованное описание* в виде структуры, которая в своем составе имеет элементы, характеризующие статистические параметры изображения (параметры гистограммы яркости), координаты положения каждого объекта нерегулярной формы, геометрические характеристики каждого объекта. Результат сегментации для каждого отдельного изображения может быть записан в виде

$$I = (O_1, O_2, \dots, O_n),$$

где n – количество объектов нерегулярной формы в структуре изображения; O_i – объекты нерегулярной формы, найденные на изображении I .

В свою очередь, каждый элемент вектора I также структурирован:

$$O_i = \{G_i(g_{0i}, g_{1i}, \dots, g_{255i}), x_i, y_i, S_i, a_i, b_i\},$$

$$i = 1 \dots n,$$

где $G_i(g_{0i}, g_{1i}, \dots, g_{255i})$ – вектор для описания частот яркости на гистограмме изображения при градации в 256 цветов; x_i, y_i – координаты объекта в пространстве изображения; S_i – площадь объекта; a_i, b_i – линейные размеры объекта.

Анализ существующего опыта использования и обработки графической информации показал наличие методов, методик и способов обработки информации, которые могут быть использованы для визуализации и разработки специального математического и алгоритмического обеспечения при построении системы получения экспертной информации с использованием новых технологий. Диссертационные исследования относятся к обработке статических изображений для оценки структуры материалов с использованием комбинированных методик, включающих методы статистики, теории нечетких множеств и экспертных оценок.

Для проведения диссертационных исследований в работе использованы три потока ретроспективной информации, поступающей в виде изображений серных отпечатков о качестве непрерывной заготовки: первый поток – июль–август 2011 года, включает 32 изображения для обучения системы; второй поток – июль–август 2013 года – 52 изображения для тестирования и обучения системы; третий поток – июнь–июль 2015 года – 22 изображения для опытной эксплуатации системы. Все изображения получены в условиях электросталеплавильного цеха ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» для машин непрерывного литья заготовок сортового типа.

СПЕЦИАЛЬНОЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КЛАССИФИКАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ СЕРНЫХ ОТПЕЧАТКОВ НА ОСНОВЕ ФОРМООБРАЗУЮЩИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГИСТОГРАММЫ ЯРКОСТИ

При проведении первой серии промышленного эксперимента-исследования собрано и изучено 32 изображения серных отпечатков, а также ретроспективная информация электронного паспорта плавки. Примеры изображений, соответствующих серным отпечаткам темплета после сканирования с разрешением 300 dpi, представлены на **рис. 1**.

На основании визуального исследования полученной группы изображений выдвинута гипотеза о разделении изображений на три эталонных класса: *класс А* – изображения с незначительным отличием яркости фона и объекта исследования; *класс В* – изображения со средним отличием яркости фона и объекта исследования; *класс С* – изображения с резким отличием яркости фона и объекта исследования.

Для каждого класса изображения построены усредненные гистограммы яркости (**рис. 2**), введены формообразующие характеристики: положение порога яркости – T ; положение максимума яркости слева от

порога – m ; положение максимума яркости справа от порога – M . Для определения значений формообразующих характеристик использован метод Оцу и построен алгоритм классификации изображений на основе формообразующих характеристик (**рис. 3**).

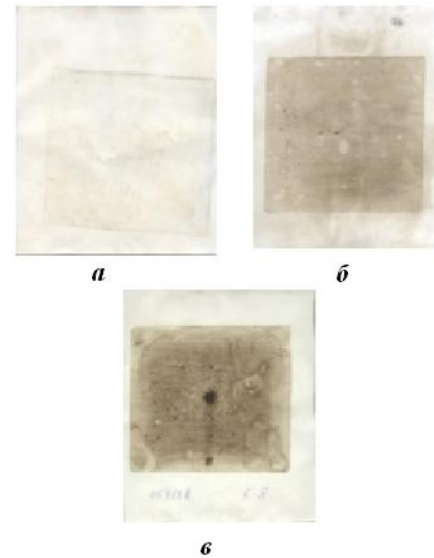


Рис. 1. Изображения серных отпечатков темплетов заготовок квадратного сечения: а – типовое изображение класса А; б – типовое изображение класса В; в – типовое изображение класса С

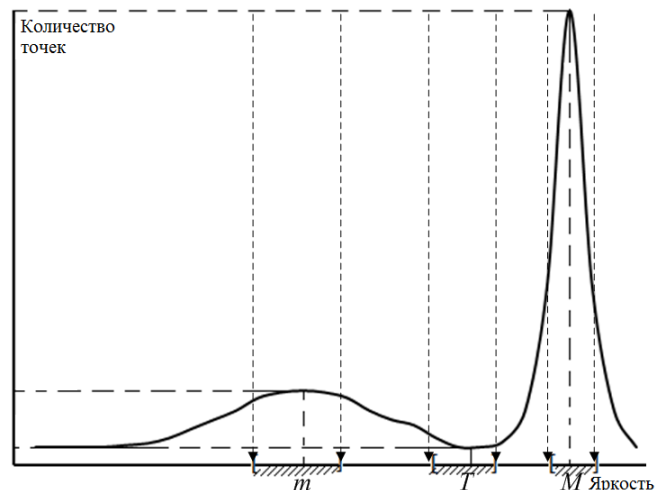


Рис. 2. Схема расположения параметров гистограммы изображения

Для определения изображения к одному из классов введена адаптивная функция принадлежности:

$$R = \sum_{i=0}^3 ((m_{i\min} \leq m \leq m_{i\max}) \wedge (T_{i\min} \leq T \leq T_{i\max}) \wedge (M_{i\min} \leq M \leq M_{i\max})),$$

где R – множество возможных решений, состоящее из четырех элементов $\{0, 1, 2, 3\}$, значения которого соответствуют группам изображений: 1 – группа А; 2 – группа В; 3 – группа С; 0 – группа, объединяющая изображения, не входящие ни в одну из групп классификации; $m_{i\min}, m_{i\max}, T_{i\min}, T_{i\max}, M_{i\min}, M_{i\max}$ – эмпирические границы диапазона порога, максимума слева и максимума справа, определенные на основе эмпирического исследования и адаптируемые при обучении системы принятия решения о классификации изображе-

ний; m , T , M – количественные характеристики гистограммы изображения, выбранного для классификации: максимум слева, порог и максимум справа соответственно.

Для каждой области идентификации представлена аналитическая запись, которая позволила формализовать представление области неоднозначной идентификации изображения:

$$\begin{aligned} X(R) &= (1) \vee (2) \vee (3) \Rightarrow \\ &\Rightarrow (m_{\min B} < m < m_{\max C}) \wedge \\ &\wedge (T_{\min C} < T < T_{\max C}) \wedge \\ &\wedge (M_{\min C} < M < M_{\max C}) \rightarrow \\ &\rightarrow ((A \subset B) \vee (A \subset C) \vee (B \subset C)). \end{aligned}$$

При использовании классификации на основе формообразующих характеристик гистограммы получили: наличие областей неоднозначной классификации; размер областей неоднозначной идентификации

составляет: $m_B \cap m_C = [179, 185]$, $T_B \cap T_C = [206, 207]$, $M_A \cap M_B = [240, 244]$, $M_A \cap M_C = [240, 244]$, $M_B \cap M_C = [238, 248]$; количество изображений, которые при классификации попали в область неоднозначной идентификации, составило: 31% – между классами А и В; 18% – между классами А и С; 78% – между классами В и С; однозначную идентификацию по формообразующим характеристикам прошли только 10% всех изображений.

Для сокращения размеров области неоднозначной классификации предложено увеличить количество классификационных признаков и в основу классификации заложить меры расстояния трех видов: Евклида, Чебышева и Манхэттенское расстояния. В результате построен алгоритм, приведенный на рис. 4. Для каждого класса построены диаграммы для оценки рассеяния расстояния до каждого из классов и введено правило принятия решений о принадлежности изображения классу: изображение относится к классу, если по всем трем видам расстояний получаем минимальное значение.

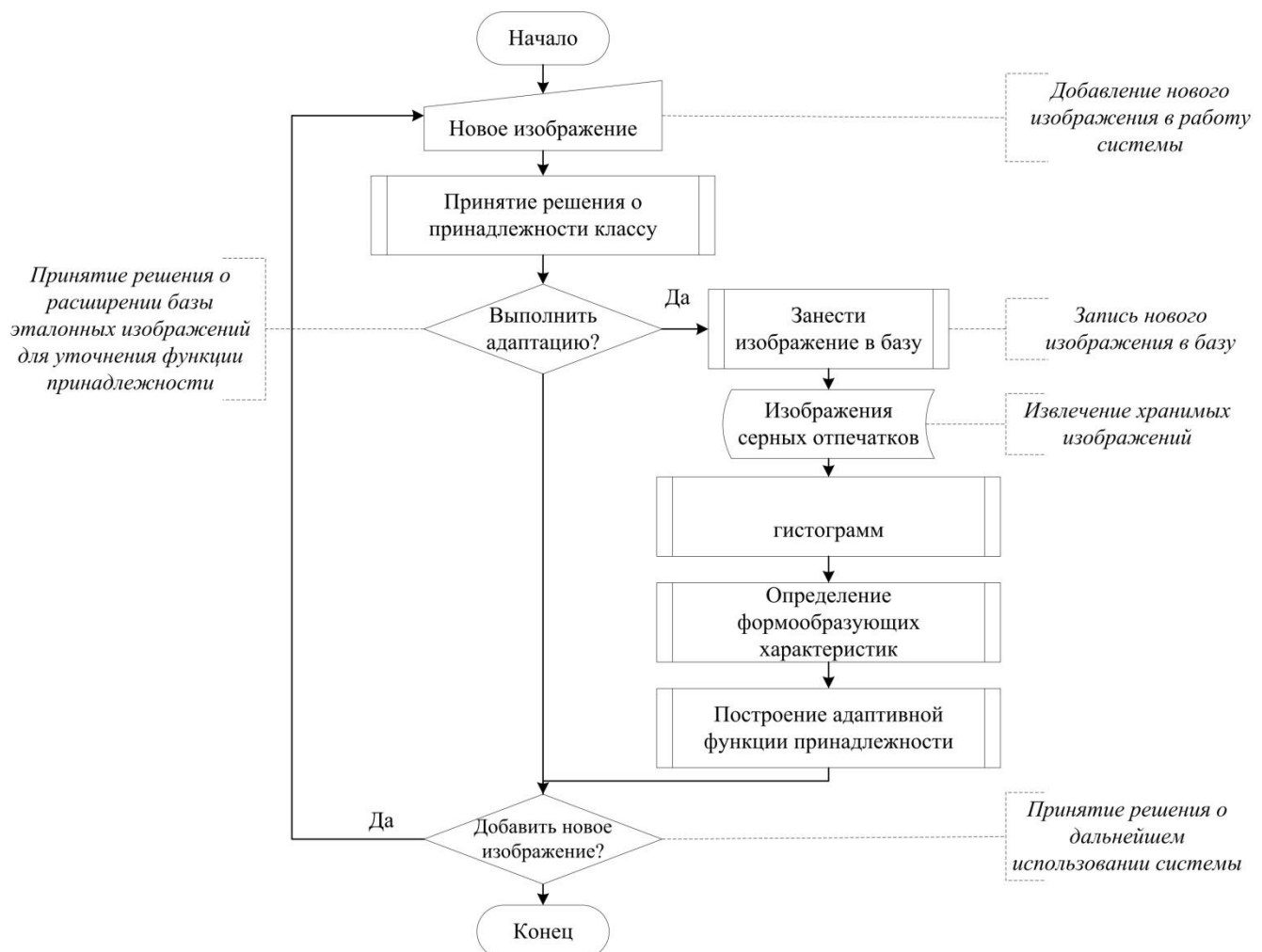


Рис. 3. Блок-схема алгоритма для принятия решений о классификации изображения по формообразующим характеристикам гистограммы

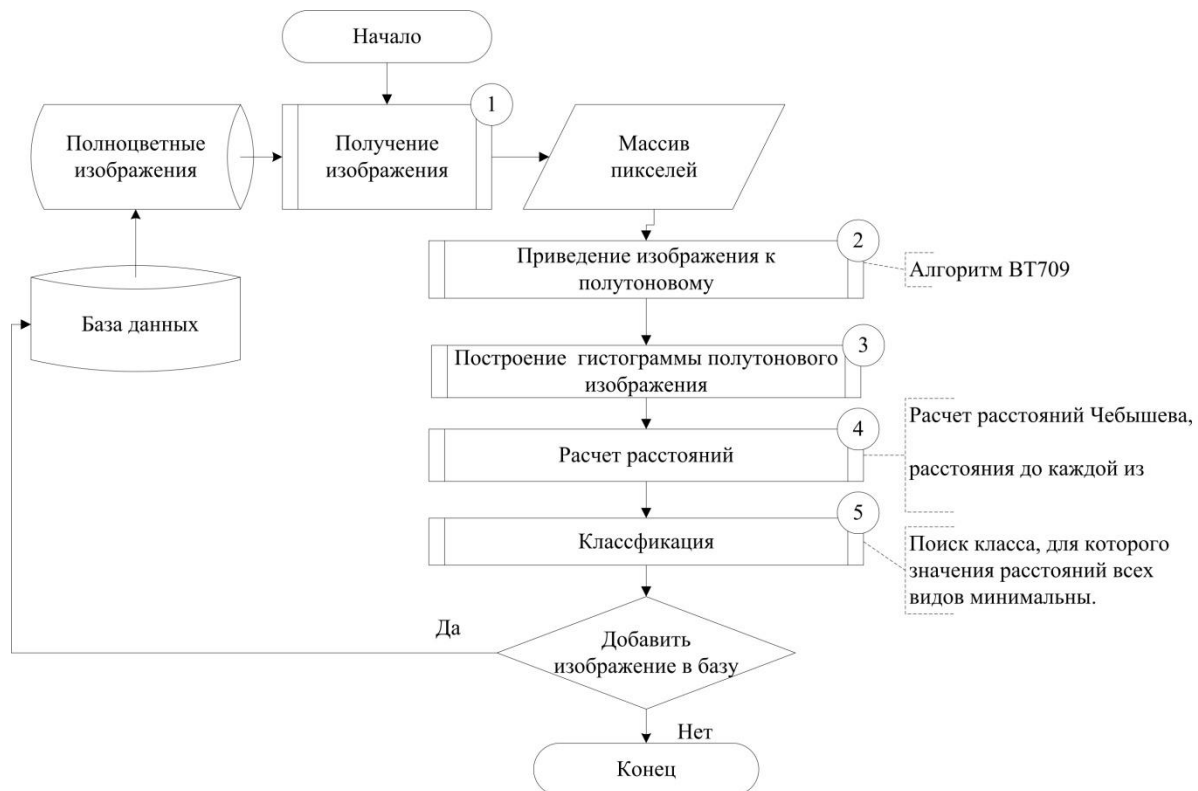


Рис. 4. Блок-схема алгоритма классификации изображения на основе расстояний для 256 признаков

Для введенных обозначений получили аналитическую запись условия принадлежности классу

$$\forall i = \overline{1,3} \exists j = \text{const} (S_{i,\min} = d_{i,j}) \rightarrow I \in K_j,$$

где $S_{i,\min}$ – минимальное расстояние вида $i = \overline{1,3}$; I – формальное обозначение объекта-изображения; K_j – обозначение класса с номером $j = \overline{1,3}$. Нарастивание количества признаков позволило повысить достоверность классификации до 69 %.

СПЕЦИАЛЬНОЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАСКАДНОЙ КЛАССИФИКАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ СЕРНЫХ ОТПЕЧАТКОВ

Несмотря на добавление классификационных признаков, характеризующих форму гистограммы яркости изображения, не удалось добиться однозначной идентификации всего набора исходных изображений. Исследование структуры исходного изображения и методов его классификации по принципу от простого к сложному привело к построению каскадной методики классификации серного отпечатка. Каждый последующий каскад классификации предусмотрено применять для изображений, находящихся в области неоднозначной идентификации по результатам оценки предыдущего шага. Каждый каскад отличается от предыдущего количеством идентификационных признаков и сложностью функций принадлежности к каждому классу. Первый каскад использует правило идентификации изображения, построенное на основе трех формообразующих характеристик. Второй каскад, наращивая количество идентификационных признаков с 3 до 256, использует три меры сходства, характеризующие дисперсию для оценки рассеяния расстояния относительно среднего значения каждого класса. Третий каскад используется только для изображений, не про-

шедших однозначную идентификацию на предыдущих двух каскадах. Учитывая невозможность идентификации изображений на основе детерминированных параметров гистограммы, принято решение ввести лингвистические переменные, термы и правила для идентификации изображений в классы. На рис. 5 приведена схема адаптивной методики каскадной классификации изображений серного отпечатка [17].

Для реализации третьего каскада методики введены структурированная лингвистическая переменная Image (рис. 6), равновесные и неравновесные функции принадлежности областей идентификации изображений для классов A и C , B и C в виде кусочных функций. Для каждой компоненты переменной Image принято правило принадлежности: изображение Image относится к классу K_i , если значение функции принадлежности для класса K_i не менее 0,5. Для каждой переменной Image получим значения трех компонент, которые относят изображение к одному из двух классов согласно введенному правилу. В табл. 3 определены правила принятия решения при классификации изображения по принадлежности между классами A или C .

Третий каскад системы классификации изображений серного отпечатка включает в себя два модуля: модуль обучения системы и модуль классификации нового потока изображений. Модуль обучения предназначен для: формирования функций принадлежности каждой формообразующей характеристики; формирования множества правил принятия решений о принадлежности изображений одному из классов; адаптации функций принадлежности при поступлении нового потока изображений в обучающую выборку. Для каждой указанной функции разработан алгоритм функционирования. Схема взаимодействия модулей третьего каскада приведена на рис. 7.

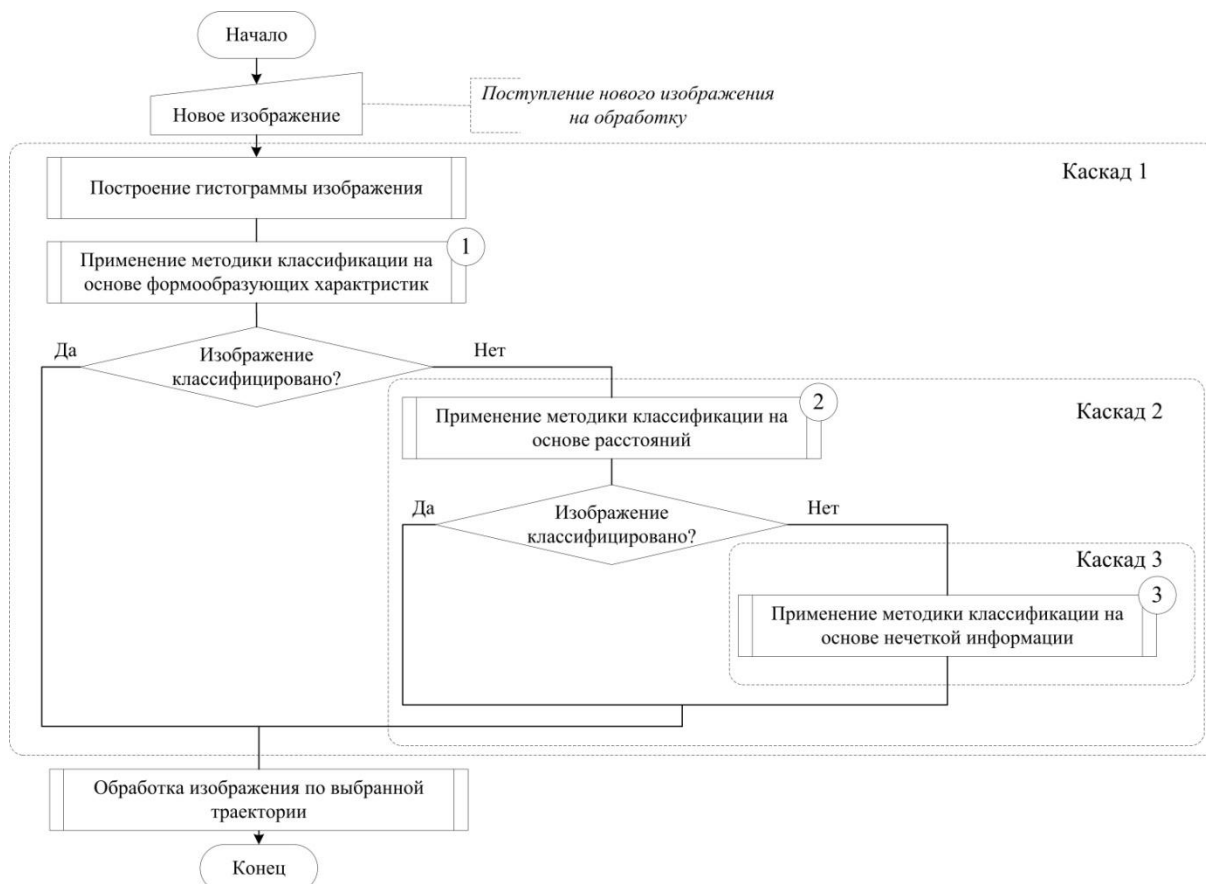


Рис. 5. Блок-схема алгоритма адаптивной методики каскадной классификации изображения серного отпечатка поперечного темплета непрерывнолитой заготовок

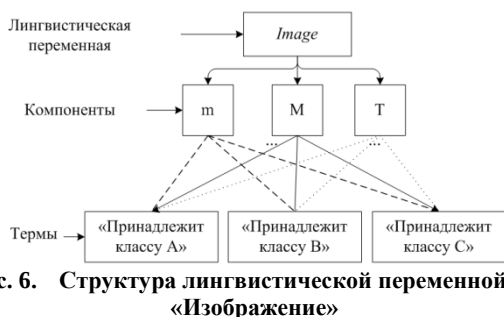


Рис. 6. Структура лингвистической переменной «Изображение»

Таблица 3

Правила принятия решений при неоднозначной классификации между А или С

Номер правила	Принадлежность классу по компоненте			Заключение эксперта
	<i>m</i>	<i>T</i>	<i>M</i>	
1	<i>A</i>	<i>A</i>	0	<i>A</i>
2	<i>A</i>	<i>C</i>	0	<i>A</i>
3	<i>C</i>	<i>C</i>	0	<i>C</i>
4	<i>C</i>	<i>A</i>	0	<i>A</i>
5	<i>C</i>	<i>C</i>	<i>C</i>	<i>C</i>
6	<i>C</i>	<i>A</i>	<i>C</i>	<i>C</i>
7	<i>A</i>	<i>C</i>	<i>C</i>	<i>C</i>
8	<i>A</i>	<i>A</i>	<i>C</i>	<i>A</i>

Аналогичным образом введены правила принятия решения при классификации изображения по принадлежности между классами В или С.

В результате применения каскада классификации, построенного на основе нечетких множеств и экспертных оценок, исключена неоднозначная классификация изображений из нового потока графической информации.



Рис. 7. Схема взаимодействия модулей третьего каскада системы классификации

РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА И СТРУКТУРИРОВАННЫЙ ПОКАЗАТЕЛЬ ЭФФЕКТИВНОСТИ

Для каждого определенного класса разработана траектория обработки графической информации. Для этого введена номенклатура применяемых алгоритмов, содержащая семь компонент (1 – приведение к оттенкам серого BT709; 2 – коррекция контраста; 3 – бинаризация методом Оцу; 4 – выделение связанных компонент; 5 – эрозия; 6 – бинаризация по первому значимому; 7 – дилатация), уровни пересечения траектории классов (рисунок 9) и матрица состояний [18]. Выполнена программная реализация алгоритмов для идентификации объектов нерегулярной формы на изображении серного отпечатка с учетом разработанной траектории и без нее.

В качестве способов оценки рассматриваются:

традиционный визуальный способ оценки с получением значения показателя качества K_1 ; новый способ получения экспертной информации без использования модуля классификации с получением значения показателя качества K_2 ; новый способ получения экспертной информации с использованием модуля классификации с получением значения показателя качества K_3 . Для оценки эффективности функционирования системы визуализации и получения экспертной информации разработан *структурированный показатель*, который учитывает характеристики выделенных объектов нерегулярной формы на изображении серных отпечатков:

$$I_i = \frac{K_i}{K_s}, K_i = \sum_{i=1}^5 \alpha_i C_i,$$

где I – показатель эффективности; K_i – показатель качества, полученный при текущем способе оценки; K_s – показатель качества, полученный при эталонном способе оценки; α_i – весовые коэффициенты для каждого показателя.

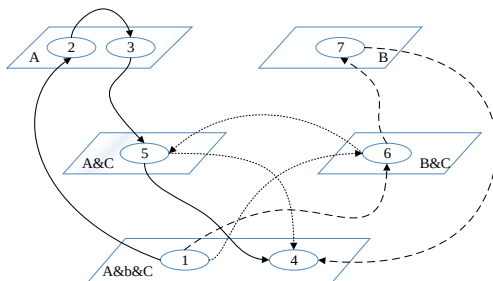


Рис. 8. Траектории применения методов обработки изображений после их классификации

Величины C_i описывают структурные элементы изображения и определяются согласно табл. 4.

Таблица 4

Относительные характеристики объектов нерегулярной формы на изображении серного отпечатка

№	Дефект	Показатель	Формула
1	Полоски и трещины	Количество	$C_1 = \frac{k_1}{k_{01}} 100\%$
		Ширина	$C_2 = \max_{1 \leq i \leq n_1} \left\{ \frac{h_i}{h_0} \right\} 100\%$
		Длина	$C_3 = \max_{1 \leq i \leq n_1} \left\{ \frac{l_i}{a} \right\} 100\%$
2	Краевая точечная загрязненность	Диаметр	$C_4 = \max_{1 \leq i \leq n_1} \left\{ \frac{d_i}{d_0} \right\} 100\%$
		Количество	$C_5 = \frac{k_2}{k_{02}} 100\%$

В табл. 4 введены обозначения: C_i – относительный показатель, $i=1,2..5$; k_1 и k_2 – количество объектов, идентифицируемых как полоски и точечная загрязненность соответственно; k_{01} и k_{02} – эталонные коэффициенты количества, приводящие показатели к единой размерности и единому порядку; n_1 – количество объ-

ектов, идентифицируемых как полоска или трещина; n_2 – количество объектов, идентифицируемых как краевое точечное загрязнение; h_i – ширина раскрытия i -го объекта, мм; h_0 – эталонная ширина раскрытия объекта, мм; l_i – протяженность i -го объекта, мм; a – толщина заготовки, мм; d_i – диаметр объекта, идентифицированного как точечная загрязненность, мм; d_0 – эталонный диаметр, мм.

Наличие системы визуализации и автоматизированного получения экспертной информации позволяет интегрировать ее в систему интеллектуальной поддержки управления многостадийными процессами, способной выполнить согласование значений технологических параметров между локальными контурами на каждой стадии производства [19, 20].

Годовой экономической эффект при функционировании системы получения экспертной информации о качестве заготовок составляет 981 242 руб., а срок окупаемости системы – 260 дней.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Выполнен теоретико-информационный анализ структуры управления многостадийными процессами металлургического производства, использования графической информации в системе управления, процессов сбора и подготовки экспертной информации. В ходе анализа определены назначение и точки сбора графической информации. Исследования системы получения экспертной информации о качестве непрерывной заготовки позволили выявить ее достоинства и недостатки и выполнить обоснование для перехода к новой системе получения экспертной информации с использованием современных программных средств, которые потребовали разработки специального математического и алгоритмического обеспечения.

2. Предложены математическое и алгоритмическое обеспечения для классификации изображений серных отпечатков на основе формообразующих характеристик гистограмм яркости и расстояний до эталонной гистограммы. Применение методик классификации позволило однозначно идентифицировать принадлежность классу 69% изображений. Последовательное исключение однозначно идентифицированных изображений позволило сократить варианты для неидентифицированных изображений в две группы.

3. Для устранения неоднозначной классификации изображений серных отпечатков предложена методика каскадной классификации, которая содержит три каскада принятия решений по формообразующим характеристикам гистограмм яркости, мерам расстояния до эталонных гистограмм и нечетким функциям принадлежности с использованием экспертных логических правил вывода. В предлагаемом математическом обеспечении при описании функции принадлежности введены понятия равновесной и неравновесные модели, представлена обобщенная методика построения моделей и ее применение при классификации изображений серных отпечатков. При построении функций принадлежности нечетких множеств введены понятия областей «пустого множества» и «полного поглощения», которые позволили однозначно идентифицировать изображения из нового потока ретроспективной информации. В результате применения каскада класси-

фикации устранена неоднозначная классификация изображений из нового потока графической информации.

4. Приведены результаты вычислительного эксперимента, на основе системы получения экспертной информации, включающей модули каскадной классификации и сегментации, а также представлены структурированные показатели эффективности оценки работы системы. Значения структурированных показателей эффективности продемонстрировали превосходство новой системы с учетом классификации изображений над традиционной визуальной в среднем на 25 %.

5. Годовой экономической эффект при функционировании системы получения экспертной информации о качестве заготовок составляет 981 242 руб., а срок окупаемости затрат на создание и функционирование системы – 260 дней.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Логунова О.С. Системный подход к исследованию информационных потоков в управлении качеством непрерывной заготовки // Проблемы теории и практики управления. 2008. № 6. С. 56-62.
2. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений М.: Техносфера, 2005. 1072 с.
3. Varma M., Zisserman A. A Statistical Approach to Texture Classification from Single Images // International Journal of Computer Vision. 2005. Vol. 62(1/2). P. 61-81.
4. Шапиро Л., Стокман Дж. Компьютерное зрение. М.: Бинном, 2006. 752 с.
5. Segmentation of a thematic Mapper Image using the fuzzy c-means clustering algorithm / R.L. Cannon [et al.] // IEEE Trans. Geosci.Remote Sensing. 1986. Vol. GE-24. P. 400-408.
6. Афанасьева А., Игнатенко А. Алгоритм поиска областей резкости на стереоизображениях // ГрафиКон'2014: 24-я Международная конференция по компьютерной графике и зрению. 2014. С. 160-164.
7. Chapeiie O., Haffner P., Vapnik V. Support Vector Machines for Histogram-Based Image Classification // IEEE Transactions on neural networks. 1999. Vol. 10, iss. 5. P. 1055-1064.
8. Foody G. A relative Evaluation of MultiClass Image Classification by Suuport Vector Machines // IEEE Transactions on geoscience and remote sensing. 2004. Vol. 42, iss. 6. P. 1335-1343.
9. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. М.: Мир, 1976. 165 с.
10. Тэрано Т., Асан К., Сугэно М. Прикладные нечеткие системы. М.: Мир, 1993. 366 с.
11. Спирин Н.А., Лавров В.В. Информационные системы в металлургии: Конспект лекций (отдельные главы из учебника для вузов). Екатеринбург: Уральский государственный технический университет – УПИ, 2004. 495 с.
12. Логунова О.С., Девятков Д.Х., Нуров Х.Х. Оценка качества непрерывной заготовки статистическими методами с использованием программных средств. // Изв. вузов. Черная металлургия. 2005. №9. С. 54-58.
13. Посохов И.А., Логунова О.С. Технология обработки изображений заготовок на основе операций морфологического анализа // Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах. 2011. №1-2. С. 191-196.
14. Логунова О.С., Павлов В.В. Нуров, Х.Х. Оценка статистическими методами серного отпечатка поперечного темплета непрерывной заготовки // Электрометаллургия. 2004. № 5. С. 18-24.
15. Логунова О.С. Технология исследования информационных потоков на металлургическом предприятии // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2008. № 3. С. 32-36.
16. Logunova O.S., Matsko I.I., Posochov I.A., Luk'ynov S.I. Automatic system for intelligent support of continuous cast billet production control processes // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2014. Vol.74(9). P. 1407 – 1418.
17. Логунова О.С., Павлов В.В., Посохов И.А., Мацко И.И., Мацко О.С. Структура каскадной системы управления многостадийными технологическими процессами // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інформатика і моделювання. – Харків: НТУ «ХПІ», 2013. № 19 (992). С. 75 – 80.
18. Посохов И.А., Логунова О.С. Технология обработки изображений заготовок на основе операций морфологического анализа // Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной. 2011. Ч.2. С. 191-196.
19. Logunova O.S., Matsko I.I., Posochov I.A. Integrated system structure of intelligent management support of multistage metallurgical processes // Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical university. 2013. №5. P. 50-55.
20. Логунова О.С., Мацко И.И., Посохов И.А. Система интеллектуальной поддержки процессов управления производством непрерывной заготовки. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2013. 175 с.

INFORMATION IN ENGLISH

VISUALIZATION AND PROCESSING OF DATA ON THE QUALITY OF CONTINUOUS CAST BILLET

Posokhov I.A.

The purpose of the research is to improve the efficiency of the system for obtaining expert information gained as a result of processing and analysis of images of sulfur prints of a continuous cast billet. The issues solved during the research are analysis of traditional methods of visualization and obtaining of expert information on the quality of continuous cast billet, development of special mathematical and algorithmic tools for image classification of sulfur prints based on formative characteristics of histogram and fuzzy sets. The research was done for continuous casting machines used in process of square continuously cast billets producing from 2011 to 2015. Methods of system analysis were used to find ways to obtain expert information about the quality of continuous cast billet, image processing and classification; fuzzy sets are also used in this research. As a

result, the research group introduced formalized description of sulfur print image structure, the cascade method of image classification, efficiency indicator of a new system for obtaining expert information and multi-level adaptive image processing trajectory. The value of efficiency indicator demonstrated that the new system is 25% more efficient than the traditional one.

Keywords: Graphic information, visualization, image classification, sulfur prints, continuous cast billet.

REFERENCES

1. Logunova O.S. *Sistemnyi podkhod k issledovaniyu informatsionnykh potokov v upravlenii kachestvom nepreryvnoy zagotovki* [System Approach to Analysis of

- Information Flows in Continuous Cast Billet Quality Control]. Problems of control theory and practice. 2008, no.6, pp.56-62.
2. Gonsales P., Woods R. *Tsifrovaya obrabotka izobrazheniy* [Digital Image Processing]. Moscow. Technosphere. 2005, 1072 p.
 3. Varma M., Zisserman A. A Statistical Approach to Texture Classification from Single Images. *International Journal of Computer Vision*. 2005, vol.62(1/2), pp.61-81.
 4. Shapiro L., Stockman J. *Kompyuternoe zrenie* [Computer Vision]. Moscow. Binom. 2006, 752 p.
 5. Cannon R.L. [et al.] Segmentation of a thematic Mapper Image using the fuzzy c-means clustering algorithm. *IEEE Trans. Geosci.Remote Sensing*. 1986, vol.GE-24, pp.400-408.
 6. Afanasyeva A., Ignatenko A. Algoritm poiska oblastey rezkosti na stereoizobrazheniyakh [Search Algorithm for Sharpness Region in Stereo Images]. *GraphyCon'2014: 24th International conference on computer graphics and vision*. 2014, pp. 160-164.
 7. Chapeiie O., Haffner P., Vapnik V. Support Vector Machines for Histogram-Based Image Classification. *IEEE Transactions on neural networks*. 1999, vol.10, iss.5, pp.1055-1064.
 8. Foody G. A relative Evaluation of MultiClass Image Classification by Suuport Vector Machines. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*. 2004, vol.42, iss.6, pp.1335-1343.
 9. Zade L. *Ponyatie lingvisticheskoi peremennoy i ego primeneniye k prinyatiyu priblizhennykh resheniy* [Concept of Linguistic Variable and its Application for Making Approximate Solutions]. Moscow. Mir. 1976, 165 p.
 10. Terano T., Asai K., Sugeno M. *Prikladnye nechetkie sistemy* [Applied Fuzzy Systems]. Moscow. Mir. 1993, 366 p.
 11. Spirin N.A., Lavrov V.V. *Informatsionnye sistemy v metallurgii: konspekt lektsiy (otdelnye glavy iz uchebnika dlya vuzov)* [Information Systems in Metallurgy: Lecture Notes: some chapters from the textbook for universities]. Yekaterinburg: the Ural state technical university – UPI. 2004, 495 p.
 12. Logunova O.S., Devyatov D.Kh., Nurov H.H. Otsenka kachestva nepreryvnolitoi zagotovki s statisticheskimi metodami ispolzuya programmnye sredstva [Estimation of Continuous Cast Billet Quality by Statistical Methods Using Software Tools]. *Proceedings of universities. Ferrous metallurgy*. 2005, no.9, pp. 54-58.
 13. Posohov I.A., Logunova O.S. *Tehnologiya obrabotki izobrazheniy zagotovok na osnove operatsiy morfologicheskogo analiza* [Billet Image Processing Technology on the Basis of Morphological Analysis Operations]. *Mathematical and software tools for systems in industry and sociology*. 2011, no.1-2, pp.191-196.
 14. Logunova O.S., Pavlov V.V., Nurov H.H. Otsenka statisticheskimi metodami sernogo otechatka poperechnogo templeta nepreryvnolitoi zagotovki [Using Statistical Methods for Assessment of Sulfur Print of Transverse Template of Continuous Cast Billet]. *Electrometallurgy*. 2004, no.5, pp.18-24.
 15. Logunova O.S. *Tehnologiya issledovaniya informatsionnykh potokov na metallurgicheskom predpriyatii* [Technology of Information Flow Analysis at Metallurgical Enterprise]. *Information technologies in design and production*. 2008, no. 3, pp.32-36.
 16. Logunova O.S., Matsko I.I., Posohov I.A., Lukaynov S.I. Automatic system for intelligent support of continuous cast billet production control processes. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2014, vol.74(9), pp.1407 – 1418.
 17. Logunova O.S., Pavlov V.V., Posohov I.A., Matsko I.I., Matsko O.S. *Struktura kaskadnoy sistemy upravleniya mnogostadiynymi tehologicheskimi protsessami* [Structure of Cascade Control System of Multi-stage Technological Processes]. *Bulletin of NTU "KhPI". Informatics and modelling*. 2013, no.19(992), pp.75-80.
 18. Posohov I.A., Logunova O.S. *Tehnologiya obrabotki izobrazheniy zagotovok na operatsiy morfologicheskogo analiza* [Technology of Billet Image Processing on the Basis of Analysis of Morphological Operations]. *Mathematical and software system tools in industry and sociology*. 2011, part 2, pp.191-196.
 19. Logunova O.S., Matsko I.I., Posohov I.A. Integrated system structure of intelligent management support of multistage metallurgical processes. *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical university*. 2013, no.5, pp.50-55.
 20. Logunova O.S., Matsko I.I., Posohov I.A. *Sistema intellektualnoy poderzhki protsessov upravleniya proizvodstvom nepreryvnolitoi zagotovki* [System of Intelligent Support of Control Processes in Continuous Cast Billet Production]. Magnitogorsk. Publishing center of Nosov Magnitogorsk State Technical University. 2013, 175 p.

УДК 621.311

Гаврилов Е.С., Якимов И.А., Фомин Н.В., Линьков С.А.

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

МЕХАТРОННАЯ СИСТЕМА ПАРОВОЙ ТУРБИННОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ ТУШИЛЬНОЙ БАШНИ КОКСОВОГО ЦЕХА ОАО «ММК»

Разработана мехатронная система паровой турбинной электростанции тушильной башни ОАО «ММК», которая генерирует и аккумулирует электроэнергию, а также питает осветительные установки. Проведено исследование суточного технологического цикла охлаждения кокса в тушильной башне, определено оптимальное место установки паровой турбины и генератора. Произведен расчет мощности паровой турбины с оптимальным диаметром рабочего колеса с пятью лопастями, предложены два варианта питания электростанции от генератора постоянного тока и от синхронного генератора с постоянными магнитами. Рассчитана оптимальная ёмкость и количество аккумуляторных батарей в аккумуляторной станции. Произведен расчет срока окупаемости проекта.

Ключевые слова: мехатронная система, паровая турбина, электростанция, аккумуляторная станция, тушильная башня, инвертор напряжения.

ВВЕДЕНИЕ

Серьёзная конкуренция на мировом рынке металлов и экономические санкции в отношении российских товаров вынуждают резко сокращать расходы на производство. В связи с ростом цен на энергоносители все больше промышленных предприятий ориентируются на внедрение в производство инновационных разработок, снижающих потребление электроэнергии там, где это возможно. Экономическая политика сокращения расходов ОАО «ММК» ставит задачу поиска «слабых мест», где можно с помощью инноваций «залатать энергетические утечки» и повысить рентабельность производства.

Доменное производство – одно из самых энергоёмких в металлургии, которое включает в себя подготовку кокса для доменной печи. Процесс коксования заканчивается, когда в осевой плоскости коксовый пирог достигает температуры 949-1049°C. В доменной печи кокс является основным источником теплоты, поэтому считается целесообразным полученный раскалённый кокс сразу же загружать в печь [1]. Однако транспортирование, хранение и загрузка раскалённого кокса – технически весьма сложная задача. Кроме того, свойства выдаваемого кокса не соответствуют требуемой кондиции. Поэтому первым процессом подготовки кокса для доменных печей является охлаждение (тушение) до температур, при которых возможны его транспортирование и сортировка.

Способ тушения кокса, который применяется на ММК, заключается в том, что кокс из камер коксования выдают в тушильный вагон, который едет под тушильную башню высотой 26 м и диаметром 6 м, где на кокс подают непрерывным потоком воду в течение 1,5-2 мин (рис. 1). Во время тушения раскалённого кокса пары с естественной тягой устремляются к верхней части башни и выводятся в атмосферу со скоростью 20-25 м/с. После прекращения подачи воды вагон находится под башней еще некоторое время (около 1 мин), в течение которого вода стекает с кокса. Кокс, охлажденный до 180-250°C, разгружается на наклонную площадку – рампу, где испаряется влага, затем

подают на коксортировку.

Целью и задачей данной работы является разработка мехатронной системы паротурбинной установки, преобразующей кинетическую энергию пара в электрическую и аккумулирующую ее для внешних потребителей электроэнергии.

В рамках реконструкции тушильной башни либо строительства новой паротурбины с генератором выгоднее всего установить на верхней части трубы, где скорость пара максимальная (рис. 1). Число лопастей турбины не должно превышать пяти, дабы не нарушать условия естественной вентиляции и свободного выхода пара. Генератор сочленяется с паротурбиной посредством конического редуктора, выводится за пределы паропотока во избежание перегрева.

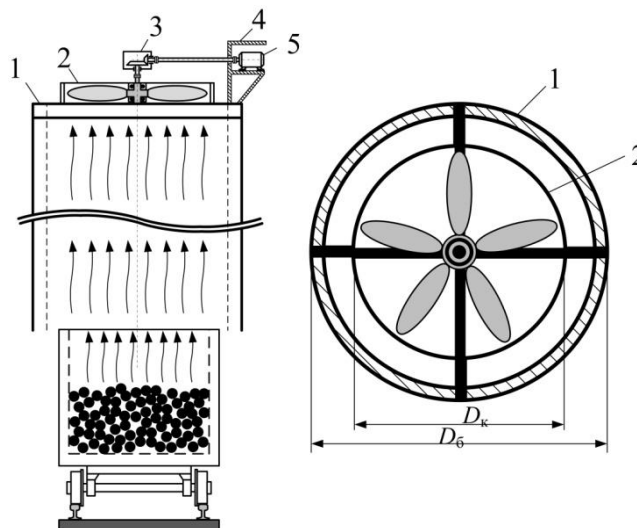


Рис. 1. Процесс охлаждения кокса в тушильной башне с паротурбиной: 1 – тушильная башня; 2 – турбина; 3 – конический редуктор; 4 – крепление и защитная крышка генератора; 5 – генератор

РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ

На первом этапе проектирования парозлектростанции (ПЭС) следует узнать, каким образом поток пара трансформируется в электрическую энергию и сколько такой энергии можно будет получить на одной

тушильной башне. По приведенной формуле можно рассчитать энергию, которую можно получить от паропотока [2]:

$$P = V^3 \cdot \rho \cdot S / 2, \quad (1)$$

где V – скорость паропотока, м/с; $\rho = 1,2 \text{ кг/м}^3$ – плотность потока воздуха с влажностью 100%; S – площадь, на которую дует паропоток, м^2 .

В реальных условиях максимально возможно получить 30-40% от потенциальной энергии воздушного потока [3]. Это ограничение связано с технологическим и физическим выполнением парогенератора. Более точный расчет средней мощности генератора (1) можно сделать по следующей формуле:

$$P_{\text{ср}} = \xi \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V^3 \cdot \rho \cdot \eta_{\text{ред}} \cdot \eta_{\text{ген}} / 2, \quad (2)$$

где ξ – коэффициент использования энергии ветра (в номинальном режиме для тихоходных турбин достигает максимум $\xi_{\text{max}} = 0,4 \div 0,5$); R – радиус ротора, м; $\eta_{\text{ред}}$ – КПД редуктора, %; $\eta_{\text{ген}}$ – КПД генератора, %.

В таблице приведены расчеты по формуле (2) вырабатываемой турбиной средней мощности $P_{\text{ср}}$ при различных диаметрах рабочего колеса D_k и скоростях воздушного потока $V_{\text{п}}$. Учтены механические потери мощности в коническом редукторе и генераторе ($\xi = 0,45$, $\eta_{\text{ред}} = 0,9$, $\eta_{\text{ген}} = 0,85$).

По данным **таблицы** построены зависимости средней мощности генератора от скорости пара при различных диаметрах рабочего колеса турбины (**рис. 2**). Из графиков видно, что мощность, выдаваемая генератором, квадратично растет от скорости пара и кубически от увеличения диаметра рабочего колеса.

На **рис. 3** представлены принципиальные электрические схемы ПЭС [4]. Первая схема (**рис. 3, а**) питается от генератора постоянного тока с релейной схемой контроля тока возбуждения. Тихоходные двигатели (генераторы) краново-металлургической серии Д широко эксплуатируются в условиях производства ОАО «ММК», к тому же качественно реализован их ремонт. Во второй схеме (**рис. 3, б**) питание производится от синхронного генератора с постоянными магнитами (более дорогой вариант) [5]. Аккумуляторная станция (АКС) В1-В8 накапливает электроэнергию, а управляемый инвертор преобразует постоянное напряжение в переменное 220 В для питания внешних потребителей.

РАСЧЕТ АКС И СРОКА ОКУПАЕМОСТИ ПРОЕКТА

На втором этапе проектирования необходимо выяснить, окупится ли данный проект и будет ли приносить прибыль в виде сэкономленных средств на электроэнергию. Расчет срока окупаемости проекта предполагает вычисление себестоимости электростанции с турбиной, которые включают в себя следующие затраты на изготовление (закупку):

- колеса турбины;
- конического редуктора;
- генератора;
- аккумуляторной станции для накопления энергии;

гии;

- инвертора напряжения для внешних потребителей.

Расчет аккумуляторной станции следует производить исходя из следующих условий:

- напряжение полностью заряженной АКС должно быть по величине меньше напряжения генератора, работающего с максимальным отбором мощности турбины;
- ёмкость АКС должна быть достаточной для обеспечения бесперебойного питания потребителей в зимнее и летнее время;
- батареи АКС должны полностью заряжаться за один суточный цикл работы турбины.

При вращении турбины со скоростью 100-150 об/мин, а также с учетом мультипликативного редуктора, скорость вращения на валу генератора 200-250 об/мин. Выбирается генератор постоянного тока серии Д исходя из расчетов (см. **таблицу**), мощностью $P_{\text{н}} = 13 \text{ кВт}$, $n_{\text{н}} = 600 \text{ об/мин}$, $U_{\text{н}} = 220 \text{ В}$. При 200 об/мин генератор будет выдавать 73 В.

Напряжение одной аккумуляторной батареи – 12 В, поэтому применяется последовательное соединение четырёх батарей, которые в сумме будут давать 48 В. Величина напряжения в данном случае с выхода генератора достаточная для заряда АКС. Суточный цикл работы турбины составляет около 4-5 ч. Учитывая, что АКС будет заряжаться во время работы потребителей – это компенсирует глубокую разрядку батарей.

Ёмкость АКС должна быть как можно большей для стабильного обеспечения электроэнергией потребителей, но стоимость накопителей энергии довольно высокая. Поэтому расчет оптимальной ёмкости АКС должен производиться исходя из суммарной потребляемой мощности при исключении недозарядки батареи за суточный цикл. Чтобы увеличить суммарную ёмкость аккумуляторной батареи (АКБ), их нужно соединить параллельно. Количество соединенных в параллель стоек АКБ ($K_{\text{ст}}$), а соответственно и ёмкость всей АКС, будут рассчитываться в зависимости от потребляемого активного тока нагрузки:

$$I_{\text{н}} = \frac{P_{\text{нг}}}{U_{\text{н}}} = \frac{13000}{220} = 59 \text{ А},$$

где $P_{\text{нг}}$ – номинальная мощность генератора; $U_{\text{н}}$ – напряжение нагрузки.

В данном случае в качестве нагрузки будет стационарное освещение энергосберегающими лампами в ночное время суток. Время работы осветительных установок в зимнее время 9 ч, в летнее – 6 ч. В качестве базовой, для расчета количества стоек АКС, возьмём аккумуляторную батарею типа TYUMEN BATTERY 6СТ-190L с ёмкостью $W_{\text{а}} = 190 \text{ (А} \cdot \text{ч)}$. Таким типом аккумуляторов комплектуются большегрузы и тягачи. Время работы одной стойки из 4 последовательно соединенных АКБ до полного разряда

$$T_1 = \frac{W_{\text{а}}}{I_{\text{н}}} = \frac{190}{59} = 3,22 \text{ ч}.$$

Зависимость средней мощности генератора от скорости пара при различных диаметрах рабочего колеса турбины

$V_{п}, \text{ м/с}$		7	8	9	10	11	12	13	14	15
$D_k = 3 \text{ м}$	$P_{ср}, \text{ кВт}$	0,083	0,567	0,813	1,119	1,52	2,009	2,6	3,3	4,1
$D_k = 4 \text{ м}$	$P_{ср}, \text{ кВт}$	0,67	1,008	1,446	1,99	2,702	3,572	4,6	5,8	7,3
$D_k = 5 \text{ м}$	$P_{ср}, \text{ кВт}$	1,048	1,575	2,259	3,109	4,222	5,581	7,2	9,9	12,8

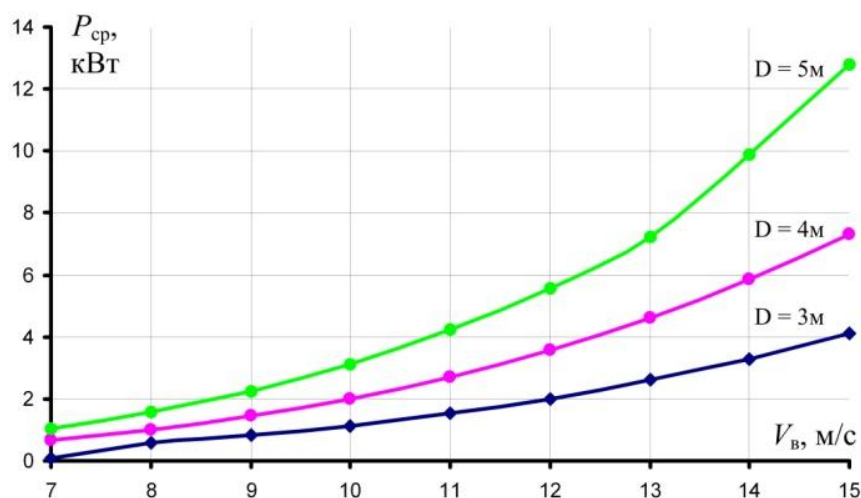
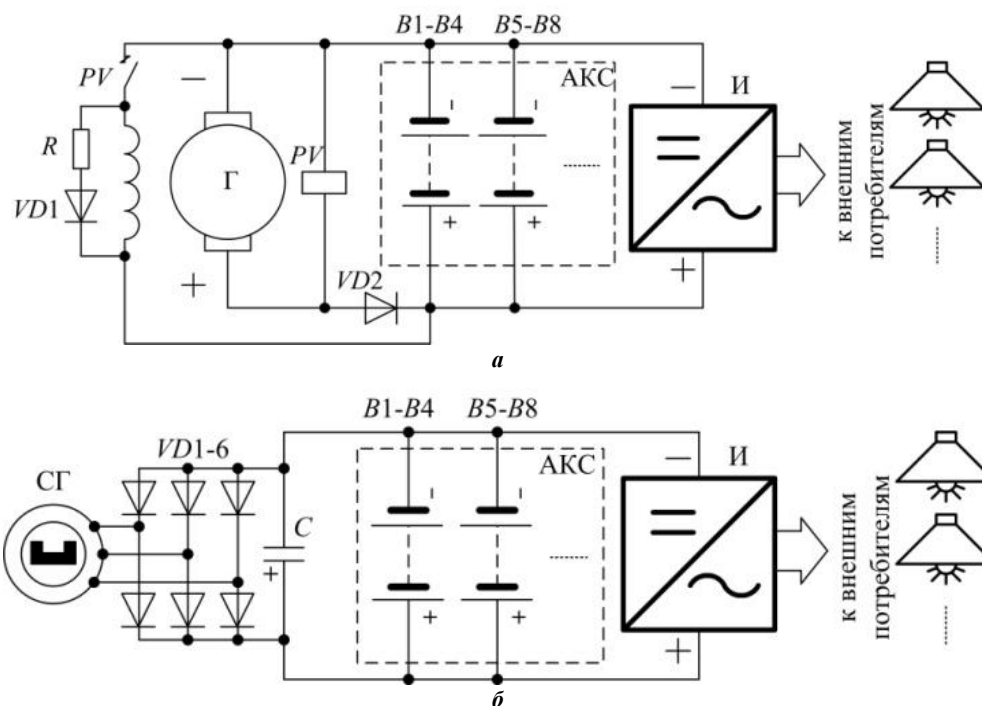


Рис. 2. Зависимости средней мощности генератора от скорости пара

Рис. 3. Принципиальные электрические схемы ПЭС:
а – с генератором постоянного тока; б – с синхронным генератором

Таким образом, 3-х стоек, соединенных в параллель, достаточно для обеспечения электроэнергией осветительных ламп в зимнее время с расчетным током нагрузки 59 А. Причем АКБ не будет разряжена полностью, т.к. в ночное время турбина так же работает.

$$T_3 = \frac{3 \cdot W_a}{I_H} = \frac{3 \cdot 190}{59} = 9,66 \text{ ч.}$$

Таким образом, в одной АКБ будет размещаться 12 аккумуляторных батарей. Стоимость одной АКБ на текущий момент – 10 000 руб. Стоимость всей АКБ: $12 \cdot 10\,000 = 120\,000$ руб. Стоимость изготовления турбины – 150 000 руб. Расходы на закупку инвертора, генератора, а также затраты на установку и монтаж, по предварительным подсчетам, – около 70 000 руб. Итого себестоимость всей паротурбинной электростанции составляет 340 000 руб.

Стоимость 1 кВт·ч электроэнергии – 3,3 руб.

Мощность, потребляемая за суточный цикл, 13 000 Вт·ч за 9 часов, $13\,000 \cdot 9 = 117\,000$ Вт·ч.

Стоимость потребляемой мощности за суточный цикл: $117 \cdot 3,3 = 386,1$ руб.

Стоимость потребляемой мощности за год: $386,1 \cdot 365 = 140\,890$ руб.

Срок окупаемости проекта: $340\,000 / 140\,890 = 2,4$ года.

С учетом того, что АКС при благоприятных условиях работы служит 7-8 лет, чистая прибыль от сэкономленных средств на электроэнергию за 5,5 лет составит $5,5 \cdot 140\,890 = 774\,895$ руб.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана мехатронная система паротурбинной установки, преобразующая кинетическую энергию пара в электрическую и аккумулирующая ее для внешних потребителей электроэнергии.

Срок окупаемости проекта реконструкции только для одной тушильной башни не превышает 2,5 года.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мучник Д.А. Вопросы теории и технологии внепечного формирования свойств доменного кокса: дис. ... д-ра техн. наук. Днепропетровск, 1979. 447 с.
2. Фатеев Е.М. Ветро двигатели и ветроустановки. М.: Сельхозгиз, 1957.
3. Линьков С.А., Сарваров С.А., Бачурин И.А. Перспективы развития ветроэнергетики в России и за рубежом // Электротехнические системы и комплексы. 2013. №21. С.220-225.
4. Линьков С.А., Сарваров С.А., Бачурин И.А. Мехатронные системы ветряных электростанций как альтернативные источники энергии // Электроэнергетические системы и сети. Энергосбережение: межвуз. науч. сборник / Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. – Уфа: УГАТУ. 2013. С. 12-17.
5. Линьков С.А., Сарваров С.А., Бачурин И.А. Анализ систем управления синхронных электроприводов // Электротехнические системы и комплексы. 2014. № 2(23). С. 25-28.

INFORMATION IN ENGLISH

MECHATRONIC SYSTEM OF STEAM TURBINE POWER PLANT OF QUENCHING TOWER AT OJSC "MMK" COKE PLANT

Gavrilov E.S., Yakimov I.A., Fomin N.V., Linkov S.A.

The research group developed a mechatronic system of a steam turbine power plant at OJSC "MMK" quenching tower, which generates and accumulates electric power and feeds lighting systems. A study of daily technological cycle of coke cooling in a quenching tower was carried out to determine the optimum location of the steam turbine and the generator. The authors calculated the power of the steam turbine with the optimum wheel diameter with five blades and offered two options for power supply from the DC generator and from the synchronous generator with permanent magnets. The optimal capacity and the number of rechargeable batteries in the station were calculated. The calculation of the payback period of the project was carried out.

Keywords: Mechatronic system, steam turbine, power station, station battery, quenching tower, voltage inverter.

REFERENCES

1. Muchnik D.A. *Voprosy teorii i tekhnologii vnepechnogo formirovaniya svoistv domennogo koks* [Issues of theory and technology of out-of-furnace coke forming properties]: D.Sc. thesis in Engineering. Dneprodzerzhinsk, 1957.

2. Fateev E.M. *Vetrodvigateli i vetroustanovki* [Wind motors and wind turbines]. Moscow. Selhooziz. 1957.
3. Linkov S.A., Sarvarov A.S., Bachurin I.A. *Perspektivi razvitiya vetroenergetiki v Rossii i za rubezhom* [Prospects for development of wind energy in Russia and abroad]. *Elektrotehnicheskiiye sistemy i komplekxy* [Electrotechnical systems and complexes]. 2013, vol. 21, pp. 220-225.
4. Linkov S.A., Sarvarov A.S., Bachurin I.A. *Mehatronnyye sistemy vetriyanykh elektrostantsiy kak alternativnyye istochniki energii* [Mechatronic systems of wind power as an alternative energy source]. *Elektrotehnicheskiiye sistemy i sety. Energoberezhenie: mezhvuzovskiy nauchnyy sbornik* [Electric power systems and networks. Energy saving: the interuniversity collection of scientific papers]. Ufa. Ufa State Aviation Technical University. 2013, pp. 12-17.
5. Linkov S.A., Sarvarov A.S., Bachurin I.A. *Analiz sistem upravleniya sinhronnykh elektroprivodov* [Analysis of synchronous electric drives control systems]. *Elektrotehnicheskiiye sistemy i komplekxy* [Electrotechnical systems and complexes]. 2014, vol. 2 (23), pp. 25-28.

УДК 621.771.09:621.9

Кургузов С.А., Залетов Ю.Д., Косматов В.И., Гусева О.С., Шевцова И.Н.

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

ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННАЯ ОЧИСТКА ПОВЕРХНОСТИ СТАЛЬНОГО МЕТАЛЛОПРОКАТА

Высокие напряжения между электродами, находящимися в электролите, приводят к формированию разряда, который позволяет воздействовать на их поверхность и проводить очистку от разнообразных загрязнений. В технической литературе недостаточно полно рассмотрен этот процесс для ряда вариантов применения. Поэтому была поставлена задача изучить данный процесс, названный электролитно-плазменной обработкой с целью разработки технологии и устройств очистки поверхности металлопроката от технологических загрязнений, особенно от окалина. Эксперименты проводили с помощью разработанной и изготовленной на кафедре технологии машиностроения установке, позволяющей изменять в широких пределах изучаемые факторы. В данной статье приведены результаты исследований по очистке поверхности горячекатаного металлопроката от технологических и прочих загрязнений при изготовлении металлоконструкций. Определены рациональные диапазоны режимов электролитно-плазменной обработки, позволяющие удалять слой окалины и прочих загрязнений с наибольшей скоростью.

Ключевые слова: очистка, электролитно-плазменная обработка, электролит, плазма, загрязнения, поверхность, режимы, напряжение, плотность электрического тока, окалина.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время производство металлоконструкций, изготовление холоднокатаного металлопроката, металлопроката с разнообразными покрытиями, проволоки и прочих металлоизделий требует совершенствования процессов очистки поверхности заготовки. Как правило, заготовкой является металлопрокат, получаемый горячей прокаткой. Основным недостатком такого проката является наличие на его поверхности различных загрязнений, технологических смазок и, прежде всего, окалины [1, 2].

В сложившихся условиях высокой конкуренции на рынке основным фактором является качество поверхности металла изделия [1, 2]. Следовательно, эффективное удаление окалины с поверхности заготовок и готовых изделий – это технологии, обеспечивающие выпуск качественной продукции [3].

Существует большое количество процессов удаления окалины с поверхности проката, например: химическое и электрохимическое травление в растворах кислот; пластическая деформация, обработка щетками, фрезами, дробью, абразивными кругами, плазменная обработка и прочие. Заметим, что указанные процессы не лишены недостатков. Они не всегда обеспечивают полное удаление окалины либо снижают расходный коэффициент использования металла, либо экологически вредны, либо энергозатратны и др [3-5]. Поэтому эти процессы не решают проблему очистки в полном объеме.

Как показывает практика, до сих пор актуальны исследования процессов и разработка новых устройств очистки поверхности металлопроката, которые позволят оптимизировать затрачиваемые ресурсы и повысить экологическую безопасность производства.

Целью работы является разработка технологического и конструкторского обеспечения процесса электролитно-плазменной очистки от окалины поверхности стального металлопроката в металлургии и машиностроении.

Перспективным процессом удаления окалины и прочих загрязнений с поверхности металлопроката является электролитно-плазменная обработка (ЭПО) [6-10]. Процесс значительно экологичнее химического травления, в связи с тем, что проводится при концентрации химических веществ в электролите в малых количествах. Он менее энергозатратен, так как проходит с меньшими плотностями электрического тока, а применение ингибиторов и поверхностно-активных веществ должно уменьшить травление поверхности обрабатываемого металла [7, 8, 11, 12].

Свойство образования электрической дуги и плазмы между электродами в электролите открыто в начале 20-го века. В настоящее время этот процесс применяют в промышленности для полирования поверхности изделий из низкоуглеродистых легированных сталей, цветных металлов и инструментальных сталей. Заготовку – электрод и стационарный электрод помещают в ванну с раствором электролита и подают высокое, 200 и более вольт, напряжение на электроды. В результате этого на контакте поверхности заготовки и электролита образуется парогазовый слой. В нем происходит образование электрической дуги и затем, за счет ионизации паров электролита, плазмы, являющейся рабочим телом [7]. Наличие высоких температур и давлений в микрообъемах парогазового слоя приводит к нагреву металла, к отслоению с его поверхности загрязнений и, в дальнейшем, стравливанию поверхностного слоя.

В настоящей статье проведены результаты экспериментального исследования процесса ЭПО с целью очистки поверхности стального горячекатаного металлопроката от окалины, сформированной при прокатке.

Обработка металлопроката, имеющего значительные габариты по ширине и длине, требуют соответствующих по размерам ванн для размещения при обработке. Это нерентабельно, так как они должны занимать большие производственные площади. Поэтому приняли решение проводить ЭПО в струе электролита. Это, на наш взгляд, позволит уменьшить размеры установки, упростить управление процессом и улучшить очистку рабочей жидкости от загрязнений при работе.

Эксперименты по ЭПО поверхности образцов го-

рычекатаного листа из углеродистой стали проводили на лабораторной установке, показанной на **рис. 1, а**. Электролит через трубчатый электрод - анод струей подается на поверхность металлопроката - катод. Образцы представляли собой прямоугольные пластины размерами 20×80×2 мм, изготовленные из стали Ст3. На **рис. 1, б** показан фрагмент образца после очистки от окалины.

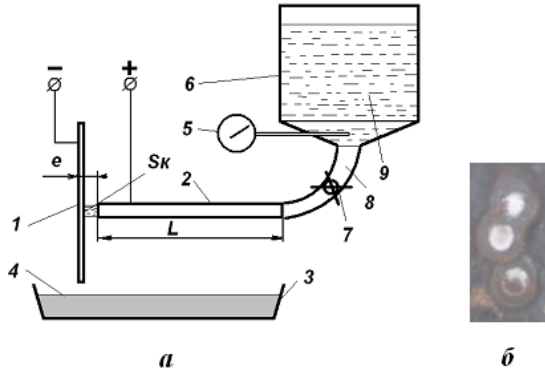


Рис. 1. Схема установки (а) для электролитно-плазменной обработки образцов (б): 1 - образец – катод; 2 - трубчатый анод; 3 - ванна для приема отработанного электролита; 4 - отработанный электролит; 5 - термометр; 6 - емкость с электролитом; 7 – вентиль; 8 - подающая трубка (диэлектрик); 9 - электролит

Варьируемые факторы при ЭПО: 1 - соотношение (K_s) площади (S_k) пятна контакта струи электролита с катодом и площади (S_a) внутренней поверхности трубчатого электрода с диаметром отверстия 5 мм, изготовленного из нержавеющей стали X18H10T. Данное соотношение обеспечивали изменением длины (L) электрода; 2 - расстояние между торцом трубчатого анода и катодом (e); 3 - концентрация солей в электролите (p); 4 - напряжение (U) и плотность электрического тока (i), при которых происходит процесс.

Электролитом являлся раствор карбоната натрия (Na_2CO_3) необходимой концентрации. Степень очистки поверхности металлопроката от окалины определяли визуально с помощью инструментального микроскопа БМИ при 50-тикратном увеличении. Температуру электролита измеряли электронным термометром, помещенным в емкость с электролитом.

В качестве параметра процесса принято время обработки (T_1), при котором происходит полная очистка пятна контакта поверхности образца и струи электролита площадью S_k . Время T_1 определяется путем обработки отдельных участков образца с различной продолжительностью и последующей оценки степени очистки участков. Затем, для уточнения результатов, проводили дополнительную обработку 3-5 участков образца с определенным временем T_1 . Дальнейшее увеличение продолжительности обработки приводит к травлению поверхности металла, а это нецелесообразно.

Результаты опытов приведены на графиках, представленных на **рис. 2-5**.

Начало ЭПО зависит от концентрации электролита, межэлектродного расстояния и напряжения (см. **рис. 2**). Чем больше расстояние e , тем при большем напряжении начинается процесс образования плазмы и процесс более стабильный. Влияние концентрации обратно пропорциональное. С увеличением ее

процесс начинается при значительно меньшем напряжении.

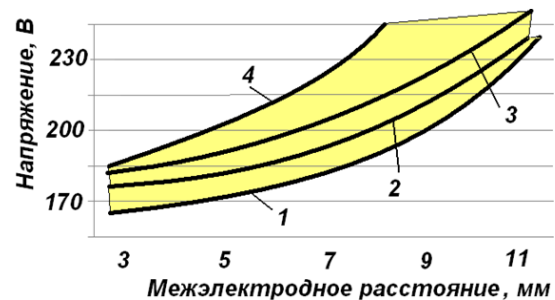


Рис. 2. Напряжение начала ЭПО в зависимости от расстояния между электродами и концентрации электролита: 1 - 12%; 2 - 8%; 3 - 6%; 4 - 2%

Производительность очистки поверхности металла от окалины пропорциональна напряжению и концентрации электролита (см. **рис. 3**).

Анализ результатов опытов показал, что наиболее рациональная концентрация карбоната натрия в электролите – 9–11%. Дальнейшее повышение концентрации не ускоряет очистку. Поэтому во всех экспериментах концентрация соли Na_2CO_3 в электролите принята на уровне 10%.

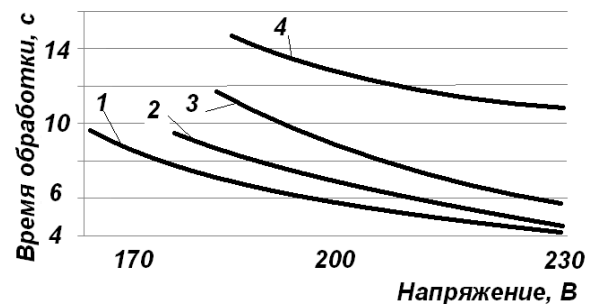


Рис. 3. Время T_1 ЭПО в зависимости от напряжения между электродами и концентрации электролита: 1 - 12%; 2 - 8%; 3 - 6%; 4 - 2%

Увеличение плотности электрического тока ускоряет процесс ЭПО (см. **рис. 4**). В соответствии с законом Ома плотность тока увеличивается с ростом напряжения тока. Увеличение межэлектродного расстояния в исследованном диапазоне мало влияет на производительность ЭПО.

Замечена закономерность влияния соотношения K_s площади пятна контакта струи с катодом и площади анода. Увеличение этого соотношения позволяет повысить производительность ЭПО. Отмечено, что увеличение K_s больше 18-22 нецелесообразно, так как не приводит к дальнейшему повышению производительности процесса.

Обработка результатов проведенных экспериментов позволила определить эмпирическую зависимость между временем очистки поверхности металлопроката T_1 и исследованными факторами процесса, с:

$$T_1 = \frac{K \cdot S^{0,8} \cdot e^{1,7}}{P^{2,5} \cdot I \cdot U^{1,25}},$$

где K – поправочный коэффициент, позволяющий учесть отличия условий обработки от изученных; S – площадь отверстия полого электрода, мм^2 ; e – расстояние между электродами, мм ; P – концентрация

карбоната натрия в электролите, г/л; I – сила электрического тока, А; U – напряжение электрического тока, В.

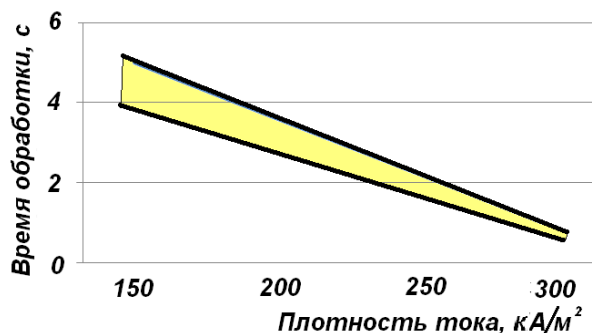


Рис. 4. Зависимость времени T_1 ЭПО от плотности тока

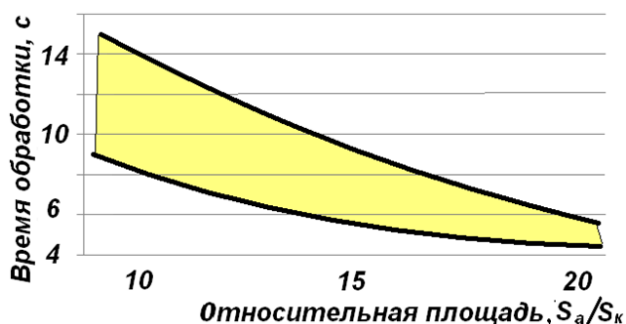


Рис. 5. Зависимость времени обработки от отношения площадей анода и катода K_s

Данная зависимость определена для коэффициента отношения площадей анода и катода $K_s = 20$. Проверка показала её адекватность исследуемому процессу. Заметим, что изменения условий обработки могут привести к изменению показателей степени влияния факторов на получаемый результат.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование показало возможность проведения электролитно-плазменной обработки в проточном электролите, а также определило качественное и количественное влияние исследованных факторов на процесс очистки металлопроката из низкоуглеродистой стали от окалины и прочих загрязнений. Показано, что электролитно-плазменная обработка позволяет достичь полной очистки поверхности металла от окалины. Повышение производительности процесса пропорционально увеличению исследованных факторов, таких как напряжение и плотность электрического тока, отношение площадей электродов и расстояния между ними, а также концентрация электролита. Наименьшее достигнутое время обработки состави-

ло 3–4 с. В настоящее время коллектив авторов проводит работу по дальнейшему исследованию и математическому описанию, изученного экспериментально, процесса ЭПО.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Качество поверхности листового металлопроката / Л.А. Дахно, А.З. Исагулов, К.И. Жаркешов, А.Н. Климушкин, А.А. Смолькин // Труды Университета. 2005. №4. С.34–37.
2. Система оценивания качества поверхности металлопроката / Л.И. Криволапова, О.А. Кравцова, Н.А. Кравцов, С.Д. Коткин // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2011. Т.2. №1. С. 128–132.
3. Зайдес С.А. Сварные металлоконструкции повреждения и разрушения / Иркутский национальный исследовательский технический университет. Иркутск, 2015.
4. Огарков Н.Н., Кургузов С.А., Жигулева И.Ф. Исследование гидромеханического удаления окалины при горячей прокатке // Процессы и оборудование металлургического производства / под. ред. Кальченко А.А. Магнитогорск, 2002. С. 70–73.
5. Совершенствование дробеметной обработки прокатных валков для производства автомобильного листа / Н.Н. Огарков, Ю.Д. Залетов, С.А. Ласков, Е.Ю. Звягина, Ю.А. Пожидаев // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2010. №2. С. 41–43.
6. Кургузов С.А., Пузаков В.В., Краснопарова И.А. Электролитно-плазменная обработка металлопроката из углеродистой стали // Научные труды SWorld. 2013. Т.13. №4. С.41–44.
7. Электролитно-плазменная обработка материалов / И.С.Куликов, С.В. Ващенко, А.Я. Каменев. НАН Беларуси, Объединенный институт энергетических исследований. Сосны. Минск: Беларуская навука. 2010.
8. Возможности электролитно-плазменного полирования при обработке деталей с различным начальным уровнем шероховатости поверхности / В.И. Новиков, А.И. Попов, М.И. Тютчев, М.Н. Зейдан // Металлообработка. 2001. №4. С.29–31.
9. Веселовский А.П., Кюбарсэп С.В., Ушомирская Л.А. Особенности электролитно-плазменной обработки металлов в нетоксичных электролитах // Металлообработка. 2001. №4. С.29–31.
10. Воленко А.П., Бойченко О.В., Чиркунова Н.В. Электролитно-плазменная обработка металлических материалов Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2012. №4(22). С.144–147.
11. Энергетические и электротехнические системы: междунар. сб. науч. трудов / под ред. С.И. Лукьянова, Н.В. Швидченко. Магнитогорск, 2015. Вып. 2.
12. Ушомирская Л.А., Новиков В.И. Полирование легированных сталей в нетоксичных электролитах при высоком напряжении // Металлообработка. 2008. №1. С. 22–24.

INFORMATION IN ENGLISH

ELECTROLYTIC AND PLASMA CLEANING OF THE SURFACE OF STEEL ROLLED METAL PRODUCT

Kurguzov S.A., Zaletov Y.D., Kosmatov V.I., Guseva O.S., Shevtsova I.N.

High voltages between the electrodes in electrolyte result in formation of the charge, which makes it possible to influence their surface and to carry out cleaning of various kinds of pollution. In technical literature this process has not been

properly studied for a number of different applications. Therefore the main task of this research work was to study the process called electrolytic and plasma processing for the purpose of development of technology and devices for surface cleaning of

rolled metal product from technological pollution, particularly from scale. The experiments were made by means of the installation designed and developed at the department of technology of mechanical engineering; this installation makes it possible to change the considered factors over a wide range of values. The present paper describes the results of the research on cleaning the surface of hot-rolled metal products from technological and other pollutants. The research group determined the rational modes of electrolytic and plasma processing, which provide removal of scale layer and other pollutants at the maximum speed.

Keywords: Cleaning, electrolytic and plasma processing, electrolyte, plasma, pollution, surface, modes, voltage, density of electric current, scale.

REFERENCES

1. Dakhno L.A., Isagulov A.Z., Zharkeshov K.I., Klimushkin A.N., Smolkin A.A. Kachestvo poverkhnosti listovogo metalloprokata [Surface Quality of Sheet Rolled Metal Product]. *Proceedings of University*. 2005, no. 4, pp.34-37.
2. Krivolapova L.I., Kravtsova O.A., Kravtsov N.A., Kotkin S.D. Sistema otsenivaniya kachestva poverkhnosti metalloprokata [Assessment System of Surface Quality of Rolled Metal Product]. *Reports of Tomsk state university on control systems and radio electronics*. 2011, vol.2, no.1, pp.128-132.
3. Zaydes S.A. *Svarnye metallokonstruktsii: povrezhdeniya i razrusheniya* [Welded Metalwork: Damage and Failures]. Irkutsk national research technical university. Irkutsk, 2015.
4. Ogarkov N.N., Kurguzov S. A., Zhiguleva I.F. Issledovanie gidromekhanicheskogo udaleniya okaliny pri goryachey prokatke. *Protsessy i oborudovanie metallurgicheskogo proizvodstva*. [Hydromechanical Removal of Scale during Hot Rolling. In the collection of scientific papers: Processes and equipment of metallurgical enterprises]. Under the editorship of Kalchenko A.A. Magnitogorsk. 2002, pp. 70-73.
5. Ogarkov N.N., Zaletov Yu.D., S. A., Zvyagin E.Yu., Laskov S.A., Pozhidayev Yu.A. Sovershenstvovanie drobnetnoy obrabotki prokatnykh valkov dlya proizvodstva avtomobilnogo lista [Improvement of Wheelblast Processing of Rolling Rolls for Production of Automobile Sheet]. *Vestnik of Nosov Magnitogorsk state technical university*. 2010, no.2, pp. 41-43.
6. Kurguzov S.A., Puzakov V.V., Krasnoparova I.A. Elektrolitno-plazmennaya obrabotka metalloprokata iz uglerodistoy stali [Electrolytic and Plasma Processing of Rolled Metal Product from Carbon Steel]. *Scientific works of SWorld*. 2013, vol.13, no.4, pp.41-44.
7. Kulikov I.S., Vashchenko S.V., Kamenev A.Ya. *Elektrolitno-plazmennaya obrabotka materialov* [Electrolytic and Plasma Processing of Materials]. NAN of Belarus, Joint institute of power research. Sosny. Minsk. Belarusky navuka. 2010.
8. Novikov V.I., Popov A.I., Tyukhtyaev M.I., Zeydan M.N. Vozmozhnosti elektrolitno-plazmennogo polirovaniya pri obrabotke detaley s razlichnym nachalnym urovnem sherokhovatosti poverkhnosti [Possibilities of Electrolytic and Plasma Polishing When Processing Details With Various Initial Level of Surface Roughness]. *Metal working*. 2001, no.4, pp.29-31.
9. Veselovsky A.P., Kyubarsep S.V., Ushomirskaya L.A. Osobennosti elektrolitno-plazmennoy obrabotki metallov v netoksichnykh elektrolitakh [Features of Electrolytic and Plasma Processing of Metals in Nontoxic Electrolytes]. *Metal working*. 2001, no.4, pp.29-31.
10. Volenko A.P., Boychenko O.V., Chirkunov N.V. Elektrolitno-plazmennaya obrabotka metallicheskiykh materialov [Electrolytic and plasma processing of the metal materials]. *Science Vector of Tolyatti state university*. 2012, no.4(22), pp.144-147.
11. *Energeticheskie i elektrotekhnicheskie sistemy* [Power and Electrotechnical Systems]. International collection of scientific papers. Under the editorship of S. I. Lukyanov, N. V. Shvidchenko. Magnitogorsk. 2015, iss.2.
12. Ushomirskaya L.A., Novikov V. I. Polirovanie legirovannykh staley v netoksichnykh elektrolitakh pri vysokom napryazhenii [Polishing of Alloyed Steels in Nontoxic Electrolytes at High Voltage]. *Metal working*. 2008, no.1, pp.22-24.

МОНИТОРИНГ, КОНТРОЛЬ И ДИАГНОСТИКА ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

УДК 620.111.3

Николаев А.А.

ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат»

ВНЕДРЕНИЕ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ТРАНСФОРМАТОРА 80 МВА ЭНЕРГОБЛОКА ТЭЦ ОАО «ММК»

Отмечено, что внедрение систем мониторинга и диагностирования технического состояния силовых трансформаторов является актуальной задачей, включенной в перечень главных направлений модернизации производства ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (ОАО «ММК»). Рассмотрены методы диагностирования, реализованные в стационарной системе оперативного контроля технического состояния трансформатора 80 МВА энергоблока ТЭЦ. Обоснованы функции, предложена модульная структура, разработана обобщенная функциональная схема системы. Рассмотрено техническое исполнение системы. Диагностическая информация поступает от электромагнитных датчиков частичных разрядов (ЧР), установленных на высоковольтных вводах, акустических датчиков ЧР, датчиков температуры верхних и нижних слоев масла и других стационарных измерительных устройств. Для анализа состояния масла применен анализатор влагосодержания и концентрации растворенных газов марки Hudegran M2. Сбор и обработка информации проводятся с помощью системы TDM P034, адаптированной к условиям блочного трансформатора. Отличием разработанной системы является акустический контроль разрядной активности, осуществляемый с помощью специальных датчиков, установленных на баке трансформатора. Отмечена высокая эффективность внедрения стационарных систем мониторинга по сравнению с периодическим комплексным обследованием.

Ключевые слова: теплоэлектроцентраль, энергоблок, трансформатор, техническое состояние, диагностические параметры, контроль, стационарная система, функции, требования, структура, разработка, внедрение, технико-экономическая эффективность.

ВВЕДЕНИЕ

Внедрение современных средств мониторинга и методов оперативного диагностирования обеспечивает эксплуатационный персонал следующей информацией:

- о текущем техническом состоянии трансформаторов и причинах, обусловивших его ухудшение;
- об остаточном на данный момент времени ресурсе;
- об оптимальных сроках проведения ремонтных работ, которые должны быть выполнены на данном оборудовании для поддержания его безаварийной эксплуатации.

Анализ состояния силовых трансформаторов целесообразно проводить в режиме on-line без отключения и вывода в ремонт (непрерывный метод диагностирования). В последнее время интенсивно развиваются и внедряются методы контроля состояния трансформаторов с применением современных компьютерных технологий, обеспечивающих автоматический сбор, обработку и анализ данных [1, 2].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Трансформаторы являются дорогостоящим ответственным оборудованием, в значительной степени определяющим технологический цикл и энергетическую безопасность металлургического предприятия. Потому внедрение стационарных систем мониторинга их технического состояния определено как одно из приоритетных направлений модернизации ОАО «ММК». Это связано с тем, что значительная часть силовых трансформаторов выработала свой ресурс [3, 4]. К тому же в сталеплавильных цехах находятся в эксплуатации печные трансформаторы, установленные на сверх-

мощных дуговых сталеплавильных печах (ДСП) и агрегатах печь-ковш (АПК). Их эксплуатационные режимы связаны с технологией электродугового расплава стали, характеризуются резкопеременной нагрузкой и сопровождаются частой коммутацией РПН [5, 6].

В направлении реализации принятой стратегии разработаны и внедрены системы мониторинга технического состояния трансформаторов ДСП и АПК электросталеплавильного цеха (ЭСЦ) [7–9]. Аналогичная система смонтирована и находится в эксплуатации на трансформаторе ТДНМ-63000/100000/110У1, установленном на подстанции №96 цеха сетей и подстанций [10]. Данные системы выполнены на базе диагностического оборудования, разработанного ОАО «Димрус» (г. Пермь). Основной целью является сокращение аварий и простоев ответственного оборудования.

В настоящее время завершено внедрение стационарной системы непрерывного контроля технического состояния трансформатора ТДН-80000/110-У1 энергоблока №4 теплоэлектроцентрали (ТЭЦ) ОАО «ММК». При ее разработке решен комплекс вопросов, включающий:

- обоснование функций системы и методов диагностирования;
- разработку структуры, выбор оборудования;
- монтаж, испытания и сдачу в промышленную эксплуатацию.

В результате выполнена адаптация разработок фирмы «Димрус» к конкретным условиям и требованиям обслуживающего персонала.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Силовые понижающие трехфазные масляные трансформаторы ТД-80000 выпускаются заводом «Тольяттинский Трансформатор». Трансформатор

ТДН-80000/110-У1 – двухобмоточный класса 110 кВ, оснащен регулятором высокого напряжения в диапазоне 16%, с системой охлаждения вида ONAN или ONAF. Трансформаторы предназначены для работы на электростанциях в блоке с генератором. Технические характеристики представлены в **таблице**.

Технические характеристики масляного трансформатора ТД-80000/110-У1

Тип	ТД-80000/110-У1	
Номинальная мощность, кВА	80000	
Номинальное напряжение, кВ	ВН	121
	НН	6,3; 10,5
Схема и группа соединения обмоток	Yн/Δ-11	
Потери, кВт	х.х	40,0
	к.з.	310,0
Напряжение к.з., %	10,5	
Ток х.х., %	0,23	
Длина, мм	6200	
Ширина, мм	4650	
Высота, мм	6150	
Масса, кг	масла	12400
	полная	87500

Блочные трансформаторы, как правило, длительное время эксплуатируются при постоянных нагрузках, близких к номинальным. Поэтому характерными повреждениями являются дефекты изоляции активной части, вызванные процессами старения. Как следствие, при длительной эксплуатации наибольшую вероятность имеют межвитковые или межкатушечные разряды [11].

ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДОВ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

В системе мониторинга состояния трансформатора обоснованы следующие методы диагностирования:

1. Анализ трансформаторного масла:

- контроль влагосодержания масла;
- контроль состава газов, растворенных в масле.

2. Тепловой анализ:

- контроль температуры верхних и нижних слоев масла в баке;
- контроль температуры окружающей среды.

3. Электрический анализ:

- измерение рабочих токов и напряжений трансформатора;
- измерение угла диэлектрических потерь $\tan \delta$, емкости основной изоляции и небаланса токов проводимости вводов.

4. Локация разрядных явлений:

- определение зон изоляции с наличием частичных разрядов (ЧР);
- выявление узлов с искрением;
- локация ЧР на высоковольтных вводах и в баке.

Виброакустический метод для трансформаторов данного класса применять нецелесообразно в связи с относительно спокойным характером нагрузки и соответственно низкой вибрацией.

На основании анализа измеренных сигналов рассчитываются диагностические параметры. Анализ их временных трендов дает возможность определять степень износа и тенденции изменения состояния трансформатора, планировать необходимые ремонтные и сервисные работы.

ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДОВ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

Сбор и обработка информации осуществляются с помощью стационарной системы, в основу которой положена разработка TDM (Transformer Diagnostics Monitor) ОАО «Димрус» (**рис. 1**). Она включает в себя набор технических и программных средств, предназначенных для проведения диагностики и оценки состояния силовых трансформаторов [12]. Аппаратный состав и алгоритмы программного обеспечения этой системы адаптированы с учетом конструктивных особенностей и режимов трансформатора энергоблока.

Система выполнена в виде технической и алгоритмически интегрированной структуры. Конструктивно она состоит из семи модулей, осуществляющих обработку сигналов от первичных датчиков, и непосредственно основного прибора системы мониторинга TDM, установленного в монтажном шкафу рядом с контролируемым трансформатором. Функциональное назначение модулей отражено на **рис. 1**.

Полный состав модулей системы TDM и их подробное описание приведены в [9]. Модульная структура обеспечивает возможность конфигурации системы, необходимой для конкретного агрегата в соответствии с условиями эксплуатации и требованиями заказчика.

ВНЕДРЕНИЕ СИСТЕМЫ

Общий вид шкафа TDM, снабженный модулями (см. **рис. 1**), показан на **рис. 2, а**. Модуль контроля и управления РПН не подключен в связи с относительно редкой коммутацией РПН под нагрузкой. Шкаф смонтирован на стене в непосредственной близости к трансформатору. На **рис. 2, б** показано крепление анализатора газов.

Основными контрольно-измерительными приборами являются газоанализатор Hydram M2 [13] и комплект датчиков, в который входят:

- датчики токов проводимости и частичных разрядов во вводах;
- акустические датчики ЧР в баке;
- датчики ЧР в нейтрали;
- датчики токов нагрузки и напряжений в фазах;
- датчики температуры масла.

В общей сложности установлено более 20 датчиков. Все они являются сертифицированным оборудованием.

АКУСТИЧЕСКОЕ ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ

Отличим разработанной системы от упомянутых выше систем, внедренных на сетевом трансформаторе подстанции №96 и печных трансформаторах ЭСПЦ, является акустический контроль ЧР. Данный вид контроля является наиболее информативным и позволяет диагностировать большинство неисправностей, развивающихся в изоляции оборудования внутри бака.

Опыт акустической локации ЧР в трансформаторах центральной электростанции ОАО «ММК» методом периодических замеров с использованием переносного прибора AR-700 рассмотрен в публикациях [14–16]. В разработанной системе акустический контроль осуществляют путем непрерывной обработки сигналов, поступающих от датчиков, закрепленных на

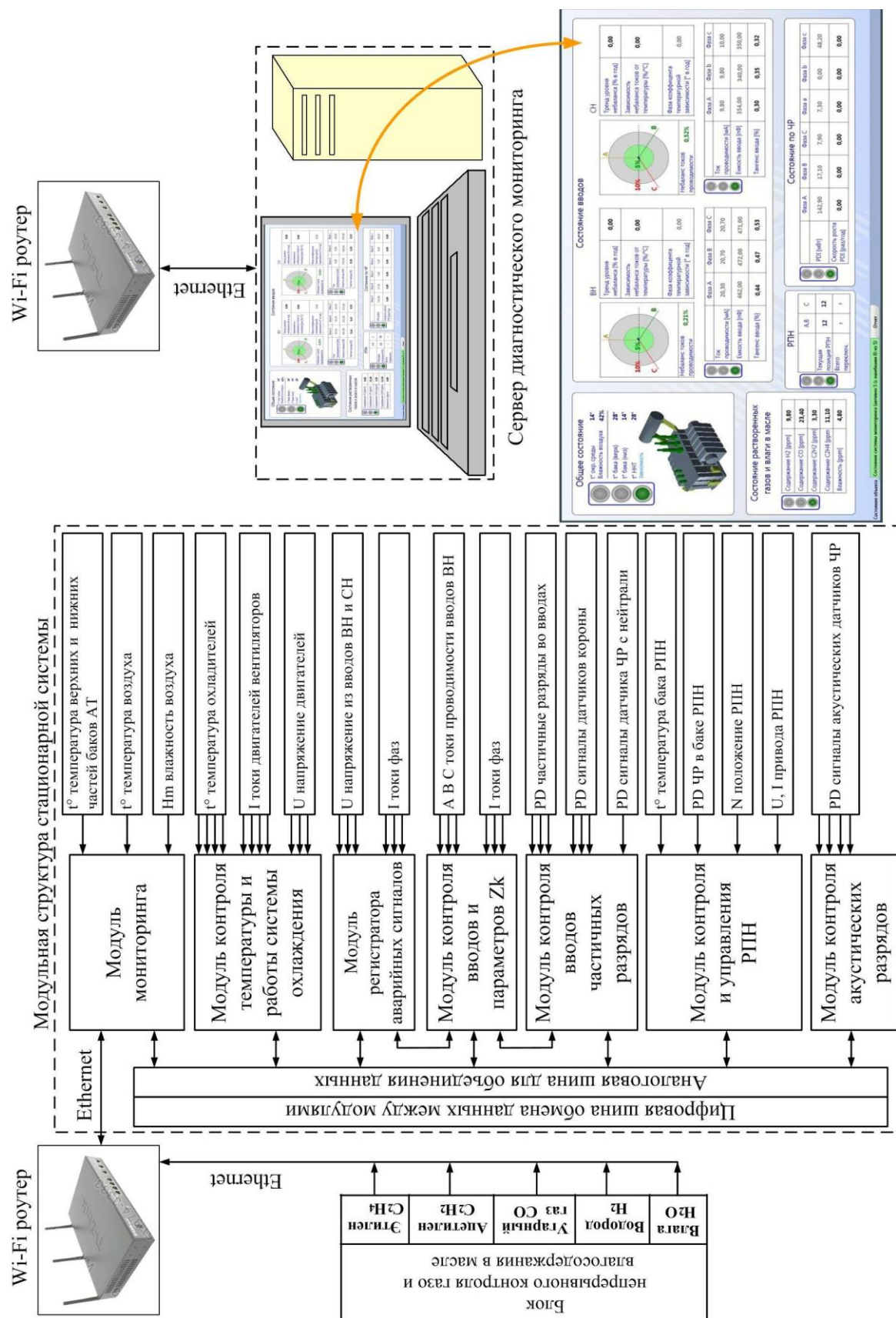


Рис. 1. Функциональная структура системы непрерывного контроля технического состояния трансформатора 80 МВА

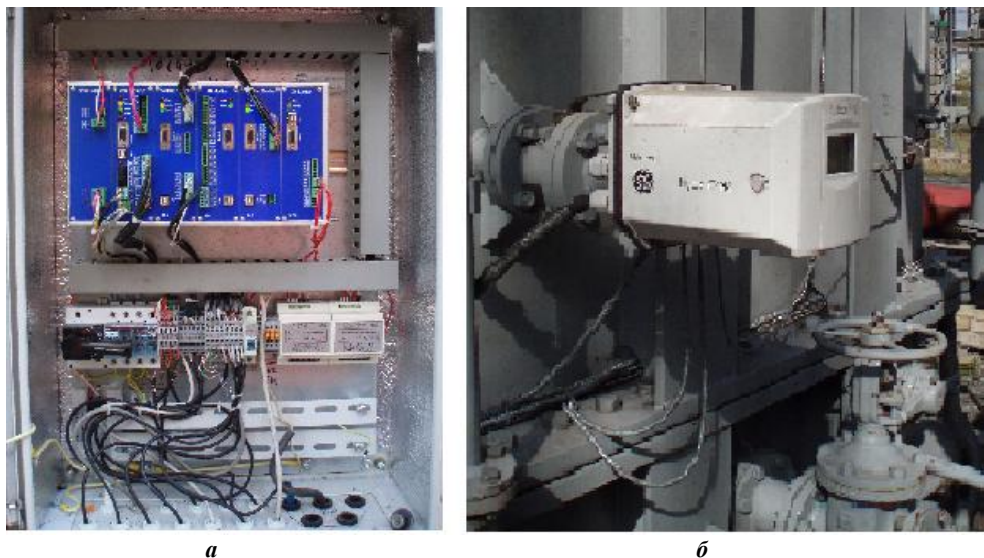


Рис. 2. Общий вид системы TDM трансформатора ТЭЦ (а); подключение анализатора газов Hydram M2 (б)

баке трансформатора в непосредственной близости от обмоток (рис. 3). При этом совместная обработка результатов измерений ЧР и концентрации газов, растворенных в масле, дает наиболее точные результаты по диагностике дефекта и определению места его возникновения.



Рис. 3. Крепление акустических датчиков ЧР на корпусе трансформатора

ГЛАВНЫЙ ЭКРАН СИСТЕМЫ

Разработанная система позволяет в удобной форме представлять на экране монитора результаты комплексной оценки всех контролируемых параметров, начиная от графиков их изменения и заканчивая обобщенными результатами, представленными в наглядной табличной форме. Вывод информации о состоянии трансформатора проходит в системе «Inva», разработанной ОАО «Димрус» [17]. «Inva» – это программно-аппаратный комплекс, осуществляющий сбор, хранение, анализ и моделирование изменений параметров, происходящих в процессе эксплуатации электрического оборудования. Система предназначена для оперативной диагностики технического состояния, выявления опасных и развивающихся дефектов.

Главное окно с указанием основных контролируемых параметров приведено на рис. 4. Для транс-

форматора показаны усредненные данные, характеризующие состояние вводов, обмоток и данные о частичных разрядах на стороне высокого напряжения. Также показаны параметры окружающей среды, токи фаз по вводам и другие координаты.

Наглядной формой представления, удобной для обслуживающего персонала, являются сигналы «светофора», характеризующие соотношение параметров и их предельных значений. Наряду с текущей информацией это обеспечивает возможность оперативной реакции на превышение допустимых пределов. Пороговые значения, на превышение которых настроены сигналы «светофора», приведены в [18].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнены монтаж, наладка и настройка разработанной системы на трансформаторе 80 МВА энергоблока №4 ТЭЦ. Проведены опытно-промышленные испытания. Внедрение системы обеспечивает:

- повышение эффективности непрерывного контроля технического состояния блочного трансформатора;
- сокращение времени локализации, идентификации и устранения неисправностей на ранних стадиях;
- прогнозирование остаточного ресурса за счет анализа технического состояния за длительный период;
- повышение эффективности планирования и организации ремонтных работ с сокращением затрат на их проведение.

Сопоставление технико-экономической эффективности внедрения стационарных систем мониторинга и проведения периодических комплексных обследований трансформатора рассмотрено в [19]. Показано, что если хотя бы одна из стационарных систем обеспечит предотвращение одной аварии средней тяжести, то окупятся затраты на приобретение и установку 15-20 аналогичных систем.

Система рекомендуется для расширенного внедрения на силовых трансформаторах электростанций и подстанций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Совершенствование автоматизированных электроприводов и диагностика силового электрооборудования / И.А. Селиванов, А.С. Карандаев, С.А. Евдокимов, В.Р. Храмин, А.А. Шеметова, А.С. Евдокимов, А.А. Лукин, А.Ю. Андрияшин, П.В. Шилиев, В.В. Головин, А.А.Титов, С.Е. Мостовой, С.А. Петряков // Изв. вузов. Электромеханика. 2009. №1. С. 5–11.
2. 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. Храмин // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2014. №1. С.129–136.
3. 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.
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. Диагностические функции системы непрерывного контроля технического состояния трансформаторов агрегатов дуговых сталеплавильных печей / А.С. Карандаев, С.А. Евдокимов, В.Р. Храмин, Р.А. Леднов // Металлург. 2014. №8. С.53–59.
6. 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.
7. Система оперативного контроля технического состояния трансформатора сверхмощной дуговой сталеплавильной печи / А.С. Карандаев, С.А. Евдокимов, В.Р. Храмин, А.А. Сарлыбаев // Металлург 2014. №10. С. 42–47.
8. Система диагностического мониторинга технического состояния трансформатора дуговой сталеплавильной печи / А.С. Карандаев, С.А. Евдокимов, В.Р. Храмин, А.А. Сарлыбаев // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2014. №4. С.27–33.
9. Information and Measuring System for Electric Arc Furnace Transformer Monitoring /A.S. Karandaev, S.A. Evdokimov, V.R. Khrashin, O.I. Karandeva // 12th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE-2014). Novosibirsk. 2014. Vol.1. P.273-279. doi: 10.1109/APEIE.2014.7040896.
10. Khrashin V.R., Evdokimov S.A., Nikolaev A.A., Nikolaev A.A., Karandaev A.S. Monitoring Technical State of the Power Transformers Is a Necessary Condition of the Smart-Grid Technology Introduction within the Industrial Electric Networks. Proceedings of the 2015 IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EConRusNW). P.214-220. doi: 10.1109/EConRusNW.2015.7102265.
11. Результаты длительной периодической диагностики силовых трансформаторов / Ю.П. Аксенов, А.В. Голубев, В.И. Завидей, А.В. Юрин, И.В. Ярошенко // Электро, 2006. №1. С. 28–35.
12. Модульная система для мониторинга состояния трансформаторного оборудования TDM (TDMR). Руководство по эксплуатации. Пермь: ПФ «Димрус». 12 с. URL: <http://dimrus.ru/download/category/23-tdm.html>
13. Система непрерывного контроля трансформаторного масла HYDRAN M2. URL: <http://www.zeosar.ru/rus/print/hydran-m2.html>
14. 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. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2008. №26(126). С.26–31.
15. 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.
16. 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.
17. Программное обеспечение «Inva (portable)». Руководство пользователя. ООО «Димрус». 39 с. http://dimrus.ru/software/inva_p_um.pdf.
18. Сарлыбаев А.А. Характеристика систем непрерывного контроля технического состояния печных трансформаторов // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. 2016. Т.3. №1. С. 24-35.
19. Николаев Н.А., Николаев А.А., Леднов Р.А. Диагностирование технического состояния трансформаторного оборудования как основа энергетической безопасности промышленного предприятия // Электротехнические системы и комплексы, 2014. № 4. С. 34–40.

INFORMATION IN ENGLISH

INTRODUCTION OF TECHNICAL STATE MONITORING SYSTEM FOR 80 MVA TRANSFORMER OF POWER UNIT OF CHP AT OJSC “MMK”

Nikolaev A.A.

It was noted that the introduction of monitoring systems and diagnostic systems of technical state of power transformers is an urgent task included into the list of modernization issues at the OJSC “MMK”. The author considered the diagnostic methods applied in the stationary system of on-line control of technical state of 80 MVA transformer of the CHP power unit. The research group justified the functions, proposed the modular structure and developed the general functional scheme of the system. The design of the system was considered. Diagnostic information is supplied by the electromagnetic sensors of partial discharge installed at high-voltage leads, by acoustic sensors of partial discharge, by temperature detectors of upper and lower

layers of oil and by other stationary measuring devices. To carry out the analysis of the state of the oil, the author used an analyzer of moisture content and dissolved gases content, Hydran M2. Gathering and processing of information was performed using TDM P034 system adjusted to the conditions of the main transformer. The developed system is distinguished by acoustic monitoring of the discharge, which is provided by special sensors installed on the transformer tank. The author noted high efficiency of introducing stationary monitoring systems as compared with periodic maintenance.

Keywords: Combined heat power plant, power unit,

transformer, technical state, test parameters, control, stationary system, functions, requirements, structure, development, implementation, technical-and-economic efficiency.

REFERENCES

1. Selivanov I.A., Karandaev A.S., Evdokimov S.A., Khramshin V.R., A.A. Shemetova, A.S. Evdokimov, A.A. Lukin, A.Yu. Andryushin, P.V. Shilyaev, V.V. Golovin, S.E. Mostoviy, S.A. Petryakov Sovershenstvovanie avtomatizirovannykh elektropriodov i diagnostika silovogo elektrooborudovaniya [Improvement of Automatic Electric Drives and Diagnostics of Power Electrical Equipment]. *Proceedings of Universities. Electrical engineering*. 2009, no.1, pp. 5–11.
2. Lukyanov S.I., Karandaev A.S., Evdokimov S.A., Sarvarov A.S., Petushkov M.Yu., Khramshin V.R. Razrabotka i vnedrenie intellektualnykh system diagnostirovaniya tekhnicheskogo sostoyaniya elektricheskogo oborudovaniya [Development and Implementation of Intelligent Systems of Technical State Diagnostics of Electrical Facilities]. *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*. 2014, no.1, pp. 129–136.
3. Karandaeva O.I. Kharakteristika povrezhdaemosti setevykh i blochnykh transformatorov oao “Magnitogorskiy metallurgicheskii kombinat” [Damage Rate Characteristic of Network and Main Transformers of the OJSC “MMK”]. *Proceedings of the South-Ural State University. Series: Power engineering*. 2011, no.4, pp. 15–20.
4. Kuznetsov E.A., Albrekht A.Ya., Karandaeva O.I., Tsemoshevich S.L. Analiz povrezhdaemosti silovykh transformatorov elektrostantsiy metallurgicheskogo kombinata [Damage Rate Analysis of Power Transformers of Power Stations at Metallurgical Enterprises]. *Proceedings of universities. Electrical engineering*. 2011, no.4, pp. 82–85.
5. Karandaev A.S., Evdokimov S.A., Khramshin V.R., Lednov R.A. Diagnosticheskie funktsii sistemy nepreryvnogo kontrolya tekhnicheskogo sostoyaniya transformatorov agregatov dugovykh staleplavilnykh pechey [Diagnostic Functions of Technical State Monitoring of Transformers of Arc Steel-making Furnaces]. *Metallurgist*. 2014, no.8, pp.53–59.
6. Karandaev A.S., Evdokimov S.A., Sarlybaev A.A., Lednov R.A. Trebovaniya k sisteme monitoringa tekhnicheskogo sostoyaniya transformatora sverkhmoschnoy dugovoy staleplavilnoy pechi [Requirements to Monitoring System of Technical State of Transformer of Ultra-high Power Arc Steel-making Furnace]. *Machine-building: network electronic scientific journal*. 2013, no.2, pp. 58–68.
7. Karandaev A.S., Evdokimov S.A., Khramshin V.R., Sarlybaev A.A. Sistema operativnogo kontrolya tekhnicheskogo sostoyaniya transformatora sverkhmoschnoy dugovoy staleplavilnoy pechi [Monitoring System of Technical State of Transformer of Ultra-high Power Arc Steel-making Furnace]. *Metallurgist*. 2014, no.10, pp.42–47.
8. Karandaev A.S., Evdokimov S.A., Khramshin V.R., Sarlybaev A.A. Sistema diagnosticheskogo monitoringa tekhnicheskogo sostoyaniya transformatora dugovoy staleplavilnoy pechi [Monitoring System of Transformer Technical State of Electric Arc Steel-making Furnace]. *Electrical engineering, power engineering, electrical engineering industry*. 2014, no.4, pp.27–33.
9. Karandaev A.S., Evdokimov S.A., Khramshin V.R., Karandaeva O.I. Information and Measuring System for Electric Arc Furnace Transformer Monitoring. *12th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE-2014)*. Novosibirsk. 2014, vol.1, pp.273–279. doi: 10.1109/APEIE.2014.7040896.
10. Khramshin V.R., Evdokimov S.A., Nikolaev A.A., Nikolaev A.A., Karandaev A.S. Monitoring Technical State of the Power Transformers Is a Necessary Condition of the Smart-Grid Technology Introduction within the Industrial Electric Networks. *Proceedings of the 2015 IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EIConRusNW)*. P.214-220. doi: 10.1109/EIConRusNW.2015.7102265
11. Aksenov Yu.P., Golubev A.V., Zaviday V.I., Yurin A.V., Yaroshenko I.V. Rezultaty dlitelnoy periodicheskoy diagnostiki silovykh transformatorov [Results of Long-term Periodic Diagnostics of Power Transformers]. *Electro*. 2006, no.1, pp.28–35.
12. Modulnaya sistema dlya monitoringa sostoyaniya transformatornogo oborudovaniya. *Rukovodstvo po ekspluatatsii* [Modular System for State Monitoring of TDM Transformers (TDMR). Operations manual.]. Perm: PVF «Dimrus». 12p. URL: <http://dimrus.ru/download/category/23-tdm.html>.
13. Sistema nepreryvnogo kontrolya transformatornogo masla HYDRAN M2 [System of Continuous Monitoring of Transformer Oil HYDRAN M2]. URL: <http://www.zeo-sar.ru/rus/print/hydran-m2.html>.
14. Karandaev A.S., Evdokimov S.A., Karandaeva O.I., Mostovoy S.E., Chertousov A.A. Kontrol tekhnicheskogo sostoyaniya silovykh transformatorov metodom akusticheskogo diagnostirovaniya [Control of Technical State of Power Transformers Using Acoustic Diagnostics Method]. *Proceedings of the South-Ural State University. Series «Power engineering»*. Issue 10. Chelyabinsk: Publishing center of YuYrGU, 2008, no. 26(126). pp. 26–31.
15. Karandaev A.S., Evdokimov S.A., Devyatov D.Kh., Parsunkin B.N., Sarlybaev A.A. Diagnostirovanie silovykh transformatorov metodom akusticheskoy lokatsii chastichnykh razryadov [Diagnostics of Power Transformers Using Method of Acoustic Location of Partial Discharge]. *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*. 2012, no.1, pp. 105–108.
16. Karandaev A.S., Evdokimov S.A., Tsemoshevich S.L., Mostovoy S.E., Anufriev A.V., Sarlybaev A.A. Metodika diagnostirovaniya silovykh transformatorov na osnove klasternoy obrabotki akusticheskikh signalov [Diagnostics Method of Power Transformers Based on Cluster Processing of Acoustic Signals]. *Proceedings of universities. Electrical engineering*. 2011, no.4, pp. 86–90.
17. Computer software «Inva (portable)». Operating manual. «Dimrus» LLC/ 39 p. http://dimrus.ru/software/inva_p_um.pdf
18. Sarlybaev A.A. Kharakteristika system nepreryvnogo kontrolya tekhnicheskogo sostoyaniya pechnykh transformatorov [Characteristic of Continuous Control System of Technical State of Furnace Transformers]. *Electrical engineering: network electronic scientific journal*. 2016, vol.3, no.1, pp. 24-35.
19. Nikolaev N.A., Nikolaev A.A., Lednov R.A. Diagnostirovanie tekhnicheskogo sostoyaniya transformatornogo oborudovaniya kak osnova energeticheskoy bezopasnosti promyshlennogo predpriyatiya [Diagnostics of Technical State of Transformers as a Basis of Security of Energy Supply of Industrial Enterprise]. *Electrotechnical systems and complexes*. 2014, no.4, pp.34–40.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Баширов Мусса Гумерович – д-р техн. наук, проф., каф. электрооборудования и автоматики промышленных предприятий, Филиал ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» в г. Салавате, Россия. E-mail: earr@yandex.ru.

Бодров Евгений Эдуардович – канд. техн. наук, доцент, каф. электроники и микроэлектроники, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: forheartist@mail.ru.

Гаврилов Евгений Сергеевич – студент, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия.

Галлямов Рифат Уралович – студент, Филиал ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» в г. Салавате, Россия.

Гареев Ильнур Минуллович – студент, Филиал ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» в г. Салавате, Россия.

Грибовский Григорий Никифорович – магистрант, каф. электрооборудования и автоматики промышленных предприятий, Филиал ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» в г. Салавате, Россия.

Гузей Ксения Евгеньевна – инженер ЗАО «КонсОМ СКС», г. Магнитогорск, Россия.

Гусева Ольга Сергеевна – студент, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия, E-mail: Ori@mail.ru.

Диденко Евгений Евгеньевич – аспирант, каф. электропривода, ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет», г. Липецк, Россия. E-mail: didenko_ee@mail.ru.

Закирова Регина Артуровна – студентка, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: regina_174@mail.ru.

Залетов Юрий Дмитриевич – канд. техн. наук, доцент каф. «Технология машиностроения», ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: UZaletov@mail.ru.

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

Косматов Валерий Иванович – канд. техн. наук, профессор, каф. автоматизированного электропривода и мехатроники, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия.

Крыльцов Сергей Борисович – аспирант, Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», г. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: kryltcov@outlook.com.

Кузнецов Алексей Владимирович – доцент, каф. электрооборудования и электротехники, ФГБОУ ВПО «Тверской государственный технический университет», Тверь, Россия.

Кургузов Сергей Анатольевич – канд. техн. наук, доцент каф. «Технология машиностроения», ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: ksaask@mail.ru.

Линьков Сергей Александрович – канд. техн. наук, доцент кафедры автоматизированного электропривода и мехатроники, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия.

Лукьянов Сергей Иванович – д-р техн. наук, проф., директор института энергетики и автоматизированных систем, зав. каф. электроники и микроэлектроники, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им.

Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия.

Мазитов Дмитрий Михеатович – ст. преподаватель каф. электроники и микроэлектроники, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия.

Майорова Евгения Станиславовна – магистрант, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия.

Макаров Анатолий Николаевич – д-р техн. наук, проф., заведующий каф. электроснабжения и электротехники, ФГБОУ ВПО «Тверской государственный технический университет», Тверь, Россия. E-mail: tgtu_kafedra_ese@mail.ru.

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

Мугалимов Риф Гарифович – д-р техн. наук, проф. каф. электротехники и электротехнических систем, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: energosberegenie@rambler.ru.

Мугалимова Алия Рифовна – магистрант, каф. автоматизированного электропривода и мехатроники, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: energosberegenie@rambler.ru.

Николаев Андрей Андреевич – мастер участка ЦЭСИП ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат», г. Магнитогорск, Россия.

Новожилов Никита Геннадьевич – аспирант, Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», г. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: nikita_novozhilov@mail.ru.

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

Посохов Иван Александрович – программист, ЗАО «РУТЫЮБ», г. Москва, Россия. E-mail: posohof@gmail.com.

Сафин Ильдар Рафкатович – канд. техн. наук, инженер, ООО «Объединенная сервисная компания», г. Магнитогорск, Россия.

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

Хисматуллин Азат Салаватович – канд. физ.-мат. наук, доцент каф. электрооборудования и автоматики промышленных предприятий, Филиал ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» в г. Салавате, Россия. E-mail: hism5az@mail.ru

Чистяков Дмитрий Владимирович – канд. социол. наук, исполнительный директор развития ЗАО «КонсОМ СКС», г. Магнитогорск, Россия.

Шевцова Ирина Николаевна – студент, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия, E-mail: sctv@mail.ru.

Шонин Олег Борисович – д-р техн. наук, проф., Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», г. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: ninosh_eltech@mail.ru.

Якимов Иван Александрович – ст. преподаватель, каф. автоматизированного электропривода и мехатроники, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Bashirov Mussa Gumerovich – D.Sc. (Eng.), professor, electrical equipment and automation of industrial enterprises, FSBEI HPPO "Ufa State Petroleum Technological University", Salavat branch, Russia. E-mail: eapp@yandex.ru.

Bodrov Eugenii Eduardovich – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Electronics and Microelectronics Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: fortheartist@mail.ru.

Chistyakov Dmitriy Vladimirovich – Ph.D. in Sociology, chief executive officer, CJSC «KonsOM SKS», Magnitogorsk, Russia.

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

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

Gallyamov Rifat Uralovich – a student, FSBEI HPPO "Ufa State Petroleum Technological University", Salavat branch, Russia.

Gareev Ilmur Minulloovich – a student, FSBEI HPPO "Ufa State Petroleum Technological University", Salavat branch, Russia.

Gavrilov Evgeniy Sergeevich – a student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Gribovsky Grigoriy Nikiforovich – Master's degree student, Department of electrical equipment and automation of industrial enterprises, FSBEI HPPO "Ufa State Petroleum Technological University", Salavat branch, Russia.

Guseva Olga Sergeyevna – a student, Nosov Magnitogorsk state technical university, Magnitogorsk, Russia. E-mail: ori@mail.ru.

Guzey Ksenia Evgenievna – an engineer, CJSC «KonsOM SKS», Magnitogorsk, Russia.

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

Khismatullin Azat Salavatovich – Ph.D. in physics, Associate Professor of electrical equipment and automation of industrial enterprises, FSBEI HPPO "Ufa State Petroleum Technological University", Salavat branch, Russia. E-mail: him5az@mail.ru.

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

Kryltsov Sergei Borisovich – postgraduate student, National Mineral Resources University (Mining University), St. Petersburg, Russia. E-mail: kryltcov@outlook.com.

Kurguzov Sergey Anatolyevich – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Department of Technology of mechanical engineering, Nosov Magnitogorsk state technical university, Magnitogorsk, Russia. E-mail: ksaask@mail.ru.

Kuznetsov Aleksey Vladimirovich – Associate Professor of Department of power supply and electrical engineering, Tver State Technical University. Tver, Russia.

Linkov Sergey Aleksandrovich – Ph.D. (Eng.), Associate Professor of Automated Electrical Drive and Mechatronics Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

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

Makarov Anatoliy Nikolaevich – D.Sc. (Eng.), professor, Head of Department of power supply and electrical engineering, Tver State Technical University. Tver, Russia. E-mail: tgtu_kafedra_ese@mail.ru.

Mayorova Evgenia Stanislavovna – a postgraduate student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Mazitov Dmitriy Midekhatovich – Assistant Professor, Electronics and Microelectronics Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Mesheryakov Viktor Nikolaevich – D.Sc. (Eng.), head of Electric Drive Department of Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia. E-mail: mesherek@stu.lipetsk.ru.

Mugalimov Rif Garifovich – D.Sc. (Eng.), Professor, Department of Electrical and Systems Engineering, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: energosberegenie@rambler.ru.

Mugalimova Aliy Rifovna – master's degree student, Department of automated electric drive and mechatronics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: energosberegenie@rambler.ru.

Nikolaev Andrey Andreevich – production supervisor, OJSC «MMK», Magnitogorsk, Russia.

Novozhilov Nikita Gennadievich – postgraduate student, National Mineral Resources University (Mining University), St. Petersburg, Russia. E-mail: nikita_novozhilov@mail.ru.

Panov Alexander Nikolaevich – Ph.D.(Eng.), head of innovation department, CJSC «KonsOM SKS», Magnitogorsk, Russia. E-mail: panov.a@konsom.ru.

Posohov Ivan Aleksandrovich – programmer, JSC «RUTUBE», Moscow, Russia. E-mail: posohof@gmail.com.

Safin Ildar Rafkatovich – Ph.D. (Eng.), engineer, USC Ltd., Magnitogorsk, Russia.

Shevtsova Irina Nikolaevna – a student, Nosov Magnitogorsk state technical university, Magnitogorsk, Russia. E-mail: ishevcova@inbox.ru.

Shonin Oleg Borisovich – D.Sc. (Eng.), Professor., National Mineral Resources University (Mining University), St. Petersburg, Russia. E-mail: ninosh_eltech@mail.ru.

Yakimov Ivan Aleksandrovich – Assistant Professor, Automated Electrical Drive and Mechatronics Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Zakirova Regina Arturovna – a student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: regina_174@mail.ru.

Zaletov Yuriy Dmitriyevich – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Department of Technology of mechanical engineering, Nosov Magnitogorsk state technical university, Magnitogorsk, Russia. E-mail: UZaletov@mail.ru.

Уважаемые коллеги!

Приглашаем Вас опубликовать статьи в журнале «Электротехнические системы и комплексы», входящий в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук по группам научных специальностей 05.09.00 – электротехника, 05.13.00 – информатика, вычислительная техника и управление, 05.14.00 – энергетика.

Требования к оформлению работы. Рекомендуемый объем статьи – 6-10 стр. Страницы не нумеруются. Статьи предоставляются в электронном виде в формате редактора *Microsoft Word* 2003 или 2007 на одном из рабочих языков журнала. Текст статьи, сведения об авторах, аннотация, ключевые слова и список литературы представляются на электронном носителе в виде файла и распечаткой на стандартных листах бумаги формата А4. Число авторов одной статьи не должно превышать *пяти* человек.

При наборе статьи рекомендуются **следующие установки:**

- шрифт – *Times New Roman*, размер – 12 пт., междустрочный интервал – 1,5 строки, перенос слов – автоматический;

- при вставке формул использовать встроенный редактор формул *Microsoft Equation 3.0* со стандартными установками, применяется только сквозная нумерация формул. Буквы греческого и русского алфавитов выполняются прямым шрифтом, буквы латинского алфавита – курсивом;

- рисунки и фотографии, вставленные в документ, должны быть четко выполнены, допускать перемещение в тексте и возможность изменения размеров, в форматах *.TIF, *.JPG, с разрешением не менее 300 dpi, B&W – для черно-белых иллюстраций, *Grayscale* – для полутонов. Все надписи на рисунках должны быть выполнены шрифтом *Times New Roman*, размер 10 пт. Максимальный размер рисунка с подписью – 150×235 мм. В тексте статьи должны быть подрисовочные подписи в местах размещения рисунков. Таблицы нумеруются, если их число более одной. Заголовок необходим, когда таблица имеет самостоятельное значение, без заголовка дают таблицы вспомогательного характера. При подготовке рукописи необходимо руководствоваться Международной системой единиц СИ.

Статья должна содержать следующие элементы:

1.1. **УДК** (выравнивание – по левому краю). **Наименование статьи** (на русском и английском языках; не более 15 слов) должно кратко отражать содержание статьи. Не рекомендуется использовать сокращения и аббревиатуры.

1.2. **Аффилиция.** Указывается фамилия, имя, отчество авторов (на русском языке и транслитерация), ученая степень, звание, должность, полное название организации (ее официально принятый английский вариант), ORCID, адрес электронной почты хотя бы одного из авторов. Число авторов одной работы не должно превышать *пяти* человек.

1.3. **Аннотация** (100-250 слов). Включает гипотезу, цель, эксперименты и методы, основные результаты, применение результатов исследования в промышленности (излагается в прошедшем времени). Представляется на русском и английском языках.

1.4. **Ключевые слова:** от 5 до 15 основных терминов. Представляются на русском и английском языках.

1.5. **Основная часть статьи.** По тексту статьи необходимо выделить разделы согласно модели IMRAD. **Введение (Introduction)**, в котором отражается характеристика объекта, описание и степень разработки проблемы на основе критического анализа литературы (рекомендуется использовать от 10 до 30 источников), формулируется цель исследования. **Теоретические, экспериментальные, технические и технологические методики (Methods)**, в которых приводится описание теоретических подходов, математических моделей, алгоритмов, применяемых методов, экспериментальных исследований и материалов, технических и технологических разработок, оборудования. В статье, основанной на теоретических исследованиях, приводятся математические выкладки, доказательство воспроизводимости результатов и проверка их адекватности. В статье, основанной на экспериментальных исследованиях, описываются материалы и методы, использованные для получения результатов. Приводится общая схема и описание экспериментов. **Заключение и обсуждение (Result and Discussion)** (не более 1/3 страницы) должно содержать оценку степени достижения цели исследования, вклад полученных результатов в область исследования, в том числе практическое применение результатов и рекомендации, перспективы развития рассматриваемой проблемы. **Список литературы (References)** (на русском и английском языках) должен содержать перечень источников, на которые указаны ссылки по тексту статьи. Список литературы оформляется в соответствии с ГОСТ 7.1-2003. В списке литературы не допускается использование более 30% работ авторов статьи и рекомендуется использование не менее 30% работ, опубликованных в зарубежных изданиях. Образец оформления списка литературы на русском и английском языках, а также остальных элементов статьи можно найти на официальном сайте журнала esik.magtu.ru.

Представление материалов. Для опубликования статьи в журнале необходимо представить в электронном виде по e-mail: ecis.red@gmail.com основной текст статьи, рецензию или представление ведущего специалиста в предметной области (сканированный документ) и экспертное заключение о возможности опубликования работы. Публикация в журнале бесплатная. Для получения печатного экземпляра журнала в электронном письме требуется указать необходимое количество экземпляров. Контактный тел.: 8(3519)298581, +7 919 406 69 97 (Панова Евгения Александровна).