

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

ИЗДАЕТСЯ С ЯНВАРЯ 1996 Г.

№1(30), МАРТ 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 – проф., д-р техн. наук, УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия;

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

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

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

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

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

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

Ответственный редактор:

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 ВПО «МГТУ», 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.

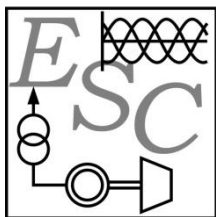
Адрес редакции:

455000, Россия, Челябинская обл., г. Магнитогорск,
пр. Ленина, д. 38. ФГБОУ ВПО «МГТУ»
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 25.03.2016. Заказ ... Тираж 500 экз. Цена свободная.



ELECTROTECHNICAL SYSTEMS AND COMPLEXES

PUBLISHED SINCE JAN., 1996

NO.1(30) MAR., 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 – 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 – Professor, D.Sc. (Eng.), NMSTU, Magnitogorsk, Russia;

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

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

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

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

Executive editor:

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 HPE 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: 25.03.2016. Order. Circulation: 500.

Open price.

СОДЕРЖАНИЕ

Теория и практика автоматизированного электропривода.....	4
<i>Сарваров А.С., Омельченко Е.Я., Васильев А.Е., Белый А.В., Фомин Н.В.</i> Исследование работы электропривода мехатронного модуля робототехнического комплекса.....	4
<i>Воронин С.Г., Хафизов Г.Т.</i> Некоторые способы регулировки выходных параметров электропривода с вентильным двигателем при векторном управлении.....	10
<i>Мещеряков В.Н., Толчеев В.М.</i> Математическая модель взаимосвязанных электромеханических систем клетей непрерывного стана холодной прокатки.....	14
Электроэнергетика.....	19
<i>Соломин Е.В., Сироткин Е.А., Козлов С.В.</i> Электромеханическая система аварийного торможения ветроэнергетической установки.....	19
<i>Варганов Д.Е., Варганова А.В.</i> Расчет себестоимости свежего пара на крупных тепловых промышленных электростанциях.....	24
<i>Малафеев А.В., Язольникова Е.Б., Савинова Г.Ю., Оленникова Т.Б., Алтухова М.А.</i> Определение стоимости услуг по передаче электроэнергии через электрические сети промышленных предприятий сторонним потребителям с учетом их долевых вкладов.....	29
<i>Корнилов Г.П., Николаев А.А., Пястолова Д.Ю.</i> Техничко-экономическое сравнение компенсирующих устройств для дуговых сталеплавильных печей широкого класса мощности.....	34
Мониторинг, контроль и диагностика электрооборудования.....	39
<i>Крюков О.В., Серебряков А.В.</i> Анализ результатов прогнозирования технического состояния электроприводных газоперекачивающих агрегатов.....	39
Промышленная электроника, автоматика и системы управления.....	45
<i>Миков А.Ю., Логунова О.С., Маркевич А.В.</i> Математическое обеспечение и структура системы интеллектуальной поддержки системы управления оценкой качества поверхности холоднокатаного проката.....	45
<i>Панов А.Н., Бурмистров К.В., Рыбаков А.Г., Бурмистрова И.С., Борцов Д.Н.</i> Использование новейших технологий автоматизации производства для обеспечения контроля качества полезных ископаемых на усреднительных складах.....	52
СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ.....	58

CONTENT

Theory and practice of automated electric drive.....	4
<i>Sarvarov A.S., Omelchenko E.Ya., Vasilyev A.E., Belyi A.V., Fomin N.V.</i> Analysis of Operation of Electric Drive of Robotic System Mechatronic Module.....	4
<i>Voronin S.G., Hafizov G.T.</i> Some Ways to Control Output Parameters of Brushless Electric Motor with Vector Handling.....	10
<i>Meshcheryakov V.N., Tolcheev V.M.</i> Mathematical Model of Interconnected Electromechanical Systems of Stands of Continuous Cold Rolling Mill.....	14
Power engineering.....	19
<i>Solomin E.V., Sirotkin E.A., Kozlov S.V.</i> Electro-Mechanical System of Emergency Braking for Wind Turbine.....	19
<i>Varganov D.E., Varganova A.V.</i> Cost Calculation of Working Steam in Terms of Industrial Thermal Power Stations.....	24
<i>Malafeev A.V., Yagolnikova E.B., Savinova G.Yu., Olennikova T.B., Altukhova M.A.</i> Definition of Cost of Services in Electric Power Transfer Through Electric Networks of Industrial Enterprises to External Consumers Taking Into Account Their Share Contributions.....	29
<i>Kornilov G.P., Nikolaev A.A., Pyastolova D.Yu.</i> Technical and Economic Comparison of Compensating Devices for Arc Furnaces in Broad Class of Power	34
Monitoring, diagnostics and control of electric equipment.....	39
<i>Kryukov O.V., Serebryakov A.V.</i> Results of Technical State Prediction of Electric Gas-Compressor Units.....	39
Power electronics, automation and control systems....	45
<i>Mikov A.Yu., Logunova O.S., Markevich A.V.</i> Software and Structure of Intellectual Support System for Decision-Making for Cold-Rolled Steel Surface Quality Assessment Management System.....	45
<i>Panov A.N., Burmistrov K.V., Rybakov A.G., Burmistrova I.S., Bortsov D.N.</i> Application of The Latest Industrial Automation Technologies to Provide Quality Control of Mineral Deposits in Blending Stockpiles.....	52
INFORMATION ABOUT THE AUTHORS	59

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

УДК 621.313.62.83

Сарваров А.С., Омельченко Е.Я., Васильев А.Е., Белый А.В., Фомин Н.В.

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА МЕХАТРОННОГО МОДУЛЯ
РОБОТОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

Поставлена задача исследования механических и энергетических показателей модуля привода по системе «двигатель постоянного тока – волновой редуктор», применяемого в качестве базового при разработке современных конструкций антропоморфных роботов НПО «Андроидная техника». Исследования проводятся для уточнения технических характеристик волнового редуктора. Приведены кинематическая схема установки, технические данные коллекторных электродвигателей и редуктора. Выполнены исследования для расчета механических характеристик в системе двигатель – волновой редуктор на различных ступенях питающего напряжения. Построены механические характеристики в виде зависимости момента на валу двигателя от частоты вращения при различных статических нагрузках. Проведен расчет момента потерь в волновом редукторе от скорости вращения двигателя и получено математическое описание зависимости момента потерь от скорости вращения, что позволяет учесть свойства волнового редуктора при моделировании работы модулей привода по системе «двигатель постоянного тока – волновой редуктор».

Ключевые слова: мехатронный модуль привода, робототехнический комплекс, антропоморфный робот, электродвигатель, волновой редуктор, экспериментальная установка, механические характеристики, момент потерь редуктора.

ВВЕДЕНИЕ

В одной из позиций указа президента РФ «О национальном центре развития технологий и базовых элементов робототехники» отмечается необходимость разработки эффективных компонентов робототехники российского производства и методического сопровождения испытаний робототехники и составных частей (модулей) робототехнических комплексов [1].

Базовым элементом современных робототехнических комплексов являются мехатронные модули, обеспечивающие выполнение заданных технологических функций, осуществляя движение по одной из управляемых координат. Из таких модулей, как из функциональных кубиков komponуются сложные системы модульной архитектуры. Одним из ключевых модулей мехатронной системы является **мехатронный модуль привода**. Основными типами приводов, применяемых в силовых модулях мехатронных систем, являются электрические, гидравлические и пневматические. Сравнительный анализ приводов мехатронных модулей, проведенный в [2], показывает преимущества электрического привода по многим показателям. На первый план выдвигаются такие показатели, как хорошая управляемость, высокий КПД и наилучшая массогабаритная эффективность. Все эти позиции являются предпочтительными для применения электропривода в мобильных робототехнических системах с автономным питанием.

На сегодняшний день в мехатронике применяются приводы нового поколения, такие как смартприводы (реализованы на базе двигателей с коммутирующей электроникой, с собственной управляющей электроникой, включая контроллеры скорости и движения, а также сетевые интерфейсы. В качестве базовых двигателей в мобильных робототехнических системах в большинстве случаев применяются коллекторные, шаговые и бесколлекторные электромагнитные двигатели мощностью от 0,1 до 530 Вт.

Наряду с электродвигателем в состав модуля привода входит передаточный механизм, который действует как интерфейс между приводом и физической системой, приводимой в движение. В качестве примера реализации в дальнейшем целесообразно рассмотреть мехатронные модули привода, входящие в состав современных конструкций антропоморфных роботов, разработанных и изготовленных в НПО «Андроидная техника». Модули привода в них состоят из электрического двигателя постоянного тока и волнового редуктора с высоким передаточным отношением. Мощность приводных электродвигателей в таких мехатронных модулях составляет несколько десятков и сотен ватт.

ОСНОВНЫЕ ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЯ

В настоящее время в теории электропривода нет достаточного опыта исследований работы высокоточных электроприводов с маломощными электродвигателями с волновыми редукторами. При разработке математического описания мехатронного модуля «двигатель постоянного тока – волновой редуктор» (ДПТ-ВР) возникла необходимость исследования механических и энергетических показателей данного модуля. Для уточнения математической модели мехатронного модуля ДПТ-ВР в НПО «Андроидная техника» были выполнены лабораторные исследования различных режимов работы мехатронного модуля. Кинематическая схема простейшей по конструкции установки для экспериментального определения характеристик модуля привода представлена на **рис. 1**.

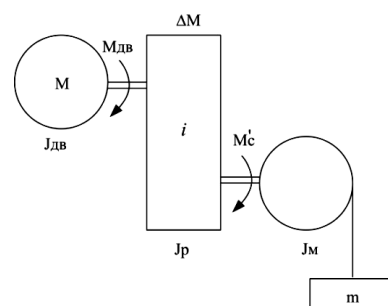


Рис. 1. Кинематическая схема установки

На рисунке введены следующие обозначения: М - испытуемый электродвигатель, i - волновой редуктор с соответствующим передаточным отношением и шкив с грузом массой m . При проведении исследований масса груза меняется в пределах перегрузочной способности двигателя.

В модулях исследуемых приводов применяются коллекторные электродвигатели постоянного тока типа RE35 мощностью 90 Вт и RE40 мощностью 150 Вт [3], технические данные которых приведены в табл. 1.

Таблица 1

Технические данные электродвигателей RE 35 и RE40

Параметр	RE 35	RE 40
Номинальное напряжение, В	48	48
Скорость холостого хода (хх), об/мин	7300	7590
Номинальная скорость n_n , об/мин	6530	7000
Ток хх, мА	77,5	68,6
Номинальный ток, А	1,67	3,17
Ток пусковой, А	15,8	42,4
Момент номинальный, мНм	99,4	187
Момент пусковой, мНм	980	2560
КПД, %	86	92
Сопротивление ротора, Ом	3,05	1,13
Индуктивность ротора, мГн	0,87	0,329
Моментная постоянная C_m , (ΔМ/ΔI) мНм/А	62,2	60,3
Скоростная постоянная C_n , (Δn/ΔU), об/мин/В	154	158
Крутизна механической характеристики (Δn/ΔM), об/мин/мНм	7,52	2,97
Момент инерции $J_{дв}$, гсм ²	67,9	137

Экспериментальные исследования выполнялись с двигателем типа RE 35, мощностью 90 Вт в режимах подъема и опускания грузов с калиброванными грузами (массами 1,244, 3х1,244 и 10 кг) при различных величинах напряжения, подводимого к двигателю. При этом фиксировались значения величины якорного тока двигателя при установившейся скорости вращения. Результаты эксперимента представлены в табл. 2. Эксперимент проводился при отключенном редукторе (идельный холостой ход - ток I_0), при присоединенном редукторе без груза (режим холостого хода - ток $I_{хх}$), при подъеме и опускании грузов с различными массами при изменении напряжения питания двигателя от 5 до 48 В с дискретой 5 В.

В модуле привода применяется волновой редуктор типа CSG 2A с передаточным отношением $i = 160$, момент инерции редуктора $J_p = 0,413 \times 10^{-4}$ кгм² и шкив с радиусом $R_{ш} = 45$ мм.

Статический момент от нагрузки на выходном валу редуктора M'_c определяется величиной массы груза m [4]:

$$M'_c = mgR_{ш}, \quad (1)$$

где $g = 9,81$ м/с².

Момент нагрузки, приведенный к валу электродвигателя, рассчитывается по формуле

$$M_c = M'_c / i, \quad (2)$$

где $i = 160$ – передаточное отношение волнового редуктора.

Момент, развиваемый электродвигателем, зависит от величины якорного тока I и моментной постоянной двигателя C_m :

$$M_{дв} = C_m I. \quad (3)$$

Для известных значений якорного тока при необходимости можно рассчитать ЭДС двигателя по выражению

$$E = U - IR_a, \quad (4)$$

где $R_a = 3,05$ Ом – сопротивление якорной цепи двигателя.

Соответствующая ЭДС скорость вращения двигателя (N , об/мин) рассчитывается по соотношению

$$N = C_n E. \quad (5)$$

Расчет ЭДС, скорости вращения и моментов двигателя проводился с учетом значений тока, полученных при изменении напряжения питания двигателя от 5 до 48 В с дискретой 5 В. Для расчета ЭДС и момента были использованы значения токов из табл. 2, полученные на основе экспериментов в системе «двигатель RE 35 – волновой редуктор CSG 2A». Для краткости представления в табл. 3 приведен фрагмент результатов расчетов для значений питающего напряжения 10,20 ... 40 и 48 В.

Полный массив полученных результатов использован в дальнейшем для построения механических характеристик системы «двигатель – волновой редуктор». При этом сразу необходимо отметить, что в теории электрических машин и электропривода [2] под механической характеристикой понимается зависимость частоты вращения от приложенного момента нагрузки $N = F(M)$ при заданном значении питающего напряжения и постоянстве сопротивления цепи якоря и тока возбуждения (рис. 2). Для рассматриваемого случая под механической характеристикой системы «двигатель-волновой редуктор» понимается зависимость момента на валу двигателя от частоты вращения $M = F(N)$. При этом в системе частота вращения двигателя задается величиной подводимого напряжения питания, а момент статической нагрузки задается грузами различных масс. Такой подход позволяет исследовать свойства волнового редуктора при изменении частоты вращения.

Предварительный анализ характеристик позволяет сделать замечание о нелинейности механических характеристик системы «двигатель - волновой редуктор». Механические характеристики двигателя постоянного тока, как известно, имеют линейный характер. В этой связи можно в дальнейшем считать, что в данной системе нелинейность обусловлена свойствами волнового редуктора. Особо явное проявление нелинейности наблюдается в режиме холостого хода (характеристика 1).

Таблица 2

Значения напряжения питания	Значения якорного тока двигателя при различных условиях работы и нагрузках				
	Холостой ход		Работа с массой, кг		
	без редуктора	с редуктором	1,244	3,732	10
$U, \text{В}$	$I_0, \text{А}$	$I_{xx}, \text{А}$	$I_1, \text{А}$	$I_2, \text{А}$	$I_3, \text{А}$
5	0,045	1,1	1	1,08	1,2
10	0,045	1,73	1,32	1,41	1,6
15	0,045	2,05	1,53	1,6	1,82
20	0,045	2,3	1,72	1,8	2
25	0,045	2,24	1,84	1,96	2,15
30	0,045	2,0	1,95	2,1	2,31
35	0,045	2,1	1,95	2,13	2,36
40	0,045	2,07	1,9	2,18	2,32
48	0,045	2,0	1,97	2,2	2,4
-5	-0,045	-1,1	-0,92	-0,83	-0,57
-10	-0,045	-1,72	-1,2	-1,08	-0,81
-15	-0,045	-2,05	-1,42	-1,26	-1,0
-20	-0,045	-2,1	-1,62	-1,44	-1,14
-25	-0,045	-2,0	-1,73	-1,57	-1,32
-30	-0,045	-2,2	-1,87	-1,7	-1,4
-35	-0,045	-2,2	-1,85	-1,68	-1,4
-40	-0,045	-2,0	-1,8	-1,7	-1,36
-48	-0,045	-2,07	-1,9	-1,76	-1,47

Таблица 3

Фрагмент расчетных данных для построения механических характеристик

$U, \text{В}$	ЭДС двигателя				Частота вращения, об/мин				Момент на валу двигателя, мНм			
	E_0	E_1	E_2	E_3	N_0	N_1	N_2	N_3	M_{xx}	M_{c1}	M_{c2}	M_{c3}
10	4,72	5,97	5,69	5,12	727	919	877	788	107	82	88	99
20	12,9	14,7	14,5	13,9	2000	2272	2234	2140	130	106	111	124
30	23,9	24,0	23,5	22,9	3680	3704	3633	3534	137	121	130	143
40	33,6	34,2	33,3	32,9	5187	5267	5136	5070	124	118	135	144
48	41,9	41,9	41,2	40,6	6452	6466	6358	6264	128	118	136	149

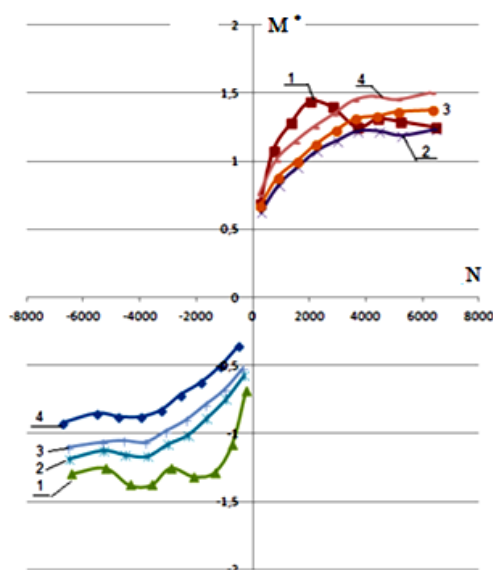


Рис. 2. Механические характеристики $M^*=f(N)$: 1 - холостой ход редуктора; 2 – работа с грузом массой 1,244 кг; 3 – работа с грузом массой 3,732 кг; 4 – работа с грузом массой 10 кг

Для удобства сравнения и большей наглядности механические характеристики целесообразно представить в относительных единицах (табл. 4). При этом в качестве базовых величин приняты номинальная частота вращения двигателя N_n и номинальный момент M_n , значения которых приведены в табл. 1.

Поскольку реальный режим работы мехатронного модуля невозможен без статической нагрузки на выходном валу редуктора, то в дальнейшем будем рассматривать только режимы работы с нагрузкой.

На рис. 3 представлены механические характеристики в относительных величинах, соответствующие режимам подъема (I квадрант) и спуска (II квадрант) груза.

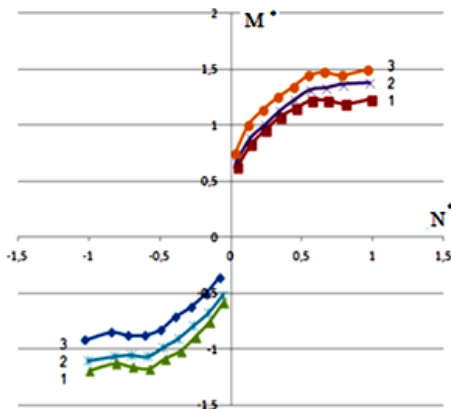


Рис. 3. Механические характеристики $M^*=f(N^*)$:

- 1 – работа с грузом массой 1,244 кг;
- 2 – работа с грузом массой 3,732 кг;
- 3 – работа с грузом массой 10 кг

Как видно из рис. 3, зависимости момента от скорости вращения двигателя являются нелинейными и сходятся при понижении скорости.

В дальнейшем, если из величины момента, развиваемого двигателем, вычесть момент, обусловленный весом груза, то можно рассчитать момент потерь ΔM_n непосредственно в самом редукторе. Результаты расчетов момента потерь при соответствующих значениях скорости вращения представлены в табл. 5.

Зависимости момента потерь от скорости вращения двигателя представлены на рис. 4, откуда видно, что момент потерь в редукторе превышает величину номинального момента при работе под нагрузкой; характеристики при работе с грузом массами 1,224, 3,732 и 10 кг, практически совпадают (отличие можно объяснить погрешностью измерений).

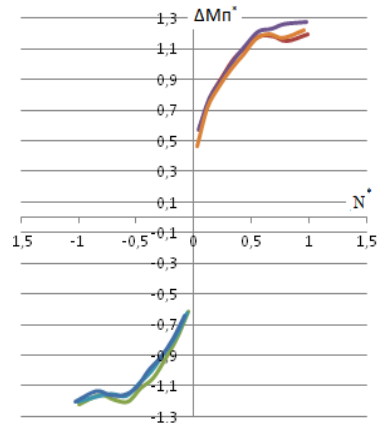


Рис.4. Зависимости момента потерь от скорости потерь $\Delta M_n^*=f(N^*)$

Таблица 4

Механические параметры в относительных величинах

U, B	N_0^*, oe	M_{xx}, oe	N_1^*, oe	M_{c1}, oe	N_2^*, oe	M_{c2}, oe	N_3^*, oe	M_{c3}, oe
5	0,03879	0,68833	0,04598	0,62575	0,04023	0,67581	0,03160	0,75090
10	0,11139	1,08255	0,14088	0,82599	0,13441	0,88231	0,12074	1,00120
15	0,20629	1,28279	0,2437	0,95740	0,23866	1,00120	0,22284	1,13887
20	0,30623	1,43923	0,34795	1,07629	0,34219	1,12635	0,32781	1,25150
25	0,42846	1,40169	0,45723	1,15138	0,44860	1,22647	0,43493	1,34537
30	0,56364	1,25150	0,56724	1,22022	0,55645	1,31408	0,54134	1,44549
35	0,67436	1,31408	0,68515	1,22022	0,67221	1,33285	0,65566	1,47678
40	0,79444	1,29531	0,80667	1,18893	0,78653	1,36414	0,77646	1,45175
48	0,98814	1,25150	0,99030	1,23273	0,97376	1,37666	0,95937	1,50181
-5	-0,0387	-0,6883	-0,0517	-0,5756	-0,0582	-0,5193	-0,0769	-0,3566
-10	-0,1121	-1,076	-0,1495	-0,7509	-0,1581	-0,6758	-0,1775	-0,5068
-15	-0,206	-1,282	-0,2516	-0,8885	-0,2631	-0,7884	-0,2818	-0,6257
-20	-0,3206	-1,3140	-0,3551	-1,0137	-0,3680	-0,9010	-0,3896	-0,7133
-25	-0,4457	-1,2515	-0,4651	-1,0825	-0,4766	-0,9824	-0,4946	-0,826
-30	-0,5492	-1,3766	-0,573	-1,1701	-0,5852	-1,0637	-0,606	-0,8760
-35	-0,6671	-1,3766	-0,6923	-1,1576	-0,7045	-1,0512	-0,7247	-0,8760
-40	-0,7994	-1,2515	-0,8138	-1,1263	-0,8210	-1,0637	-0,8455	-0,8510
-48	-0,9831	-1,2953	-0,9953	-1,1889	-1,0054	-1,1013	-1,0262	-0,9198

Таблица 5

Зависимости момента потерь от скорости вращения двигателя

$U, В$	N_1^*	$\Delta M_{п1}=M_{с1}-M_{г1}$	N_2^*	$\Delta M_{п2}=M_{с2}-M_{г2}$	N_3^*	$\Delta M_{п3}=M_{с3}-M_{г3}$
5	0,0460	0,5912	0,0402	0,5722	0,0316	0,4685
10	0,1409	0,7915	0,1344	0,7787	0,1207	0,7188
15	0,2437	0,9229	0,2387	0,8976	0,2228	0,8565
20	0,3480	1,0418	0,3422	1,0228	0,3278	0,9691
25	0,4572	1,1169	0,4486	1,1229	0,4349	1,0630
30	0,5672	1,1857	0,5565	1,2105	0,5413	1,1631
35	0,6852	1,1857	0,6722	1,2293	0,6557	1,1944
40	0,8067	1,1544	0,7865	1,2606	0,7765	1,1694
48	0,9903	1,1982	0,9738	1,2731	0,9594	1,2194
-5	-0,0517	-0,6102	-0,0582	-0,6230	-0,0769	-0,6391
-10	-0,1495	-0,7854	-0,1582	-0,7794	-0,1776	-0,7892
-15	-0,2516	-0,9231	-0,2631	-0,8920	-0,2818	-0,9081
-20	-0,3551	-1,0483	-0,3681	-1,0047	-0,3897	-0,9957
-25	-0,4651	-1,1171	-0,4767	-1,0860	-0,4946	-1,1084
-30	-0,5730	-1,2047	-0,5852	-1,1674	-0,6068	-1,1584
-35	-0,6924	-1,1922	-0,7046	-1,1549	-0,7247	-1,1584
-40	-0,8139	-1,1609	-0,8211	-1,1674	-0,8455	-1,1334
-48	-0,9953	-1,2235	-1,0054	-1,2049	-1,0263	-1,2022

Зависимость момента потерь от скорости вращения может быть представлена следующей формулой:

$$\Delta M_{п}^* = \text{sign}(N^*) \times [M_0^* + M_1^* \cdot (1 - \exp(\text{abs}(N^*)/T))], \quad (6)$$

где M_0^* – относительная величина момента потерь при скорости, равной нулю; M_1^* – относительная величина момента потерь, дополняющая потери до установившегося значения скорости; N^* – относительное значение скорости.

Для механических характеристик момента потерь, представленных на **рис. 4**, формула (1) может быть представлена зависимостью

$$\Delta M_{п}^* = \text{sign}(N^*) \times [0,5 + 0,8(1 - \exp(\text{abs}(N^*)/0,3))], \quad (7)$$

На **рис. 5** представлены характеристики экспериментальные и рассчитанные по формуле (2) при работе под нагрузкой.

Как видно из **рис. 5**, представленная математическая зависимость (2) с достаточной точностью описывает характеристики момента потерь в редукторе при работе под нагрузкой и может быть использована при моделировании работы редуктора в мехатронном модуле «двигатель постоянного тока - волновой редуктор».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Момент на валу двигателя в системе «двигатель - волновой редуктор» существенно зависит от скорости вращения двигателя и не зависит от величины момента, обусловленного статической нагрузкой.

Энергетические характеристики волнового редуктора крайне низки (момент потерь в редукторе превышает величину номинального момента электродвигателя примерно в 1,2 раза при работе на скоростях выше 0,5 от номинальной скорости двигателя).

Момент потерь в редукторе нелинейно зависит от

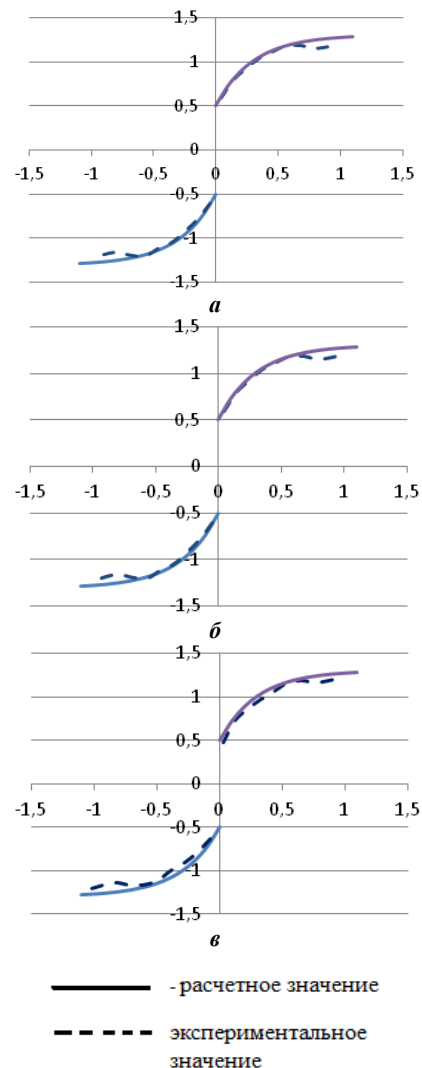


Рис.5. Сравнение экспериментальных и расчетных моментов потерь в редукторе: а – работа с грузом массой 1,244 кг; б – работа с грузом массой 3,732 кг; в – работа с грузом массой 10 кг

скорости вращения двигателя, а при работе без нагрузки момент сопротивления редуктора при изменении скорости имеет колебательный характер.

Получено математическое описание зависимости момента потерь от скорости вращения, что позволяет учесть свойства волнового редуктора при моделировании работы модулей привода по системе «двигатель постоянного тока - волновой редуктор».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Указ Президента РФ от 16.12.2015 № 623 «О Национальном центре развития технологий и базовых элементов робототехники». М., 2015.
2. Сравнительный анализ приводов мехатронных систем / А.С. Сарваров, А.Е. Васильев, К.В. Даниленко, Е.В. Меньшикова // Электротехнические системы и комплексы. 2014. №4(25). С.21-25.
3. Программа 2012/13. Высокоточные приводы и системы // Каталог фирмы «Максон».
4. Ильинский Н.Ф. Основы электропривода : учеб. пособие. М.: МЭИ, 2003. 220 с.

INFORMATION IN ENGLISH

ANALYSIS OF OPERATION OF ELECTRIC DRIVE OF ROBOTIC SYSTEM MECHATRONIC MODULE

Sarvarov A.S., Omelchenko E.Ya., Vasilyev A.E., Belyi A.V., Fomin N.V.

The main task of the research work was to analyze mechanical and energy characteristics of the electric drive module constructed according to the scheme «direct current motor – harmonic drive», which is used as a basic unit in the process of modern anthropomorphic robots design at the scientific-production association «Android Engineering». The research work was carried out to specify the technical characteristics of the harmonic drive. The kinematic chain of the unit, technical information about the commutator motors and the harmonic drive are given in the article. The research group performed calculations of mechanical characteristics in the system motor-harmonic drive for different levels of supply voltage. The authors determined mechanical characteristics as a relationship between the torque on the motor shaft and the rotational velocity for different static loads. They also calculated the torque losses in the harmonic drive depending on the rotational velocity of the motor and offered mathematical description of the relationship between the torque losses and the rotational velocity, which makes it possible to take into account the characteristics of the harmonic drive in the process of simulation of operation of the drive modules constructed according to the scheme «direct current motor – harmonic drive».

Keywords: mechatronic drive module, robotic system, anthropomorphic robot, electric motor, harmonic drive, experimental facility, mechanical characteristics, torque losses of harmonic drive.

REFERENCES

1. Decree of the President of the Russian Federation signed on 16.12.2015 № 623 «Concerning the National center of technology and robotic system elements development», Moscow, 2015.
2. Sarvarov A.S., Vasilyev A.E., Danilenko K.V., Menshikova E.V. *Sravnitelnyi analiz privodov mekhatronnykh sistem* [Comparative Analysis of Drives for Mechatronic Systems], Electrotechnical systems and complexes, 2015, no.4(25), pp. 21-25.
3. Program 2012/13. High-precision drives and systems. «Makson» company catalogue.
4. Ilyinskiy N.F. *Osnovy elektroprivoda* [Fundamentals of Electric Drive], textbook, Moscow, MPEI, 2003, 220 p.

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.magtu.ru (раздел «Журнал Вестник МГТУ»);
- на сайте журнала www.vestnik.magtu.ru;
- на платформе eLIBRARY.

НЕКОТОРЫЕ СПОСОБЫ РЕГУЛИРОВКИ ВЫХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ВЕНТИЛЬНЫМ ДВИГАТЕЛЕМ ПРИ ВЕКТОРНОМ УПРАВЛЕНИИ

В данной работе предлагается синтез нового метода регулировки параметров привода, который позволит упростить задачу векторного управления вентильным двигателем. Структурой решения данной проблемы является рассмотрение исследуемого электропривода как сложного составного объекта, получение математической модели объекта и определение задач из структуры, необходимых для решения проблемы. В ходе работы были получены аналитические выражения динамической модели электропривода, получены выражения, описывающие работу привода в псевдостатическом режиме, также точные аналитические выражения для определенного оптимального режима: максимальная скорость при известном моменте сопротивления, предложены методы использования. Проведено компьютерное моделирование синхронного двигателя с постоянными магнитами в режиме вентильного двигателя, получены соответствующие графики процессов.

Ключевые слова: вентильный двигатель, синхронный двигатель с постоянными магнитами, динамическая модель, оптимальный угол коммутации, максимальная скорость под нагрузкой.

ВВЕДЕНИЕ

Оптимальные режимы работы вентильных двигателей на основе синхронных двигателей с постоянными магнитами являются приоритетной задачей теории электропривода. Цель выполненной работы – получение точного аналитического выражения для оптимального угла коммутации при режиме максимальной скорости.

Решение поставленной задачи заключается в определении необходимой математической модели синхронного двигателя с возбуждением от постоянных магнитов. Далее аналитическое определение исследуемых характеристик привода в зависимости от угла коммутации, проведение компьютерного моделирования исследуемого электропривода с целью подтверждения результатов исследования. Причём, в отличие от широко распространённых методов векторного управления путём автономного регулирования токов по осям d и q , требующих привлечения значительных вычислительных ресурсов [2-4], управление предлагается осуществлять путём регулирования угла коммутации θ [5, 10], которое при наличии датчика углового положения ротора реализуется простейшими средствами.

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЕНТИЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Математическая модель двигателя была создана для синхронного двигателя с неявнополюсной двухфазной однополюсной статорной обмоткой и постоянными магнитами на роторе и идеализированным синусоидальным управлением. За основу была взята модель с описанием физических обмоток как распределённых токовых слоев, позволяющих получить вращающееся синусоидально распределённое в пространстве магнитное поле статора. На математическую модель накладываются следующие ограничения: скорость распространения фронта электромагнитных волн считается бесконечной, магнитная проницаемость магнитопровода тоже считается бесконечной, отношение внутреннего радиуса статора к радиусу ротора равно единице, неучтены магнитные и электрические поля высших порядков, а также явление гистерезиса и вихревых

токов, симметричности электрической машины [1].

После всех предварительных преобразований из физической модели, основанной на величинах электродинамики, была получена модель в системе отсчета вращающегося ротора, используя величины теории электрических цепей [8]:

$$\begin{cases} \frac{3}{2}u \cos(\theta) = R^s i_q^s + L^s \frac{di_q^s}{dt} + L^s i_d^s \omega(t) + \frac{3}{2} \kappa \omega(t); \\ -\frac{3}{2}u \sin(\theta) = R^s i_d^s + L^s \frac{di_d^s}{dt} - L^s i_q^s \omega(t); \\ M_c = M_{эм} - J^r \frac{d\omega(t)}{dt}; \\ \frac{M_{эм}}{\kappa} = i_q^s, \end{cases} \quad (1)$$

где u , i^s – амплитуды напряжений и токов системы питания статора в системе отсчета статора, для трехфазной машины; i_q^s , i_d^s – токи статорных обмоток эквивалентного двухфазного двигателя в системе отсчета ротора dq ; R^s – активные сопротивления фазных обмоток двигателя; L^s – полная индуктивность обмотки фазы; M – механический момент, создаваемый двигателем без нагрузки на валу; $M_{эм}$ – электромагнитный момент двигателя; J^r – момент инерции ротора двигателя; κ – коэффициент пропорциональности потокосцепления и ЭДС.

Давайте преобразуем и упростим систему уравнений (1) к значениям в относительных единицах, для этого запишем систему обозначений безразмерных величин:

$$\begin{cases} \gamma = \frac{u}{1,5u_H}; \quad \bar{i}_q^s = \frac{i_q^s R^s}{1,5u_H}; \quad \bar{i}_d^s = \frac{i_d^s R^s}{1,5u_H}; \quad \tau = t\omega_H; \\ \tau_\omega = \frac{L^s}{R^s} \omega_H; \quad \omega_H = \frac{u_H}{\kappa}; \quad \varepsilon = \frac{\omega}{\omega_H}; \\ \mu_{эм} = \frac{M_{эм}}{M_\Pi}; \quad \mu_c = \frac{M_c}{M_\Pi}; \quad M_\Pi = \frac{1,5u_H \kappa}{R^s}; \quad \tau_m = \frac{J^r R^s}{1,5u_H \kappa}, \end{cases} \quad (2)$$

где γ – относительное напряжения статора эквивалентного двухфазного двигателя в системе отсчета ротора dq ; $\bar{i}_q^s$ – приведенный ток обмотки q эквивалентного

двухфазного двигателя в системе отсчета ротора dq ; $\bar{\varepsilon}$ – относительная скорость вращения ротора; $\bar{i}_d^s$ – приведенный ток обмотки d эквивалентного двухфазного двигателя в системе отсчета ротора dq ; τ – безразмерное время; τ_γ – электромагнитная постоянная времени электродвигателя; ω_n – эквивалентная частота; τ_m – механическая постоянная времени электродвигателя; $\mu_{эм}$ – относительный электромагнитный момент эквивалентного двухфазного двигателя в системе отсчета ротора dq ; μ_c – относительный момент сопротивления на валу эквивалентного двухфазного двигателя в системе отсчета ротора dq ; M_n – приведенный момент.

Преобразованная система (1) с помощью обозначений (2) приводит к выражению в домене Лапласа:

$$\begin{cases} \gamma \cos(\theta) = \bar{i}_q^s + \tau_\gamma \bar{i}_q^s p + \tau_\gamma \bar{i}_d^s \bar{\varepsilon} + \bar{\varepsilon}; \\ -\gamma \sin(\theta) = \bar{i}_d^s + \tau_\gamma \bar{i}_d^s p - \tau_\gamma \bar{i}_q^s \bar{\varepsilon}; \\ \tau_m \frac{d\bar{\varepsilon}}{d\tau} = \mu_{эм} - \mu_c; \\ \mu_{эм} = \bar{i}_q^s. \end{cases} \quad (3)$$

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО УГЛА НАГРУЗКИ θ

Используя систему (3) в условиях установившихся процессов, выразим значения приведенных токов $\bar{i}_q^s$, $\bar{i}_d^s$:

$$\begin{cases} \bar{i}_d^s = \frac{\tau_\gamma \bar{\varepsilon} \gamma \cos(\theta) - \gamma \sin(\theta) - \tau_\gamma \bar{\varepsilon}^2}{1 + \tau_\gamma^2 \omega^2(\tau)}; \\ \bar{i}_q^s = \frac{\gamma \cos(\theta) + \tau_\gamma \bar{\varepsilon} \gamma \sin(\theta) - \bar{\varepsilon}}{1 + \tau_\gamma^2 \bar{\varepsilon}^2}. \end{cases} \quad (4)$$

Определим угол θ , при котором наблюдается максимальная скорость вращения ротора вентильного электропривода при некоем известном моменте μ_c . Воспользовавшись четвертой и третьей строкой выражения (3) и выражением (4), найдем выражение скорости для установившихся процессов при условии $\mu_{эм} = \mu_c$.

$$\mu_{эм} = \mu_c = \frac{\gamma \cos(\theta) + \tau_\gamma \bar{\varepsilon} \gamma \sin(\theta) - \bar{\varepsilon}}{1 + \tau_\gamma^2 \bar{\varepsilon}^2}. \quad (6)$$

Выразим $\bar{\varepsilon}$ из выражения (6) и получим

$$\begin{aligned} \bar{\varepsilon} &= \frac{(\tau_\gamma \gamma \sin(\theta) - 1)}{2\mu_c \tau_\gamma^2} \pm \\ &\pm \frac{\sqrt{(\tau_\gamma \gamma \sin(\theta) - 1)^2 - 4\mu_c \tau_\gamma^2 (\mu_c - \gamma \cos(\theta))}}{2\mu_c \tau_\gamma^2}. \end{aligned} \quad (7)$$

Возьмем производную $\bar{\varepsilon}$ (7) по углу θ при условии экстремума и получим.

$$\begin{aligned} \frac{d\bar{\varepsilon}}{d\theta} &= 0 = \tau_\gamma \gamma \cos(\theta) \pm \\ &\pm \frac{2\tau_\gamma \gamma \cos(\theta) (\tau_\gamma \gamma \sin(\theta) - 1) - 4\mu_c \tau_\gamma^2 \gamma \sin(\theta)}{2\sqrt{(\tau_\gamma \gamma \sin(\theta) - 1)^2 - 4\mu_c \tau_\gamma^2 (\mu_c - \gamma \cos(\theta))}}. \end{aligned} \quad (8)$$

Раскроем и упростим выражение (8), приведя к выражению вида

$$\sin(\theta) + \frac{\mu_c \tau_\gamma}{\cos(\theta)} = \tau_\gamma \gamma. \quad (9)$$

Данное выражение (9) решается аналитически с заменой $\lambda = \cos(\theta)$ и приводится к выражению

$$(\mu_c \tau_\gamma^2) - (2\mu_c \gamma \tau_\gamma^2) \lambda + (\tau_\gamma^2 \gamma^2 - 1) \lambda^2 + \lambda^4 = 0. \quad (10)$$

Данное уравнение (10) решается методом Феррари-Кардано [7]. В целях экономии места, мы запишем сразу решение уравнения (10), для этого введем необходимые сокращения.

$$\begin{cases} A' = \tau_\gamma^2 \gamma^2 - 1; \\ B' = A'^3/27 + 2D'\sqrt{3}/9 + 4\mu_c^2 \tau_\gamma^2 A'/3 + 2\mu_c^2 \tau_\gamma^4 \gamma; \\ C' = \sqrt{9B'^{2/3} - 6A'B'^{1/3} + 12\mu_c^2 \tau_\gamma^2 + A'^2}; \\ D' = \sqrt{27\mu_c^4 \tau_\gamma^8 \gamma^4 - 16\mu_c^6 \tau_\gamma^6 - \mu_c^2 \tau_\gamma^2 A'^4 + 8\mu_c^4 \tau_\gamma^4 A'^2 - 36\mu_c^4 \tau_\gamma^6 \gamma^2 A' + \mu_c^2 \tau_\gamma^4 \gamma^2 A'^3}; \\ E' = \sqrt{A'^3 + 6\sqrt{3}D' - 36\mu_c^2 \tau_\gamma^2 A' + 54\mu_c^2 \tau_\gamma^4 \gamma^2}; \\ F' = -A'^2 C' - 9C' B'^{2/3} - 12A' C' B'^{1/3} - 12\mu_c^2 \tau_\gamma^2 C'; \\ f = -\sin(\pi\nu/2 - \pi/4); \\ g = \cos(\pi\nu). \end{cases} \quad (11)$$

Получим решение уравнения (10) в виде

$$\theta_{\max} = \arccos \left[\frac{\text{sign}(f)C}{6B^{1/6}} + \frac{\sqrt{F + \text{sign}(f)6\sqrt{12}\mu_c\tau_\gamma^2\gamma E}}{\text{sign}(g)6\sqrt{CB^{1/6}}} \right] + \pi\zeta, \quad \zeta \in \mathbb{Z}, \quad (12)$$

где ν – порядковый номер решения, и принимает значения 1, 2, 3, 4.

Также необходимо заметить, что для предварительной оценки можно найти оптимальный угол коммутации по формуле [9]

$$\theta_{\max} \approx \tau_\gamma (\gamma - \mu_c). \quad (13)$$

ИССЛЕДОВАНИЕ АНАЛИТИЧЕСКОГО ВЫРАЖЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО УГЛА КОММУТАЦИИ

Исследуем выражение (10) на количество положительных корней, для этого воспользуемся теоремой Декарта [6] для знаков полинома.

Согласно теореме: количество положительных корней многочлена с вещественными коэффициентами равно количеству перемен знаков в ряду его коэффициентов или на чётное число меньше этого количества, для рассмотрения количества отрицательных корней надо брать функцию с отрицательным аргументом.

Применим теорему Декарта к выражению (10):

$$\begin{cases} \lambda^4 + (\tau_\gamma^2\gamma^2 - 1)\lambda^2 - \\ - (2\mu_c\gamma\tau_\gamma^2)\lambda + (\mu_c\tau_\gamma^2) = \Theta(\lambda); \\ \text{prg}(\Theta(\lambda) = 0 | \lambda > 0) = \\ = \nu(1, 0, (\tau_\gamma^2\gamma^2 - 1), -(2\mu_c\gamma\tau_\gamma^2), (\mu_c\tau_\gamma^2)) - 2k; \\ \text{prg}(\Theta(-\lambda) = 0 | \lambda < 0) = \\ = \nu(1, 0, (\tau_\gamma^2\gamma^2 - 1), (2\mu_c\gamma\tau_\gamma^2), (\mu_c\tau_\gamma^2)) - 2k; \\ k \in \mathbb{R}, \end{cases} \quad (14)$$

где ν – функция количества знакоперемен.

Исходя из выражения (14) на суммарное количество рациональных корней крайне влияют знаки управляющего напряжения и момента сопротивления. Может так сложиться, что оптимального угла при заданных параметрах не существует.

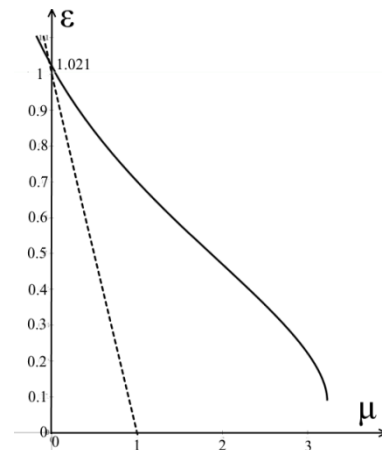
Также исследуем выражение (9) на запрещенные углы коммутации. При нулевом знаменателе выражение (9) теряет смысл, поэтому запишем множество запрещенных углов:

$$\theta_\emptyset = \frac{\pi}{2} + \pi\zeta, \quad \zeta \in \mathbb{Z}. \quad (15)$$

Исходя из выражений (11), (12), (14), (15), можно записать необходимое условие локального максимума, для условия максимальной скорости вентильного двигателя на основе синхронного с постоянными магнитами, как сложную функцию угла коммутации:

$$\begin{cases} \theta_{\max} = \arccos \left[\frac{\text{sign}(f)C}{6B^{1/6}} + \frac{\sqrt{F + \text{sign}(f)6\sqrt{12}\mu_c\tau_\gamma^2\gamma E}}{\text{sign}(g)6\sqrt{CB^{1/6}}} \right] + \pi\zeta, \quad \zeta \in \mathbb{Z}; \\ \sin(\theta_{\max} - \Delta\theta) + \frac{\mu_c\tau_\gamma}{\cos(\theta)} - \tau_\gamma\gamma > 0, \\ 0 < \Delta\theta = |\theta_{\max}|, \Delta\theta \in \mathbb{R}; \\ \sin(\theta_{\max} + \Delta\theta) + \frac{\mu_c\tau_\gamma}{\cos(\theta)} - \tau_\gamma\gamma < 0; \\ \theta_{\max} \neq \theta_\emptyset = \frac{\pi}{2} + \pi\zeta, \quad \zeta \in \mathbb{Z}. \end{cases} \quad (16)$$

Промоделируем систему уравнений (3) для условий $\gamma=1$; $\tau_\gamma=0,2$, также для оптимальных углов и без регулирования по углу $\theta=0$ и построим механические характеристики.



Механические характеристики вентильного двигателя с коррекцией и без, по оптимальному углу коммутации, для режима максимальной скорости под нагрузкой (штрихованная линия - это некорректированная механическая характеристика, гладкая – скорректированная)

Как видно из рисунка, скорректированная механическая характеристика не имеет момента короткого замыкания, в этом случае происходит срыв работы привода. Но за счет коррекции значительно расширяется рабочий диапазон скоростей привода.

В силу выражений (18) и (16) и с учетом закона Мура, при нынешнем развитии науки и техники, предлагается два варианта применения оптимального угла $\theta_{\max}$ в практике.

Введем тензор типа

$$\Theta = T_n^n(\theta_{ijk}(\mu_c, \tau_\gamma, \gamma)). \quad (19)$$

В случае малой вычислительной мощности контроллера электропривода строится трехмерный тензор-массив (19) в долгосрочной энергонезависимой памяти микроконтроллера, содержащий дискретные значения оптимального угла $\theta_{\max}$ с шагом дискретизации m , количеством элементов n^3 , для широкого ряда параметров μ_c , τ_γ , γ , предварительно рассчитанных по выражениям (16), (18) и упорядоченных согласно возрастанию

по индексам i, j, k .

В случае удовлетворительной вычислительной мощности микроконтроллера при псевдостатических режимах электропривода необходимо вести расчет согласно алгоритму по выражениям (16) и (18).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Поставленные в исследовании задачи решены и получены точные аналитические выражения для регулирования угла коммутации в процессе векторного управления электроприводом, в режиме максимальной скорости при известной нагрузке на валу. Получены необходимые динамические и статические математические модели, предложены методы эксплуатации полученных выражений в электроприводе. Все предлагаемые в исследовании соотношения подкреплены конкретными расчётами и компьютерным моделированием.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Уайт Д.С., Вудсон Г.Х. *Электромеханическое преобразование энергии*. М.:Л.: Энергия, 1964. 528 с.
2. Model reference adaptive backstopping based direct torque control of PM synchronous motor drives / Hai, L., Yan, W.-S., Li, H., Wei, Y. // 4th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, ICIEA, 2009, art. no. 5138380, pp. 1173-1178.

3. Speed-sensorless direct torque control system of permanent magnet synchronous motor / X. Wang, Y. Xing, Y. Liu, D Yang, // Dongbei Daxue Xuebao/Journal of Northeastern University, 2012. №33(5). Pp. 618–621.

4. Sensor less control of synchronous machines based on direct speed and position estimation in polar stator-current coordinates / D. Paulus, J.-F. Stumper, R. Kennel, IEEE Transactions on Power Electronics № 28 (5), art. no. 6257501, 2013, pp. 2503-2513.

5. Воронин С.Г., Курнос Д.А., Кульмухаметова А.С. Некоторые схемы и алгоритмы векторного управления синхронными двигателями с возбуждением от постоянных магнитов // *Электротехника*. 2013. №10. С. 50–54.

6. Анго А. Математика для электро и радио инженеров с предисловием Луи Де Бройля / Андре Анго; пер с фр. под общ. ред. К.С. Шифрина. М.: Наука, 1965. 780 с.

7. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов / И.Н. Бронштейн, К.А. Семедяев; под ред Г. Гроше, В. Циглера. М.: Наука, 1986. 544 с.

8. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники: учеб. пособие. М.: Высш. шк., 1967. 780 с.

9. Юферов Ф.М. Электрические машины автоматических устройств: учебник для студентов вузов, обучающихся по спец. «Электромеханика». 2-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. шк., 1988. 479 с.

10. Сизякин А., Румянцев М. Без датчика положения ротора: решения компании IR для управления вентильными двигателями // *Новости электроники (Электронный журнал)*. – 2011. – № 10. – Ст. 6.

INFORMATION IN ENGLISH

SOME WAYS TO CONTROL OUTPUT PARAMETERS OF BRUSHLESS ELECTRIC MOTOR WITH VECTOR HANDLING

Voronin S.G., Hafizov G.T.

In this paper, we propose a new synthesis method of the drive parameter adjustment, which will simplify the task of vector control of a brushless motor. The structure of the solution to this problem is to consider the test actuator as a complex object, to obtain a mathematical model of the object and to determine the tasks of the structures necessary to solve the problem. In the course of the research work, analytical expressions of the dynamic electric model were obtained, which describe the operation of the drive in a pseudo-static mode, as well as accurate analytical expressions to determine the optimal mode: max speed at a certain moment of resistance. Computer simulation of a synchronous motor with permanent magnets in the ac electronic motor was carried out, besides, the authors obtained the appropriate process diagrams.

Keywords: brushless electric motor, a synchronous motor with permanent magnets, dynamic model, optimum angle switching, maximum speed under load.

REFERENCES

1. White D.S., Woodson G.H. *Elektromekhanicheskoe preobrazovanie energii* [Electromechanical energy conversion] Moscow, Leningrad, Energy, 1964, 528 p
2. Hai, L., Yan, W.-S., Li, H., Wei, Y. Model reference adaptive backstopping based direct torque control of PM synchronous motor drives, 4th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, ICIEA, 2009, art. no. 5138380, pp. 1173-1178.
3. Wang X., Xing Y., Liu Y., Yang D. Speed-sensorless direct torque control system of permanent magnet synchronous motor, Dongbei Daxue Xuebao, Journal of Northeastern University, 2012, no. 33(5), pp. 618–621.
4. Paulus D., Stumper J.-F., Kennel R. Sensor less control

of synchronous machines based on direct speed and position estimation in polar stator-current coordinates, IEEE Transactions on Power Electronics, no. 28(5), art. no. 6257501, 2013, pp. 2503-2513.

5. Voronin S.G., Kurnosov D.A., Kulmuhametova A.S. *Nekotorye skhemy i algoritmy vektornogo upravleniya sinkhronnymi dvigatelyami s возбуждением от постоянных магнитов* [Some Schemes and Vector Control Algorithms for Synchronous Motors with Permanent-magnet], Electronics, 2013, no. 10, pp. 50-54.

6. Ango A. *Matematika dlya elektro i radio inzhenerov s predisloviem Lui De Broilya* [Mathematics for Electrical and Radio Engineers with a foreword Louis de Broglie], André Angot; Translated from French, under the editorship of K.S. Shifrin, Moscow, Science, 1965, 780 p.

7. Bronstein I.N., Semedyaev K.A., *Spravochnik po matematike dlya inzhenerov i uchashchikhsya vtuzov* [Handbook of Mathematics for Engineers and Students of Technical Colleges], Ed G. Grosche, W. Ziegler, Moscow, Science, 1986, 544 p.

8. Bessonov L.A. *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki* [Theoretical Foundations of Electrical Engineering], textbook, Moscow, Higher School, 1967, 780 p.

9. Yuferov F.M. *Elektricheskie mashiny avtomaticheskikh ustroystv* [Electrical Machinery of Automatic Devices]. textbook for students enrolled in the specialty "Electromechanics", 2nd ed., revised and extended, Moscow, Higher School, 1988, 479 p.

10. Sizyakina A., Rumyantsev M. *Bez datchika polozheniya rotora: resheniya kompanii IR dlya upravleniya ventilynymi dvigatelyami* [Without Rotor Position Sensor: Solutions of IR in the Field of Brushless Motors Control], Electronics News (Electronic Journal), 2011, no. 10, Article 6.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЗАИМОСВЯЗАННЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ КЛЕТЕЙ НЕПРЕРЫВНОГО СТАНА ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ

В статье освещены вопросы описания механизма взаимодействия между прокатными клетями стана непрерывной холодной прокатки через прокатываемую полосу. Произведено описание прокатываемой полосы как объекта управления с упругими и демпфирующими свойствами. Рассмотрены особенности формирования натяжения в межклетьевом промежутке. Отмечено влияние на межклетьеовое натяжение позиций валков взаимодействующих клетей. Затронут вопрос соотношения скоростей вращения прокатных валков в смежных клетях с учетом опережения. Полученное математическое описание позволило создать модель для исследования свойств рассматриваемой системы. Произведено математическое моделирование в пакете Matlab 2011, приложение Simulink. Результаты моделирования сопоставлены с реальными осциллограммами работы клетей №3 и 4 стана 2030 ПХПП «НЛМК». Осциллограммы работы стана сняты программой FADEX.

Ключевые слова: упругость, холодная прокатка, натяжение, опережение, моделирование.

ВВЕДЕНИЕ

Прокатные станы холодной прокатки являются высокопроизводительными агрегатами с высокой степенью автоматизации. Для поддержания конкурентоспособности выпускаемой продукции к качеству прокатываемой полосы предъявляются серьезные требования. Обеспечение качества полосы зависит от точности поддержания технологических параметров прокатки. Оптимизация систем управления этих параметров зачастую невозможна на рабочем стане, поэтому важно максимально адекватно описывать объект управления, что позволит методами математического моделирования и теории автоматического управления синтезировать нужную САУ технологического параметра.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЗАИМОСВЯЗИ КЛЕТЕЙ НЕПРЕРЫВНОГО СТАНА ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ

Одним из основных параметров прокатки является натяжение в межклетьевом промежутке. Оно характеризует взаимосвязь электромеханических систем предыдущих и последующей клетей. Однако следует принимать во внимание, что натяжение между клетями создается через стальную полосу, которую следует рассматривать как упругий элемент. Такой взгляд на формирование натяжения описан в литературе [1, 2]. Упругость полосы принято называть упругостью второго рода. Упругости в линиях прокатных станов зачастую оказывают влияние на динамику протекания технологических процессов и процессов в системах электропривода [8, 9, 11, 14].

Межклетьеовое натяжение описывается следующим выражением [2]:

$$F_{\Sigma} = F' + F'' + F''' \quad (1)$$

где $F' = -\frac{K_1}{T_1 \cdot p + 1} \cdot d'(t)$ – компонента натяжения, создаваемая ГНУ предыдущей клетью;

$d'(t)$ – раствор валков предыдущей клетки; K_1, T_1 – технологический коэффициент и постоянная времени;

$F'' = \frac{K_2}{T_2 \cdot p + 1} \cdot d''(t)$ – компонента натяжения, созда-

ваемая ГНУ клетки; $d''(t)$ – раствор валков клетки; K_2, T_2 – технологический коэффициент и постоянная

времени; $F''' = \left(\frac{C_{i,i+1}}{p} + B_{i,i+1} \right) \cdot [v_{i+1} - v_i \cdot (1 + \varepsilon_{i+1})]$ –

компонента натяжения, создаваемая разностью скоростей $i+1$ -й и i -й клетями, в которой $C_{i,i+1}$ – жесткость полосы; $B_{i,i+1}$ – коэффициент демпфирования; v_i – скорость полосы i -й клетки; v_{i+1} – скорость полосы $i+1$ -й клетки; ε_{i+1} – относительное удлинение полосы в межклетьевом промежутке.

Жесткость полосы [3]

$$C_{i,i+1} = \frac{h_i \cdot b \cdot E}{L_{i,i+1}} \quad (2)$$

где h_i – толщина полосы в межклетьевом промежутке; b – ширина полосы в межклетьевом промежутке; $L_{i,i+1}$ – длина полосы в межклетьевом промежутке; E – модуль упругости полосы.

Относительное удлинение полосы определяется по формуле [2]

$$\varepsilon_{i+1} = \frac{1}{L_{i,i+1} \cdot C_{i,i+1}} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{B_{i,i+1}}{C_{i,i+1}} \cdot p \right)} \cdot F''' \quad (3)$$

Скорость полосы на выходе из клетки [3]:

$$v_i = v_i^* \cdot (1 + S_i) \quad (4)$$

где v_i^* – скорость валка; S_i – опережение металла на выходе из валков.

Соотношение линейной скорости валка и угловой, об/мин:

$$v_{i/i+1}^* = \frac{\pi \cdot R \cdot n_{i/i+1}}{30} \quad (5)$$

Определим опережение по формуле Головина-Дрездена [4]

$$S_{i/i+1} = \gamma_{ni/i+1}^2 \cdot (R/h_{i/i+1}) \quad (6)$$

где $\gamma_{ni/i+1}$ – нейтральный угол в межвалковом промежутке.

Линейные скорости валков соотносятся следующим образом [4]:

$$(1 + S_{i+1}) \cdot v_{i+1}^* \cdot h_{i+1} \cdot b_{i+1} = v_i^* \cdot h_i \cdot b_i \cdot (1 + S_i), \quad (7)$$

где h_i, h_{i+1} – толщины металла на выходе i -й и $i+1$ -й клеток.

Последнее уравнение выражает основной принцип непрерывной прокатки: постоянство объема металла, проходящего в межклетевых промежутках в единицу времени. Данный принцип позволяет рассчитывать базовое значение задания на скорость вращения прокатных электроприводов [5, 6]. Однако финальное задание на скорость вращения привода клетки зависит от множества факторов и представляет собой сумму добавок от различных регуляторов в зависимости от принципа построения и точек воздействия систем регулирования технологических параметров стана.

Расчет задания скорости на привод клетки производится вычислительной машиной верхнего уровня совместно с основными технологическими параметрами прокатного стана [7].

Обобщим полученные формулы:

$$\begin{cases} F_{\Sigma} = F^{\cdot} + F^{\ddot{}} + F^{\ddot{\cdot}}; \\ F^{\cdot} = -\frac{\kappa_1}{T_1 \cdot p + 1} \cdot d^{\cdot}(t); \\ F^{\ddot{}} = \frac{\kappa_2}{T_2 \cdot p + 1} \cdot d^{\ddot{}}(t); \\ F^{\ddot{\cdot}} = \left(\frac{C_{ii+1}}{p} + B_{ii+1} \right) \cdot [v_{i+1} - v_i \cdot (1 + \varepsilon_{i+1})]; \\ C_{ii+1} = h_i \cdot b \cdot E / L_{i,i+1}; \\ \varepsilon_{i+1} = \frac{1}{L_{ii+1} \cdot C_{ii+1}} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{B_{ii+1}}{C_{ii+1}} \cdot p \right)} \cdot F^{\ddot{\cdot}}; \\ v_i = v_i^* \cdot (1 + S_i); \\ S_{ii+1} = \gamma_{ii+1}^2 \cdot (R / h_{ii+1}); \\ (1 + S_{i+1}) \cdot v_{i+1}^* \cdot h_{i+1} \cdot b_{i+1} = v_i^* \cdot h_i \cdot b_i \cdot (1 + S_i); \\ v_{i/i+1}^* = \frac{\pi \cdot R_1 \cdot n_{i/i+1}}{30}. \end{cases} \quad (8)$$

Структурная схема взаимосвязанных электро-механических систем прокатных клеток представлена на рис. 1.

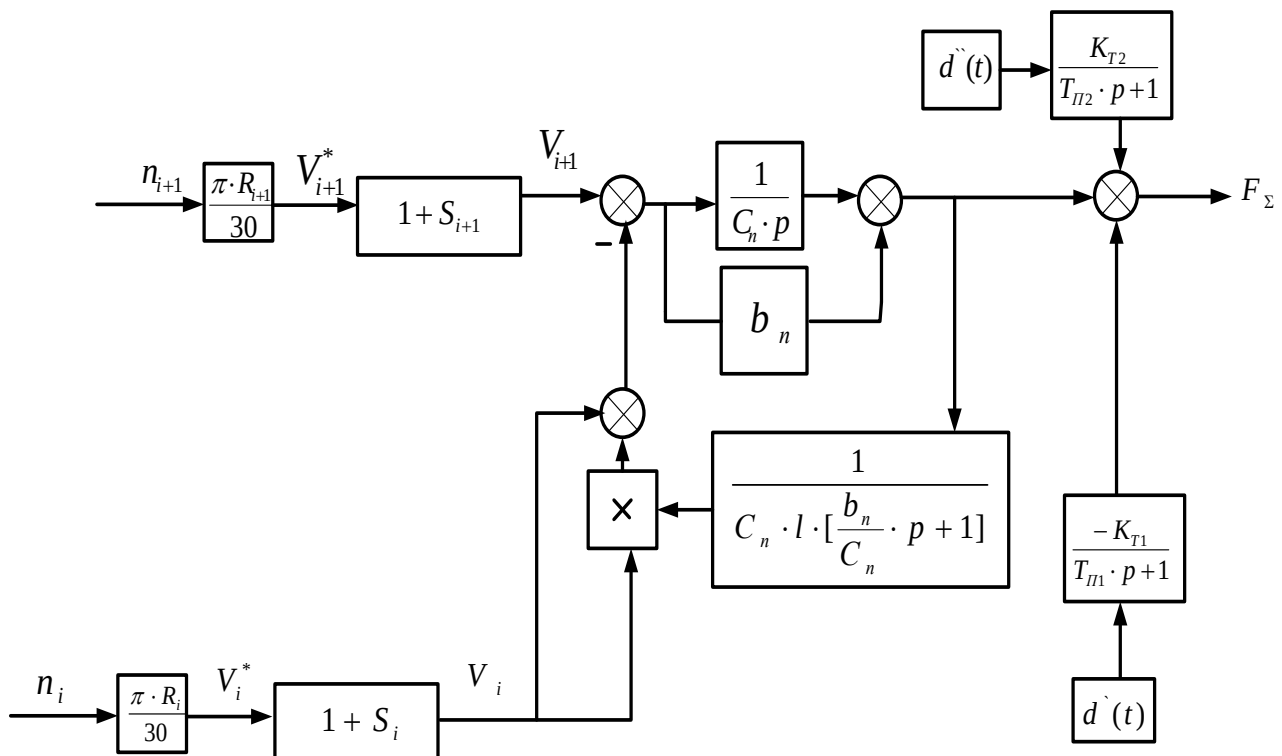


Рис. 1. Структурная схема

В качестве входных воздействий используются угловые скорости валков прокатных клетей i , $i+1$ и положения нажимных механизмов.

Произведем моделирование в пакете Matlab согласно структурной схеме на примере реального объекта: рассмотрим взаимодействие клетей №3 и 4 стана бесконечной холодной прокатки 2030 НЛМК. Однако в качестве входных воздействий будут уже линейные скорости валков.

На **рис. 2, 3** представлены графики линейных скоростей.

Графики позиций гидронажимных механизмов представлены на **рис. 4, 5**.

На **рис. 6** представлены графики натяжений: полученного в ходе моделирования и снятый с реального объекта.

На **рис. 6** видно, что смоделированное натяжение имеет высокую сходимость со средним значением реального натяжения, однако в динамических режимах имеется некоторое расхождение, обусловленное общей перестройкой и адаптацией системы управления верхнего уровня стана «2030», вызванное прохождением «толстой головы» - сварного шва, связывающего два рулона.

В режиме прохождения «толстой головы», зачастую, не соблюдается необходимая толщина, а также остальные параметры прокатки, такие как усилие прокатки, натяжение и др. Участки рулона до и после

сварного шва, по технологическим условиям, не являются ликвидной продукцией и подлежат вырубке и переплавке.

Полученный способ учета взаимосвязи электро-механических систем прокатных клетей через полосу позволит синтезировать адаптивные системы управления технологическими параметрами прокатки и перспективными системами электропривода [10, 12, 13].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Было произведено математическое описание механизма взаимодействия двух прокатных клетей стана холодной прокатки на основе представления о прокатываемом материале как об упругости.

Натяжение между исследуемыми клетями, полученное в ходе моделирования, имеет высокую сходимость с реальным натяжением. Однако в динамическом режиме имеется некоторое отклонение, связанное с особенностями работы АСУТП стана «2030» при прохождении «толстой головы» прокатываемого рулона. Однако данная особенность не вносит существенных погрешностей в общий характер исследуемых процессов.

Сопоставление графиков моделирования и реальных графиков позволяет сделать вывод об адекватности полученной модели.

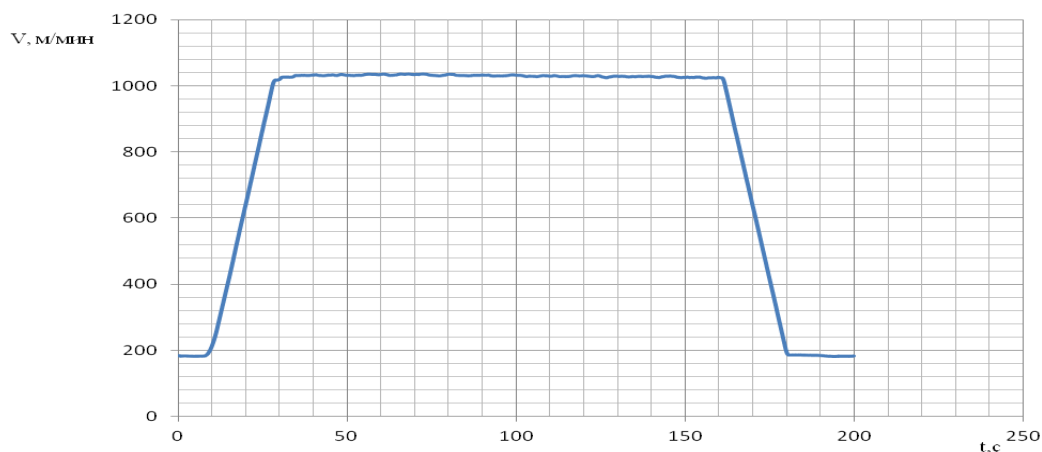


Рис. 2. Линейная скорость валков клетки №4

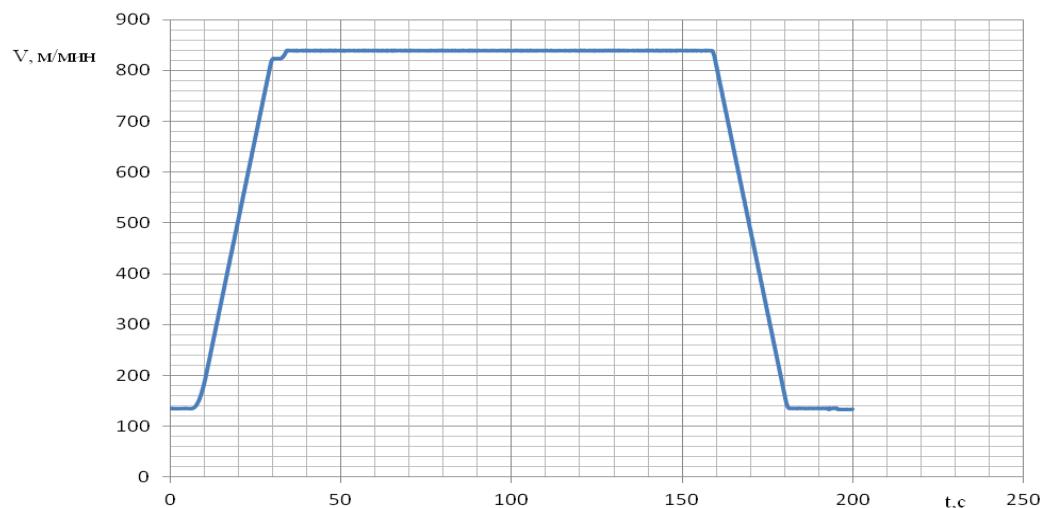


Рис. 3. Линейная скорость валков клетки №3

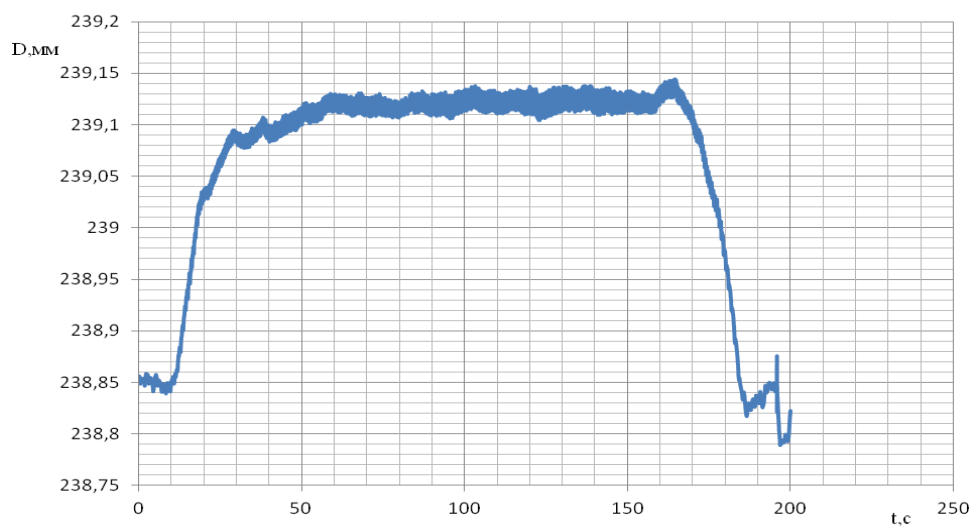


Рис. 4. График изменения позиции ГНУ клетки №4

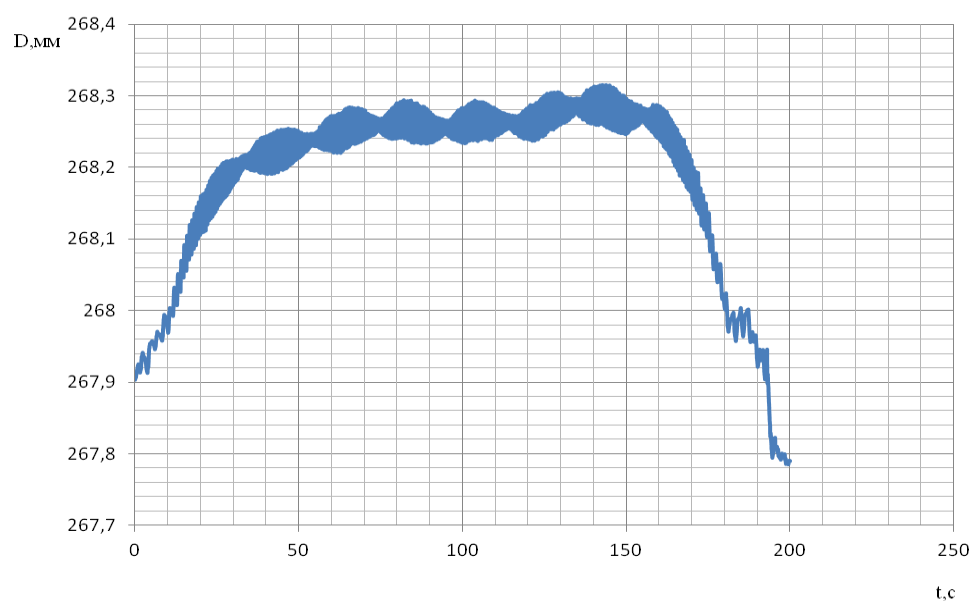


Рис. 5. График изменения позиции ГНУ клетки №3

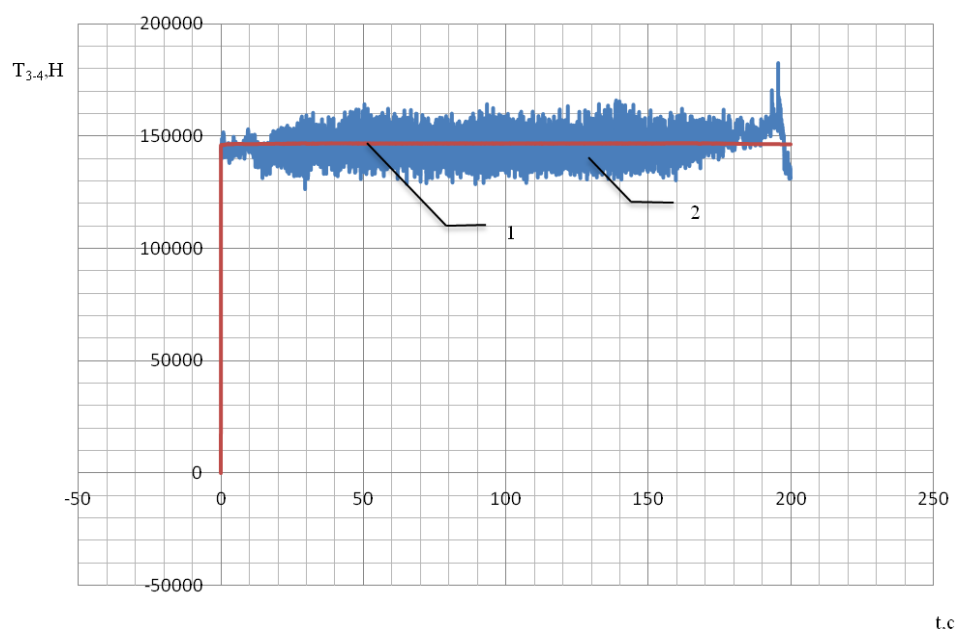


Рис. 6. Графики натяжения между клетями №3 и 4:
1 - натяжение, полученное в ходе моделирования;
2 - натяжение, снятое с реального объекта

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Борцов Ю.А., Соколовский Г.Г. Тиристорные системы электропривода с упругими связями : учеб. для вузов. Л.: Энергия, 1979. 160 с.
2. Белов М.П., Новиков В.А., Рассудов Л.Н. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов: учеб. для вузов. М.: Издательский центр «Академия», 2007. 576 с.
3. Дружинин Н.Н. Непрерывные станы как объект автоматизации. М: Металлургия, 1975. 328 с.
4. Целиков А.И., Никитин Г.С., Рокотян С.Е. Теория продольной прокатки: учеб. М.: Металлургия, 1980. 320 с.
5. Коцарь С. Л. Динамика процессов прокатки. М.: Металлургия, 1997. 256 с.
6. Целиков А.И., Томленов А.Д., Зюзин В.И. Теория прокатки: справочник. М.: Металлургия, 1982. 335 с.
7. Бройдо Б.С. Синтез систем автоматического управления непрерывными станами холодной прокатки. М.: Металлургия, 1978. 160 с.
8. Иванченко Ф.К., Красношарпа В.А. Динамика металлургических машин. М.: Металлургия, 1983. 295 с.
9. Лехов О.С. Динамические нагрузки в линии приво-

да обжимных станов. М.: Машиностроение, 1975. 184 с.

10. Мещеряков В.Н., Диденко Е.Е. Оценка соотношения составляющих момента нагрузки при расчете вращающего момента электродвигателя // Электрика. 2012. №10. С. 31-33.
11. Мещеряков В.Н., Мигунов Д.В. Математическое моделирование способа снижения динамических нагрузок электропривода черновой клети прокатного стана // Электротехнические комплексы и системы управления. 2011. №3. С. 21-26.
12. Мещеряков В.Н., Байков Д.В. Иммитационная модель асинхронного электропривода на базе матричного преобразователя частоты // Вестник ЛГТУ. 2015. №3(25). С. 12-18.
13. Автоматическая система управления синхронным электроприводом черновой клети прокатного стана для режима работы с минимизацией потерь энергии / Мещеряков В. Н., Мигунов Д.В., Мещерякова О.В. // Вести высш. учебных заведений Черноземья. 2012. №1. С. 23-28.
14. Ключев, В.И. Ограничение динамических нагрузок электропривода. М.: Энергия, 1971. 380 с.

INFORMATION IN ENGLISH

MATHEMATICAL MODEL OF INTERCONNECTED ELECTROMECHANICAL SYSTEMS OF STANDS OF CONTINUOUS COLD ROLLING MILL

Meshcheryakov V.N., Tolcheev V.M.

The article describes the algorithm of interaction between rolling stands of a mill of continuous cold rolling through the rolled strip. There is a description of the processed strip as an object of control with elastic and damping properties. Features of interstand tension forming are considered. The influence of rolls position of the adjacent stands on the interstand tension was studied. The authors analyzed the interrelation of speeds of rolls rotation in the adjacent stands taking forward slip into account. The obtained mathematical description made it possible to develop a model to study the properties of considered system. The mathematical modelling was performed in 2011 Matlab package using Simulink application. The results of modelling are compared with real oscillograms of stand no.3 and stand no.4 operating at 2030 PHPP mill of «NLMK». Oscillograms of the mill operation were taken using FADEX program.

Keywords: elasticity, cold rolling, tension, forward slip, modeling.

REFERENCES

1. Bortsov U.A., Sokolovsky. G. G. *Tiristornye sistemy elektroprivoda s uprugimi svyaziami: uchebnik dlya vuzov* [Thyristor Systems of Electric Drive with Elastic Linkage], Leningrad, *Energiya* [Energy], 1979, 160 p.
2. Belov M.P., Novikov V.A., Rassudov L.N. *Avtomatizirovannyi elektroprivod tipovykh promyshlennyykh mekhanizmov : uchebnik dlya vuzov* [Automated Electric Drive of Typical Industrial Mechanisms and Technological Complexes]. Moscow, Publishing centre Academy, 2007, 576 p.
3. Druzhinin N.N. *Nepreryvnye stany kak object avtomatizatsyi* [Continuous Mills as Object of Automation], Moscow, *Metallurgiya* [Metallurgy], 1975, 328 p.
4. Tselikov A.I., Nikitin G.S., Rokotjan S.E. *Teoriya prodolnoy prokatki* [Theory of Longitudinal Rolling], Moscow, *Metallurgiya* [Metallurgy], 1980, 320 p.
5. Kotsar S.L. *Dinamika protsessov prokatki* [Dynamics of Rolling Processes], Moscow, Metallurgy, 1997, 256 p.
6. Tselikov A.I., Talanov D.A., Zyuzin V.I. *Teoriya prokatki* [The Theory of Rolling], Moscow, Metallurgy, 1982, 335 p.

7. Broydo, B.S. *Sintez system avtomaticheskogo upravleniya nepreryvnyimi stanami choldnoy prokatki* [Synthesis of Automatic Control of Continuous Cold Rolling Mills], Moscow, *Metallurgiya* [Metallurgy], 1978, 160 p.
8. Ivanchenko F.K., Krasnoshapka V.A. *Dinamika metallurgicheskikh mashin* [Dynamics of Metallurgical Machines], Moscow, *Metallurgiya* [Metallurgy], 1983, 295 p.
9. Lekhov O.S. *Dinamicheskiye nagruzki v privodakh obzhimnykh stanov* [Dynamic Loads in the Drive Line of Cogging Mills], Moscow, Mechanical engineering, 1975, 184 p.
10. Meshcheryakov V.N., Didenko, E.E. *Otsenka sostovlyayuchikh momenta nagruzki pri raschete sostavlyayuchikh momentov elektroprivoda* [Evaluation of the Ratio of Components of the Load Torque when Calculating the Torque of the Motor], *Elektrika* [Electrical], 2012, no.10, pp. 31-33.
11. Meshcheryakov V.N., Migunov D.V. *Matematicheskoe modelirovanie sposoba snizheniya dinamicheskikh nagрузок elektroprivoda chernovoy kleti prokatnogo stana* [Mathematical modeling of the method of dynamic loads reduction of the actuator roughing stand rolling mill], *Elektrotehnicheskie komplekсы i sistemy upravleniya* [Electrical complexes and systems management], 2011, no.3, pp. 21-26.
12. Meshcheryakov V.N., Baikov V.D. *Imitatsionnaya model asinkhronnogo elektroprivoda na baze matrichnogo preobrazovatelya chastoty* [Simulation Model of the Asynchronous Electric Drive on The Basis of the Matrix Frequency Converter], *Vestnik LGTU* [Bulletin of the LSTU], 2015, no.3(25), pp. 12-18.
13. Meshcheryakov V.N., Migunov D.V., Meshcheryakova O.V. *Avtomaticheskaya sistema upravleniya sinkhronnym elektroprivodom chernovoy kleti prokatnogo stana dlya rezhima raboty s minimizatsiey poter energii* [The automatic control system of synchronous electric roughing stand rolling mill for minimizing energy losses], *Vestnik vyshchikh uchebnich zavedeniy Chernozemya* [News of Higher Educational Institutions of Chernozem region], 2012, no.1, pp. 23-28.
14. Klyuchev V.I. *Ogranicheniye dinamicheskikh nagрузок elektroprivoda* [Limitation of dynamic loads of the actuator], Moscow, *Energiya* [Energy], 1971, 380 p.

ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКАЯ СИСТЕМА АВАРИЙНОГО ТОРМОЖЕНИЯ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

Рассмотрена необходимость присутствия аварийных тормозных систем в составе ветроэнергетических установок, которые требуется устанавливать в дополнение к основной системе управления мощностью. В качестве решения задачи предложено электромеханическое устройство с возможностью автоматического и ручного управления. За счет особой кинематической компоновки элементов и наличия волнового редуктора устройство способно передавать большой по значению тормозной момент при малых габаритных размерах приводных узлов. Особенностью устройства является возможность интеграции в существующие ветроэнергетические установки без существенных конструктивных изменений. Рассмотрена система управления электрическим приводом тормозного блока на основе функциональной схемы. Проведен анализ системы на предмет устойчивости с помощью критерия Михайлова путем построения годографа характеристического уравнения третьего порядка.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии, ветроэнергетическая установка, аварийная система торможения, система управления, регулирование.

ВВЕДЕНИЕ

Принято считать, что углеводородные запасы по различным оценкам закончатся в некоторых странах-экспортерах уже в текущем столетии [1]. Конечно, это не заставляет всерьез задуматься о сырьевом кризисе современные поколения, однако по скептическим прогнозам аналитиков из корпорации Бритиш Петролеум российские нефтяные запасы могут иссякнуть в ближайшие 30 – 50 лет [2]. Кроме того, ситуация обвала цен на мировом топливном рынке, случившаяся в 2015 году и только усугубляющаяся в 2016, свидетельствует о том, что инвестиции в сырьевую энергетику могут быть весьма рискованными, а в последнее время и вовсе убыточными. И напротив, акции таких мультимиллиардных корпораций – производителей крупных ветровых турбин, как Vestas, Siemens, Nordex показывают неуклонный рост. Таким образом, уже сейчас стоит уделять достаточное внимание вопросам разработки альтернативных источников энергии, в особенности в России. Несомненно, за последнее десятилетие в стране произошли существенные позитивные изменения в области законодательной базы идеологических воззрений в отношении возобновляемой энергетики [3,4], но, тем не менее, наблюдается недостаток в научном и технологическом развитии «зеленого» направления.

Учитывая климатические условия основной части территории Российской Федерации, ветроэнергетика является одним из наиболее подходящих видов возобновляемых источников энергии [5]. Причем перспективно внедрять именно объекты малой ветровой генерации, поскольку на неэлектрифицированной территории находятся небольшие локальные поселения и образования, либо промышленные объекты, не требующие крупных мощностей.

Для преобразования кинетической энергии ветра в электрическую используют ветроэнергетические установки, которые, в свою очередь, делятся на два основных типа: вертикально-осевые и горизонтально-осевые [6]. Наибольшее распространение в мире получили традиционные установки горизонтально-осевого типа, однако в последнее время благодаря ряду пре-

имуществ [7] все более востребованными становятся установки вертикально-осевого типа. На **рис. 1** изображена конструкция ветроэнергетической установки с вертикальной осью вращения [8]. Достоинствами таких установок являются независимость работы от направления ветра, самостоятельный старт при относительно малых скоростях и отсутствие инфразвука, который оказывает негативное влияние на окружающую среду [9,10]. Ветер вращает ротор (ветроколесо) ВЭУ, который в свою очередь вращает вал генератора, тем самым происходит преобразование кинетической энергии набегающего потока ветра в электрическую энергию. Вертикально-осевые ветроэнергетические установки являются более удобными при монтаже, так как генератор и прочее электрооборудование можно располагать на земле.

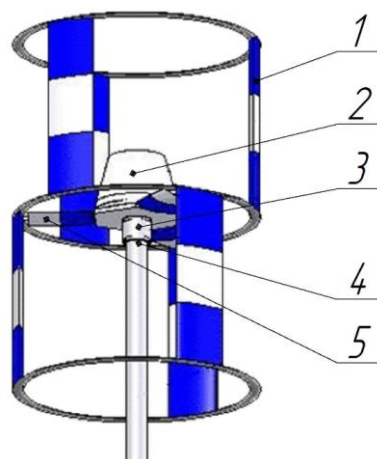


Рис. 1. Вертикально-осевая ветроэнергетическая установка: 1 – лопасти; 2 – электрический генератор; 3 – ступица; 4 – верхний сегмент мачты; 5 – аэродинамические регуляторы

НЕОБХОДИМОСТЬ НАЛИЧИЯ СИСТЕМЫ ТОРМОЖЕНИЯ

Мощность, располагаемая ветроколесом установки, находится в кубической зависимости от скорости ветрового потока, то есть при увеличении скорости ветра в два раза мощность потока возрастает в восемь раз. Исходя из мировой практики использования вет-

роагрегатов, известно, что при скоростях ветра выше 15-25 м/с появляется большая вероятность разрушения лопастей и перегрева электрического генератора [11]. Также при высокой частоте вращения ротора могут возникать вибрационные колебания, которые негативно сказываются на функционировании всех элементов конструкции и в особенности подвижных узлов – подшипников, компонентов ротора и элементов тормозных устройств [12]. Чтобы предотвратить появление таких негативных факторов, необходимо оснащать ветроустановки системами управления мощностью и устройствами торможения. В зарубежной литературе можно обнаружить недавно разработанные способы управления мощностью посредством самого электрического генератора [13-15]. Но в реальной практике использования ветроэнергетического оборудования торможение ветроколеса генератором до сих пор не отработано, и остаются достаточно высокие риски перегрева обмоток электрической машины [16], либо ее выход из строя. В связи с этим возникла задача оборудовать агрегаты дублирующими (аварийными) системами управления-торможения.

РЕШЕНИЕ ПОСТАВЛЕННОЙ ЗАДАЧИ

Решение этой задачи рассмотрим на примере интеграции электромеханического тормозного устройства в конструкцию вертикально-осевой ветроэнергетической установки мощностью 3 кВт (ВЭУ-3). Как показано на **рис. 2**, в основание ступицы устанавливается блок, состоящий из кулачкового механизма разжатия, редуктора и электропривода.

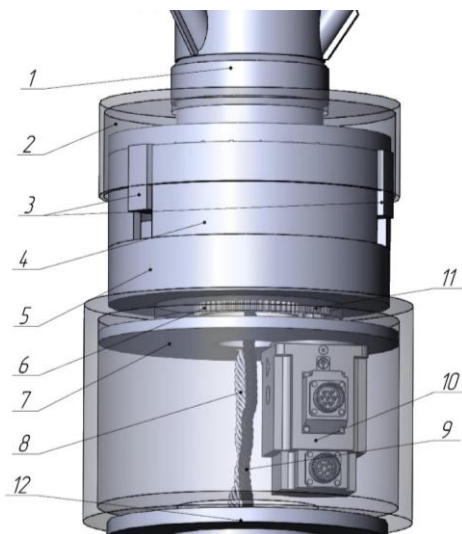


Рис. 2. Электромеханический блок торможения, интегрированный в ступицу ВЭУ-3: 1 – ступица; 2 – контактная стенка; 3 – кулачки; 4 – корпус с направляющими; 5 – волновой редуктор; 6 – входной вал (шестерня) редуктора; 7 – установочная шайба; 8 – гибкий трос ручного привода; 9 – провод от генератора; 10 – электрический привод; 11 – приводная шестерня; 12 – фланец мачты

Между ступицей и крепежным фланцем мачты устанавливаются два промежуточных звена – волновой редуктор с кулачковым разжимным блоком и приводные устройства. В данном случае используется электрический привод и механический. Необходимость механического ручного привода обусловлена требованиями безопасности при использовании ветроэнерге-

тической установки на ответственных объектах [17]. Механическая передача вращающего момента осуществляется с помощью гибкого троса, идущего от основания установки внутри мачты и закрепленного в верхней точке на установочной шайбе. Электропривод тоже крепится на установочную шайбу с противоположной стороны от ручного привода. Оба привода входят в зацепление с волновым редуктором при помощи зубчатой передачи с передаточным соотношением 1:3. Передаточное отношение волнового редуктора составляет 1:120. Такой тип редуктора выбран из конструктивных соображений, так как никакая иная конструкция не позволяет передавать вращения с достаточно большим коэффициентом понижения при наличии центрального отверстия. Отверстие же необходимо для проведения проводов от генератора к основанию мачты. С выходного вала редуктора вращение передается на кулачковый механизм, который состоит из спирального приводного диска, трех кулачков и направляющих. На подошве кулачков имеются гребни, при скольжении которых по спиральному бурту диска кулачки перемещаются в осевом направлении. Таким образом, при движении кулачков от центра к периферии их фрикционные грани упрутся во внутреннюю контактную стенку вращающейся ступицы. В результате чего начнется процесс трения скольжения, что является причиной торможения вращающегося ротора вплоть до полной остановки. При нормализации погодных условий управляющий контроллер подаст соответствующую команду на возврат кулачков в исходное состояние. Очевидно, что сила прижатия кулачков к контактной стенке мачты будет влиять на тормозной момент, передаваемый кулачками. За счет высокого суммарного передаточного коэффициента (1:360) процесс прижатия кулачков к контактной стенке будет достаточно плавным, а также это позволит использовать маломощный электропривод, что существенно уменьшит его габариты. Для большего понимания конструкции электромеханического тормозного устройства на **рис. 3** приведена его кинематическая схема.

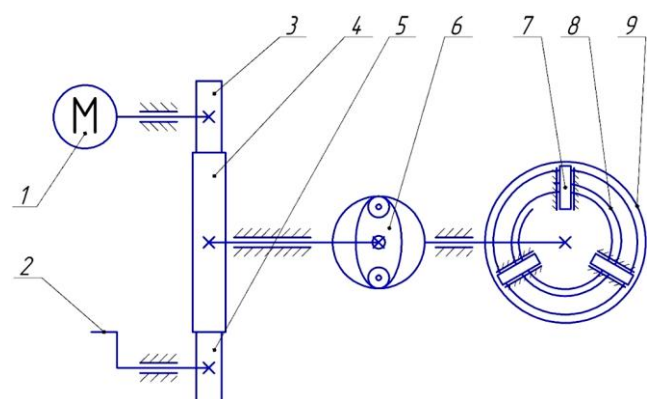


Рис. 3. Кинематическая схема электромеханического тормозного устройства: 1 – электропривод; 2 – ручной привод; 3 – выходная шестерня электропривода; 4 – приводная шестерня волнового редуктора; 5 – выходная шестерня ручного привода; 6 – волновой редуктор; 7 – кулачки; 8 – спиральный диск; 9 – контактная стенка

Для управления электромотором можно использовать штатный микроконтроллер ветроэнергетической установки. Однако для мониторинга состояния

динамических параметров ВЭУ-3 необходимо устанавливать датчики. В целом достаточно иметь три основных вида датчиков: частоты вращения ротора, температуры генератора и вибрационных колебаний на мачте. Приведенный набор датчиков позволяет определять наиболее распространенные причины аварийных ситуаций. Далее необходимо определить структурную последовательность звеньев в системе управления, для этого обратимся к **рис. 4**.

Необходимо учитывать, что все элементы системы управления имеют некоторую инерционность, следовательно, сам процесс управления может быть неустойчивым, либо находиться на границе устойчивости. А принимая во внимание, что ветровая нагрузка на ротор является стохастической величиной, возникает вероятность перерегулирования системы управления. Для исключения перечисленных негативных факторов необходимо провести соответствующую проверку системы на устойчивость. Очевидно, что микроконтроллер, электрический привод, датчики и прочие электронные и электрические компоненты системы управления обладают коэффициентами инерционности. Но величины этих коэффициентов будут ничтожно малы по сравнению с инерционностью механических звеньев – редуктора и кулачкового блока, и их значениями можно в расчете пренебречь. Таким образом, мы получим характеристическое уравнение системы третьего порядка

$$D(p) = a_0 p^3 + a_1 p^2 + a_2 p + a_3. \quad (1)$$

Для определения устойчивости систем третьего порядка сформулированы два критерия – Вышнеградского и Михайлова [18]. В нашем случае для получения универсального шаблона по расчету устойчивости системы более предпочтительным будет критерий Михайлова, т.к. он имеет графическое отображение результатов расчета, в то время как по критерию Вышнеградского приходится работать с крупным математическим массивом. Критерий А.В. Михайлова подразумевает анализ характеристического уравнения, которое можно записать в виде [19]

$$D(j\omega) = R_e(\omega) + jJ_m(\omega), \quad (2)$$

где $R_e(\omega)$ – действительная часть, полученная из составляющих уравнения (1), содержащих четные степени $(j\omega)$, а $J_m(\omega)$, соответственно, из членов с нечетными степенями. Каждому значению ω_i на комплексной плоскости соответствует вектор, конец которого имеет координаты $R_e(\omega_i)$ и $J_m(\omega_i)$. Если варьировать значение ω_i от 0 до ∞ , то конец вектора опишет на комплексной

плоскости кривую, которая будет являться годографом. А если система устойчива, то годограф начинается при $\omega=0$ на действительной положительной полуоси и при неограниченном возрастании ω последовательно огибает начало координат против часовой стрелки, проходя n квадрантов комплексной плоскости, где n – порядок характеристического уравнения [19]. В случае, если годограф проходит через начало координат, это свидетельствует о том, что система находится на границе устойчивости [20].

Итак, запишем для рассматриваемой системы управления характеристический многочлен с учетом коэффициентов для каждого из блоков системы:

$$D(p) = 3824,5p^3 + 4448,2p^2 + 63,03p + 0,308. \quad (3)$$

Осуществляя подстановку $p=j\omega$ в (3), получим характеристический вектор $D(j\omega)$:

$$D(j\omega) = 3824,5(j\omega)^3 + 4448,2(j\omega)^2 + 63,03(j\omega) + 0,308. \quad (4)$$

Разделив действительную и мнимую составляющую вектора $D(j\omega)$, получим (2). Пересечение годографа с осью R_e происходит при $J_m(\omega)$:

$$J_m(\omega) = \omega \cdot (63,03 - 3824,5\omega^2) = 0, \quad (5)$$

$$\omega_1 = 0, \quad \omega_2 = \sqrt{\frac{63,03}{3824,5}} = 0,128.$$

Таким образом, первая точка пересечения при $\omega_1=0$ соответствует $R_e(\omega_1)=0$, вторая точка при $\omega_2=0,128$ соответствует $R_e(\omega_2)=-73$. Пересечение годографа с осью J_m происходит при

$$R_e(\omega) = 0,308 - 4448,2\omega^2 = 0, \quad (6)$$

$$\omega_1 = \left(\frac{0,308}{4448,2} \right)^{1/2} = 8,3 \cdot 10^{-2}, \quad J_m(\omega_1) = 0,522.$$

Теперь выберем положительные значения корней, т.к. ω изменяется от 0 до ∞ . А для построения графика зададимся рядом значений $0 < \omega < \infty$ и рассчитаем соответствующие значения $R_e(\omega)$ и $J_m(\omega)$. По данным из **таблицы**, приведенной ниже, представлен годограф характеристического уравнения на **рис. 5**.

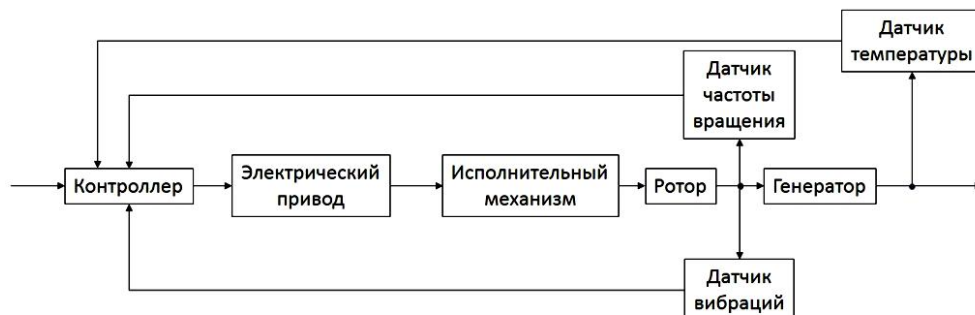


Рис. 4. Функциональная схема системы управления электромеханическим тормозным устройством

ω	0	$5 \cdot 10^{-2}$	$8 \cdot 10^{-2}$	10^{-1}	$2 \cdot 10^{-1}$	...	∞
R_e	0,308	-10,8	-28,16	-44,17	-177,6	...	$-\infty$
J_m	0	2,67	3,08	2,47	-17,99	...	$-\infty$

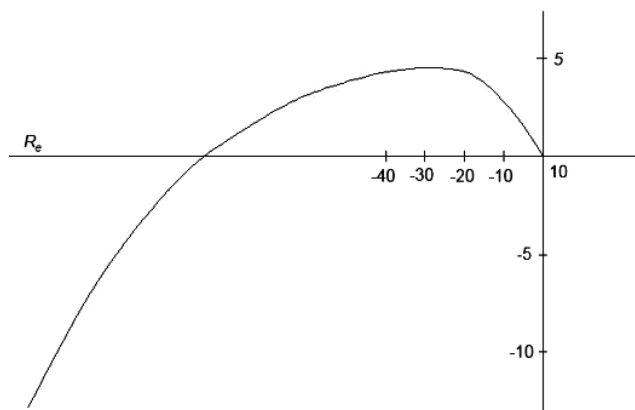


Рис. 5. Годограф Михайлова для характеристического уравнения третьего порядка

На основании полученного годографа Михайлова можно сделать вывод об устойчивости системы, т.к. кривая последовательно огибает точку начала координат против часов стрелки и проходит через 3 квадранта комплексной плоскости.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Преимуществами исследуемого электромеханического устройства аварийного торможения являются его высокая надежность и возможность интеграции в существующие ветроэнергетические установки без существенных конструктивных изменений. Тормозной механизм имеет длительный срок работы и удовлетворительную степень ремонтпригодности. Кроме того, рассматриваемая система будет иметь невысокую стоимость по сравнению с теми затратами, которые могут возникнуть в связи с последствиями аварии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Елистратов В.В. Возобновляемая энергетика. Изд. 2-е, доп. СПб.: Наука, 2013. 308 с.
2. British Petroleum: спрос на энергоресурсы вырастет, приоритет сместится на экотопливо. Федеральное государственное унитарное предприятие «Международное информационное агентство «Россия сегодня» Экономика. 2016. URL: <http://ria.ru/economy/20160210/1372534873.html> (дата обращения: 11.02.2016).
3. Федеральный закон от 26.03.2003 N 35-ФЗ (ред. от 30.12.2015) «Об электроэнергетике». М., 2015.
4. Постановление Правительства РФ от 28.05.2013 N 449 (ред. от 10.11.2015) «О механизме стимулирования использования возобновляемых источников энергии на оптовом рынке электрической энергии и мощности». М., 2015.
5. Безруких П.П. Использование энергии ветра // Техника, экономика, экология. М.: Колос, 2008.
6. Лятхер, В.М. Развитие ветроэнергетики // Малая энергетика. 2006. № 2(4-5). С.18-38.
7. Кирпичникова И.М., Мартянов А.С., Соломин Е.В. Моделирование генератора ветроэнергетической установки // Электротехника. 2013 №10. С.46-49.
8. Kirpichnikova I.M., Martyanov A.S., Solomin E.V. Vertical axis wind turbines. New aspects / ISJAE 2013. №1-2 (118). С. 55-58.
9. Безруких П.П. Ветроэнергетика. Вымыслы и факты. Ответы на 100 вопросов. М.: Институт устойчивого развития Общественной палаты Российской Федерации. Центр экологической политики России, 2011. 74 с.

гической политики России, 2011. 74 с.

10. Соломин Е.В., Кирпичникова И.М., Мартянов А.С. Итерационный подход в разработке и оптимизации вертикально-осевых ветроэнергетических установок // Электротехника. Электротехнология. Энергетика: сб. науч. трудов VII междунар. науч. конференции молодых ученых. Новосибирский государственный технический университет; Межвузовский центр содействия научной и инновационной деятельности студентов и молодых ученых Новосибирской области. Новосибирск, 2015. С. 92-95.
11. Безруких П.П. Использование энергии ветра. Техника, экономика, экология. М.: Колос, 2008.
12. Michos D, Dialynas E, Vionis P. Reliability and Safety Assessment of Wind Turbines Control and Protection Systems. WIND ENGINEERING, 2006, 26(6):359-369.
13. Jogendra Singh Thongam and Mohand Ouhrouche (2011). MPPT Control Methods in Wind Energy Conversion Systems, Fundamental and Advanced Topics in Wind Power, Dr. Rupp Cariveau (Ed.), ISBN: 978-953-307-508-2.
14. Thongam J.S., Bouchard P., Ezzaidi H. and Ouhrouche M. Wind speed sensorless maximum power point tracking control of variable speed wind energy conversion systems, Proc. of the IEEE International Electric Machines and Drives Conference IEMDC 2009, May 3-6, 2009, Florida, USA.
15. Kwon J.M., Kim J.H., Kwak S.H. and Lee H.H. Optimal power extraction algorithm for DTC in wind power generation systems, Proc. IEEE International Conf. on Sustainable Energy Technology, (ICEST 2008), Singapore, 24-27 Nov., 2008 pp. 639 - 643.
16. Wang S., Qi Z. and Undeland T. State space averaging modeling and analysis of disturbance injection method of MPPT for small wind turbine generating systems, Proc. APPEEC, 2009.
17. Ильичев В.Г. Основы автоматики и системы автоматического регулирования: учеб. пособие. Челябинск: ЧПИ, 1986. 87 с.
18. Дядик В.Ф., Байдали С.А., Криницын Н.С. Теория автоматического управления: учеб. пособие / Национальный исследовательский Томский политехнический университет. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. 196 с.
19. Воронов А.А. Основы теории автоматического управления. Автоматическое регулирование непрерывных линейных систем. 2-е изд., перераб. М.: Энергия, 1980. 309 с.
20. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического управления. 4-е изд., перераб. и доп. СПб: Профессия, 2003. 752 с.

INFORMATION IN ENGLISH

ELECTRO-MECHANICAL SYSTEM OF EMERGENCY BRAKING FOR WIND TURBINE

Solomin E.V., Sirotkin E.A., Kozlov S.V.

The authors stressed the importance of emergency braking systems for wind turbines. These braking tools should be embedded in wind turbine design as the expansion of the main control system. The research group considered electromechanical device with automatic and manual modes to solve this problem. The device with small overall dimensions transmits high braking torque with the help of specific kinematic parts combination and waveform gear reduction unit. The specific feature of the braking system is the ability of its integration into the wind turbine construction without significant changes. The authors discussed the electrical drive control system on the basis of functional chart. System stability was analyzed using Mikchailov criterion plotting the hodograph of third order performance equation.

Keywords: renewable energy sources, wind turbine, emergency braking system, control system.

REFERENCES

1. Elistratov V.V. *Vozobnovlyаемая энергетика* [Renewable Power Generation], 2-nd edition, SPb, Nauka, 2013, 308 p.
2. British Retroleum: *spros na energoresursy vyrastet, prioritet smestitsja na eko-toplivo* [demand on energy resources will grow up, pollution-free fuel will get the main priority], Federalnoe gosudarstvennoe unitarnoe predpriятие «Mezhdunarodnoe informacionnoe agentstvo «Rossija segodnya», Economics. 2016. URL: <http://ria.ru/economy/20160210/1372534873.html> (accessed: 11.02.2016).
3. Federal Law on 26.03.2003 N 35-ФЗ (as in force on 30.12.2015) «Electric Energy Act».
4. Decree of the RF Government on 28.05.2013 N 449 (as in force on 10.11.2015), «Stimulation of Renewable Energy sources Application in the Wholesale Market of Electrical Energy and Power».
5. Bezrukih, P.P. *Ispolzovanie energii vetra* [Wind Energy Application], Engineering, Economics, Ecology, Moscow, Kolos, 2008.
6. Lyather, V.M. *Razvitie vetroenergetiki* [Wind Power Engineering Development], Malaja energetika, 2006, no.2(4-5). pp. 18-38.
7. Kirpichnikova I.M., Martyanov A.S., Solomin E.V. *Modelirovanie generatora vetroenergeticheskoy ustanovki* [Generator Modeling for Wind-Driven Power Plant], Electrical engineering, 2013, no.10, pp.46-49.
8. Kirpichnikova I.M., Martyanov A.S., Solomin E.V. Vertical axis wind turbines. New aspects, ISJAEE 2013. no.1-2 (118). pp 55-58.
9. Bezrukih P.P. *Vetrojenergetika. Vymysly i fakty. Otveti na 100 voprosov* [Wind Power Engineering. Myths and Facts. Answers to 100 Questions]. Moscow, Institut ustojchivogo razvitiya Obshhestvennoj palaty Rossijskoj Federacii, Centr jeologicheskoy politiki Rossii, 2011, 74 p.
10. Solomin E.V., Kirpichnikova I.M., Martyanov A.S. *Iteracionnyj podhod v razrabotke i optimizacii vertikalnoosevyh vetroenergeticheskikh ustanovok* [Iterative Approach to development and Improvement of Vertical Axis Wind Turbines], Collection of scientific papers: Electrical engineering. Electrotechnics. Collection of scientific papers of the VII international scientific conference of young scientists. Novosibirsk State Technical University; Interuniversity center of assistance to scientific and innovative activity of students and young scientists of Novosibirsk region. Novosibirsk, 2015. pp. 92-95.
11. Bezrukih P.P. *Ispolzovanie jenergii vetra. Tehnika, ekonomika, ekologiya* [Making Use of Wind Energy. Engineering, Economics, Ecology]. M.: Kolos, 2008.
12. Michos D, Dialynas E, Vionis P. Reliability and Safety Assessment of Wind Turbines Control and Protection Systems. WIND ENGINEERING, 2006, 26(6):359–369.
13. Jogendra Singh Thongam and Mohand Ouhrouche (2011). MPPT Control Methods in Wind Energy Conversion Systems, Fundamental and Advanced Topics in Wind Power, Dr. Rupp Carriveau (Ed.), ISBN: 978-953-307-508-2.
14. Thongam J.S., Bouchard P., Ezzaiddi H. and Ouhrouche M. Wind speed sensorless maximum power point tracking control of variable speed wind energy conversion systems, Proc. of the IEEE International Electric Machines and Drives Conference IEMDC 2009, May 3–6, 2009, Florida, USA.
15. Kwon J.M., Kim J.H., Kwak S.H. and Lee H.H. Optimal power extraction algorithm for DTC in wind power generation systems, Proc. IEEE International Conf. on Sustainable Energy Technology, (ICEST 2008), Singapore, 24-27 Nov., 2008 pp. 639 – 643.
16. Wang S., Qi Z. and Undeland T. State space averaging modeling and analysis of disturbance injection method of MPPT for small wind turbine generating systems, Proc. APPEEC, 2009.
17. Ilyichev V.G. *Osnovy avtomatiki i sistemy avtomaticheskogo regulirovaniya: Ucheb. posobie dlja studentov vech. obucheniya* [Fundamentals of Automation and Automatic Control Systems], Chelyabinsk, ChPI, 1986, 87 p.
18. Dyadik V.F., Bajdali S.A., Krinicyan N.S. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya: uchebnoe posobie* [Theory of Automatic Control: textbook], National Research Tomsk Polytechnic University. Tomsk: Publishing center of Tomsk Polytechnic University, 2011, 196 p.
19. Voronov A.A. *Osnovy teorii avtomaticheskogo upravleniya. Avtomaticheskoe regulirovanie nepreryvnyh lineynyh sistem* [Fundamentals of Automatic Control Theory. Automatic Control of Continuous Linear Systems], 2nd edition. Moscow, Energy, 1980, 309 p.
20. Besekerskiy V.A., Popov E.P. *Teoriya sistem avtomaticheskogo upravleniya* [Theory of Automatic Control Systems], 4-th edition. SPb, Professiya, 2003, 752 p.

РАСЧЕТ СЕБЕСТОИМОСТИ СВЕЖЕГО ПАРА НА КРУПНЫХ ТЕПЛОВЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯХ

В данной работе приводится оригинальная методика расчета себестоимости свежего пара на промышленной тепловой электростанции, учитывающая отличительные особенности тепловой схемы, наличие тепловой и электрической нагрузки, работу котлов на газоугольной смеси. Данный подход позволяет определить стоимость 1 т свежего пара, принимая во внимание затраты на первичный энергоноситель, фонд оплаты труда и собственные нужды. В качестве исходных данных используются режимные карты котлов, стоимостные показатели энергоресурсов и калькуляции электростанций. Полученные значения себестоимости пара необходимы для построения технико-экономических моделей котлоагрегатов и турбогенераторов с целью проведения внутростанционной оптимизации по тепловой и электрической энергии. Внедрение результатов оптимизации в условия действующей электростанции позволит определить экономически целесообразные расходы используемых энергоресурсов, что в целом снизит затраты на производство тепла и электроэнергии.

Ключевые слова: электростанция, свежий пар, себестоимость пара, режимная карта, котел, турбогенератор, энергоресурс, фонд оплаты труда, уголь, природный газ, электроэнергия, тепловая нагрузка, расход энергоресурсов.

ВВЕДЕНИЕ

Крупные металлургические предприятия в условиях рыночной экономики, с целью повышения конкурентоспособности, различными способами снижают себестоимость готовой продукции как за счет проведения энергосберегающих мероприятий в области технологии [1], так и за счет внедрения политики энергосбережения [2], имеющей различные пути реализации, например:

- определение наиболее рациональных режимов потребления электроэнергии [3 - 5];
- снижение затрат на выработку электрической и тепловой энергии за счет рационального использования покупных и вторичных энергоресурсов [6];
- оптимальное управление энергетическим оборудованием собственных электростанций предприятий [7].

Вопросами повышения экономичности работы тепловых электростанций занимаются практически с самого начала их внедрения. Основные задачи, решаемые в данной области, посвящены повышению экономичности работы энергоблоков [8], улучшению технико-экономических показателей работы тепловых электростанций [9-11]. Большое внимание многие авторы уделяют рациональному использованию покупных [12] и вторичных энергоресурсов [13].

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ПРОМЫШЛЕННЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

С целью выполнения мероприятий по энергосбережению на промышленных электростанциях с неблочными тепловыми и электрическими схемами, работающих на смеси топлив, авторами [14, 15] разработан алгоритм оптимизации режимов работы котлоагрегатов и генераторов с учетом проверки последних по статической устойчивости [16]. Данный алгоритм основан на методе динамического программирования в сочетании с модифицированным методом последовательного эквивалентирования. Основные положения метода динамического программирования изложены в [17, 18]. Алгоритм реализован в составе программно-вычислительного комплекса «КАТРАН» - модуль «Оптимизация» [19] и позволяет определять экономически

целесообразные загрузки генераторов и котлоагрегатов по критерию минимума затрат на свежий пар, идущий на теплофикацию и выработку электроэнергии.

Основными исходными данными для расчета являются технико-экономические модели генераторов и котлов, представляющие собой зависимость соответственно мощности на их клеммах и паропроизводительности от себестоимости одной тонны свежего пара [14].

Для построения данных моделей необходимо осуществить расчеты себестоимости пара для различных паропроизводительностей котлов и расходов топлива согласно режимным картам.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА СЕБЕСТОИМОСТИ СВЕЖЕГО ПАРА НА ПРОМЫШЛЕННЫХ ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯХ, РАБОТАЮЩИХ НА ГАЗОУГОЛЬНОЙ СМЕСИ

Себестоимость пара промышленных электростанций в большей степени определяется затратами на энергетическое топливо, техническую воду, химически очищенную воду (ХОВ), электроэнергию, необходимую для собственных нужд (с.н.) электростанции, фонд оплаты труда (ФОТ), текущий ремонт и амортизацию, причем три последних составляющих являются постоянной частью затрат и не зависят от паропроизводительности котла.

В свою очередь, рассмотренные выше затраты на производство пара в общем можно разделить на три части, зависящие: от капитальных затрат; от фонда оплаты труда; от объема выработанной электрической и тепловой энергии.

Учет того или иного фактора при расчете себестоимости пара электростанции является практически индивидуальным для каждой электростанции промышленной системы электроснабжения и во многом зависит от времени введения в эксплуатацию генераторов.

Например, особенностью режимов работы котлов некоторых ТЭЦ в зимний период является совместное сжигание природного газа и угольной пыли, в летний – используется только природный газ. Кроме того, каждый котел характеризуется различными значениями производительности пара и соответствующим им расходом топлива, данные отражены в режимных картах котлов. Однако при определении себестоимости све-

жего пара достаточно часто можно столкнуться с проблемой отсутствия некоторой исходной информации. В данной работе такая проблема возникла при определении себестоимости пара на ТЭЦ. В существующих режимных картах котлов при их работе на газугольной смеси приведены только значения расхода природного газа, информация по объемам затрачиваемого угля отсутствует. Таким образом, для определения себестоимости пара на ТЭЦ необходимо осуществить разработку методики расчета себестоимости 1 т свежего пара, учитывающую отсутствие информации о количестве расходуемой угольной пыли.

В табл. 1 приведен пример расчета себестоимости

пара энергетического котла типа ТП-170 с паропроизводительностью 170 т/ч, рабочим давлением 100 кгс/см² и температурой перегретого пара 510°C. Пример режимной карты данного котла рассмотрен в [20].

На основании разработанной методики, рассчитываются себестоимости и для других паропроизводительностей котла. Результатами расчета являются технико-экономические модели котлов и турбогенераторов (работающих на одном паропроводе к котлоагрегату), представленные на рис. 1 и 2 и в табл. 2 и 3 соответственно.

Таблица 1

Методика расчета себестоимости 1 т свежего пара на ТЭС

Порядок расчета	Методика расчета	Пример расчета
1. Перевести расход ПГ для соответствующей паропроизводительности котла из тыс.м ³ в т у.т.	1 тыс. м ³ = 1,154 т у.т. [21]	6 м ³ = 6,92 т у.т.
2. Определить расход угля в топливной смеси в зависимости от паропроизводительности и расхода ПГ	$B_{уг} = B_{0ПГ} - B_{0см}$, где $B_{уг}$ - расход угля, т у.т.; $B_{0ПГ}$ - расход ПГ при работе котла на ПГ, т у.т.; $B_{0см}$ - расход ПГ при работе котла на газугольной смеси, т у.т.	$B_{уг} = 15,6 - 6,9 = 8,655$ т у.т.
3. Перевод расхода угольной пыли из т у.т в т	В России за единицу условного топлива (т у.т.) принимается теплотворная способность 1 кг каменного угля, поэтому: 8,655 т у.т = 8,655 т угольной пыли	
4. Расчет затрат на ПГ и угольную пыль в рублях.	$З_{ПГ} = B_{ПГ} \cdot C_{ПГ}$, где $B_{ПГ}$ - расход ПГ, м ³ ; $C_{ПГ}$ - стоимость 1 м ³ ПГ, руб./м ³ . $З_{уг} = B_{уг} \cdot C_{уг}$, где $B_{уг}$ - расход угля, т; $C_{уг}$ - стоимость 1 т угля, руб./т. Суммарные затраты на энергетическое топливо: $З_{топливо} = З_{ПГ} + З_{уг}$	Согласно данным центра энергосберегающих технологий по состоянию на октябрь 2012 г.: - стоимость ПГ $C_{ПГ} = 2706,5$ руб./10 ³ ·м ³ ; - стоимость угля $C_{уг} = 2981$ руб./т. $З_{уг} = 8,66 \cdot 2981 = 25801$ руб. $З_{ПГ} = 6,92 \cdot 2706,51 = 16239$ руб. $З_{топливо} = 16239 + 25801 = 42040$ руб.
5. Расчет себестоимости пара без учета затрат на с.н., ФОТ и амортизационные отчисления	$S_{пр} = \frac{З_{топливо}}{D_0}$, где D_0 - паропроизводительность котла, т/ч	$S_{пр} = \frac{42040}{170} = 247,29$ руб./т
6. Определение доли затрат на ФОТ и амортизацию, расход ХОВ, техническую воду, электрическую энергию и конденсат, затрачиваемые на производство 1 т свежего пара	Доля затрат перечисленных расходных статей определялась путем обработки калькуляций электростанции от затрат на топливо, необходимого для производства 1 т свежего пара	Электроэнергия - 5,1%; ХОВ - 0,279%; техническая вода - 0,01%; конденсат - 2,6%; ФОТ - 3,02 руб./т; амортизационные отчисления - 1,76 руб./т

Окончание таблицы 1

Порядок расчета	Методика расчета	Пример расчета
7. Расчет затрат на с.н., ФОТ и амортизация для производства 1 т свежего пара. Затраты на ФОТ и амортизацию были получены в результате анализа калькуляций себестоимости пара за январь-декабрь 2013 г.	Затраты на электроэнергию: $З_{эл.эн} = 0,051 \cdot S_{пр}$ Затраты на ХОВ: $З_{ХОВ} = 0,00279 \cdot S_{пр}$ Затраты на техническую воду: $З_{тех.вода} = 0,0001 \cdot S_{пр}$ Затраты на конденсат: $З_{конд.} = 0,026 \cdot S_{пр}$ Затраты на ФОТ: $З_{ФОТ} = const = 3,02 \text{ руб./т.}$ Отчисления на амортизацию: $З_{аморт} = const = 1,76 \text{ руб./т}$	$З_{эл.эн} = 0,051 \cdot 247,29 =$ $= 12,61 \text{ руб./т.}$ $З_{ХОВ} = 0,00279 \cdot 247,29 =$ $0,69 \text{ руб./т.}$ $З_{тех.вода} = 0,0001 \cdot 247,29 =$ $0,03 \text{ руб./т.}$ $З_{конд.} = 0,026 \cdot 247,29 =$ $6,43 \text{ руб./т.}$
8. Вычисление себестоимости одной тонны свежего пара с учетом затрат на собственные нужды и ФОТ	$S = S_{пр} + З_{с.н.} + З_{ФОТ} + З_{аморт}$ где $З_{с.н.}$ - затраты на с.н. для производства 1 т свежего пара $З_{с.н.} = З_{эл.эн} + З_{ХОВ} + З_{тех.вода} + З_{конд.}$	$S = 247,29 + 12,612 + 0,69 +$ $+ 0,03 + 6,43 + 3,02 + 1,76 =$ $= 271,83 \text{ руб./т.}$

Таблица 2

Технико-экономическая модель энергетического котла типа ТП-170

D_0 , т/ч	110	130	150	170
S , руб./т	276,99	274,74	278,37	281,15
$B_{ПГ}$, $\cdot 10^3 \text{ м}^3/\text{ч}$	3,00	4,00	4,00	4,00
$B_{УГ}$, т/ч	6,58	7,27	9,12	10,96

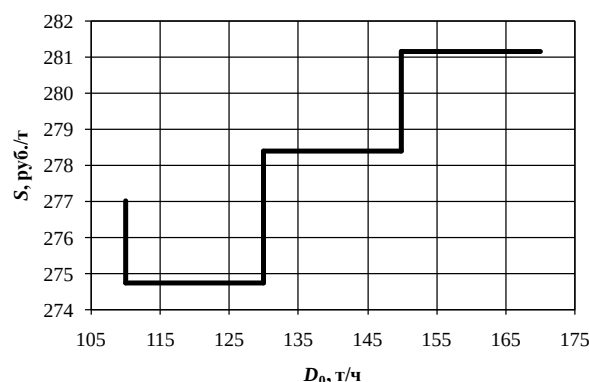


Рис. 1. Технико-экономическая модель энергетического котла типа ТП-170

Таблица 3

Технико-экономическая модель турбогенератора

P_0 , МВт	35	37	39	41	43	45	47	48
D_0 , т/ч	223	230	239	243	253	260	267	270
S , руб./т	247	249	251	251	251	252	252	252

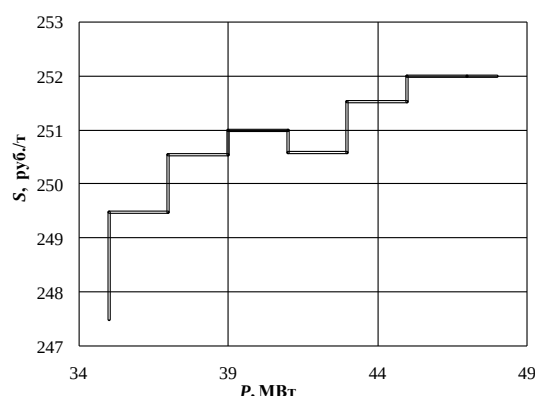


Рис. 2. Технико-экономическая модель турбогенератора ТЭЦ

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученная методика позволяет определять себестоимость пара на тепловых электростанциях промышленных предприятий в условиях неопределенности;

Величины себестоимости пара учитывают не только затраты на первичный энергоноситель, но и другие статьи калькуляций электростанций: ФОТ, затраты на собственные нужды, отчисления на ремонт и обслуживание;

Разработанные технико-экономические модели котлов и генераторов используются в качестве исходных данных для внутростанционной оптимизации их работы, а также для оптимизации эксплуатационных режимов систем электроснабжения с собственными электростанциями промышленного энергоузла;

Полученные модели используются в качестве исходных данных для оптимизации установившихся режимов промышленных систем электроснабжения по критерию минимума затрат на свежий пар, что в целом снижает долю энергозатрат в себестоимости готовой продукции предприятия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сергеев П.А., Нешпоренко Е.Г. Улучшение производительности и снижение энергоёмкости доменного производства чугуна // Наука и производство Урала. 2015. №11. С. 42-46.
2. Российская Федерация. Законы. Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации: [федер. закон: принят Гос. Думой 11 ноября 2009 г. : одобр. Советом Федерации 18 ноября 2009 г.]. М. : Ось, 2001. 46 с.
3. Управление энергопотреблением и энергосбережение. Теория и практика / Г.В. Никифоров, В.К. Олейников, Б.И. Заславец, А.Н. Шеметов. Магнитогорск, 2013. 422 с.
4. Никифоров Г.В., Олейников В.К., Шеметов А.Н. Об оптимальных режимах электропотребления в условиях металлургического производства // Электрика. 2002. №3. С. 9-13.
5. Никифоров Г.В. Энергосбережение: концепция производителя энергии и позиция энергоёмкого партнёра и потребителя // Энергетик. 1999. № 8. С. 5-6.
6. Малафеев А.В., Хламова А.В., Краснов М.И. Оптимизация загрузки генераторов собственных электростанций ОАО «ММК» с учетом потерь активной мощности в распределительной сети путем декомпозиции общей задачи // Главный энергетик. 2011. №3. С. 54 – 57.
7. Левит Г.Т. Режимные карты и оптимизация управления котельными установками //Электрические станции. 1998. № 5. С. 26-32.

8. Абдурашитов Ш.Р. Резервы повышения экономичности энергоблоков 300 МВт // Энергетик. 1974. №3. С. 6-7.
9. Блинов А.Я. Обеспечение комплексных мер по улучшению технико-экономических показателей электростанции // Энергетик. 1975. № 2. С. 6-8.
10. Виленский Ю.А. Повышение экономичности ТЭЦ // Энергетик. 1974. № 5. С. 10.
11. Голышев Л.В., Довготелес Г.А. Оптимизация режимов подачи пыли высокими концентрациями при сжигании угля АШ в котле ТПП-210А // Электрические станции. 2007. №3. С. 34-38.
12. Авдеев А.Ф. Экономное сжигание топлива - важнейшее условие эффективности энергетики // Энергетик. 1976. №6. С. 1-3.
13. Сушон С.П., Завалко А.Г. Перспективы повышения уровня использования ВЭР // Промышленная энергетика. 1983. № 4. С. 2-4.
14. Хламова А.В., Малафеев А.В., Копцев Л.А. Анализ оптимальных режимов работы турбогенераторов собственных электростанций ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» // Изв. вузов. Электромеханика. 2011. №4. С. 111-114.
15. Кочкина А.В. Применение метода динамического программирования для решения задач оптимального распределения активных мощностей между разнородными генерирующими источниками собственных электростанций предприятий черной металлургии // Наука и производство Урала. 2012. № 8. С. 204-209.
16. Анализ статической устойчивости синхронных генераторов / А.В. Малафеев, О.В. Газизова, Е.А. Гринчак, А.В. Кочкина // Главный энергетик. 2013. №7. С. 17 – 25.
17. Methods for Optimization of Power-System Operation Modes / N.A. Belyaev, N.V. Korovkin, O.V. Frolov, V.S. Chudnyi // Russian Electrical Engineering. 2013. no 2. pp. 74-80.
18. Frauendorfer K., Glavitsch H., Bacher R., Optimazation in Planning and Operation of Electric Power Systems, Lecture Notes of the SVOR/ASRO Tutorial Thun, Switzerland. 1992. 365 P.
19. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ «Программа для ЭВМ «Комплекс автоматизированного режимного анализа КАТРАН 7.0» RU 2013616847 / В.А. Игуменцев., А.В. Малафеев, О.В. Газизова, Ю.Н. Кондрашова, А.В. Кочкина, Е.А. Панова. №2013616847, Бюл. № 3.
20. Оптимизация установившихся режимов промышленных систем электроснабжения с разнородными генерирующими источниками при решении задач среднесрочного планирования / А.В. Малафеев, А.В. Кочкина, В.А. Игуменцев, Д.Е. Варганов, А.Д. Ковалев. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2013. 112 с.
21. Теплоэнергетика и теплотехника. Общие вопросы. Справочник / В.А. Григорьев, В.М. Зорин. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1987. 465 с.

INFORMATION IN ENGLISH

COST CALLCULATION OF WORKING STEAM IN TERMS OF INDUSTRIAL THERMAL POWER STATIONS

Varganov D.E., Varganova A.V.

The article is concerned with the issues of original procedure of working steam prime cost calculation of industrial thermal power station taking into account characteristics of cycle arrangement, heat and power load, boiler operation using coal-gas blend. This approach makes it possible to calculate the cost of 1 ton of working steam taking into consideration the primary energy source costs, salary budget and auxiliaries. Steam boiler parameter chart, cost parameters of energy sources and the power

station are used as bench-mark data. The obtained values of working steam prime cost are essential for developing technical and economical models of steam boilers and turbogenerators to provide internal optimization of heat and power energy consumption. Results implementation of optimization in terms of industrial power plant makes it possible to calculate the cost effective consumption of energy resources and to cut the total energy costs.

Keywords: power station, working steam, prime cost of steam, parameter chart, steam boiler, generating set, energy source, salary budget, coal, natural gas, electrical energy, thermal load, energy resources consumption.

REFERENCES

1. Sergeev P.A., Neshporenko E.G. *Uluchshenie proizvodnosti i snizhenie energoyemkosti domennogo proizvodstva chuguna* [Productivity Improvement and Reduction of Energy Consumption in Cast Iron Production in Blast Furnaces], Science and Production of the Ural, 2015, no 11, pp. 42-46.
2. The Russian Federation. Laws and Acts. *Ob energosberezhenii i o povyshenii energeticheskoi effektivnosti i o vnesenii izmeneniy v otdelnye zakonodatelnye akty rossiyskoi federatsii* [Energy-Savings, Energy Efficiency Improvement and Introduction of Amendments to Certain Legislative Acts of the Russian Federation], Moscow, 2001, 46 p.
3. Nikiforov G.V., Oleinikov V.K., Zaslavets B.I., Shemetov A.N. *Upravlenie energopotrebleniyem i energosberezhenie. Teoriya i praktika* [Load Management and Energy Saving. Theory and Practice], Magnitogorsk, 2013, 422 p.
4. Nikiforov G.V., Oleinikov V.K., Shemetov A.N. *Ob optimalnykh rezhimakh elektropotrebleniya v usloviyakh metallurgicheskogo proizvodstva* [Optimum Modes of Electricity Consumption in Conditions of Metallurgical Production], Electrical engineering. 2002, no.3, pp. 9-13.
5. Nikiforov G.V. *Energosberezhenie: kontseptsiya proizvoditelya energii i pozitsiya energoyemkogo partnyera i potrebitelya* [Energy-Saving: Power Generator Conception and Energy-Intensive Partner and Consumer Position], Power Engineer, 1999, no 8, pp. 5-6.
6. Malafeev A.V., Khlamova A.V., Krasnov M.I. *Optimizatsiya zagruzki generatorov sobstvennykh elektrostantsiy OAO "MMK" s uchyetom poter aktivnoy moschnosti v raspredelitel'noy seti putem dekompozitsii obschey zadachi* [Generator Optimal Loading of JSC "MMK" Power Station using Decomposition of General Problem Taking into Account Active-Power Losses in Power Network], Head power engineer, 2011, no.3, pp. 54 – 57.
7. Levit G.T. *Rezhimnye karty i optimizatsiya upravleniya kotelnymi ustanovkami* [Parameter Charts and Optimal Control of Boiler], Power Technology and Engineering, 1998. no.5, pp. 26-32.
8. Abdurashitov Sh.V. *Rezervy povysheniya ekonomichnosti energoblokov 300 MVt* [Power-Generating Unit 300 MW Efficiency Enhancement Potential], Power engineer, 1974, no.3. pp. 6-7.
9. Blinov A.Ia. *Obespechenie kompleksnykh mer po uluchsheniyu tekhniko-ekonomicheskikh pokazateley elektrostantsii* [Complex Measure to Improve Technical and Economic Indicator of Power Station], Power engineer, 1975. no.2, pp. 6-8.
10. Vilenskii Iu.A. *Povyshenie ekonomichnosti TETs* [Gain in Performance of TPP], Power engineer, 1974, no.5, p. 10.
11. Golyshev L.V., Dovgoteles G.A. *Optimizatsiya rezhimov podachi pyli vysokimi kotsentratsiyami pri szhiganii uglya Ash v kotle TPP-210A* [Fuel Inlet Massive Concentration Optimal Conditions under ASH Coal Combustion Using TPP-210A Boiler], Power Technology and Engineering, 2007, no.3, pp. 34-38.
12. Avdeev A.F. *Ekonomnoe szhiganie topliva – vazhneishee uslovie effektivnosti energetiki* [Economical Fuel Consumption as Critical Factor of Energy Efficiency], Power engineer, 1976, no.6, pp. 1-3.
13. Sushon S.P., Zavalko A.G. *Perspektivy povysheniya urovnya ispolzovaniya VER* [Possibilities of Utilization Level Increase of Secondary Energy Resources], Industrial Power Engineering, 1983, no.4, pp. 2-4.
14. Malafeev A.V., Khlamova A.V., Koptsev L.A. *Analiz optimalnykh rezhimov raboty turbogeneratorov sobstvennykh elektrostantsiy OAO "Magnitogorskiy metallurgicheskii kombinat"* [Optimal Conditions Analysis of Operation of Power Station Turbo - Generators of JSC "MMK"], Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Elektromekhanika, 2011, no.4, pp. 111-114.
15. Kochkina A.V. *Primenenie metoda dinamicheskogo programmirovaniya dlya resheniya zadach optimalnogo raspredeleniya aktivnykh moschnostey mezhdu raznorodnymi generiruyuschimi istochnikami sobstvennykh elektrostantsiy predpriyatiy chyernoy metallurgii* [Application of Dynamic Programming to Solve Problem of Optimum Distribution of Active Power between Heterogeneous Power Generation Sources of Ferrous Metallurgy Enterprises], Science and Production of the Ural, 2012, no.8, pp. 204-209.
16. Malafeev A.V., Gazizova O.V., Kochkina A.V., Grinchak E.A. *Analiz staticheskoi ustoychivosti sinkhronnykh generatorov* [Analysis of Static Stability of Synchronous Generators], Head Power Engineer, 2013, no.7, pp. 17 – 25.
17. Belyaev N.A., Korovkin N.V., Frolov O.V., Chudnyi V.S. *Methods for Optimization of Power-System Operation Modes*, Russian Electrical Engineering, 2013, no.2, pp. 74-80.
18. Frauendorfer K., Glavitsch H., Bacher R. *Optimization in Planning and Operation of Electric Power Systems*, Lecture Notes of the SVOR/ASRO Tutorial Thun, Switzerland, 1992, 365 p.
19. Igumenshhev V.A., Malafeev A.V., Gazizova O.V., Kondrashova Yu.N., Kochkina A.V., Panova E.A. *State Registration Certificate of Software Application "Software Application "KATRAN 7.0" RU 2013616847, №2013616847, Bul. no 3.*
20. Malafeev A.V., Kochkina A.V., Igumenshhev V.A., Varganov D.E., Kovalev A.D. *Optimizatsiya ustanovivshikhsya rezhimov promyshlennykh sistem elektrosnabzheniya s raznorodnymi generiruyuschimi istochnikami pri reshenii zadach srednesrochnogo planirovaniya* [Optimization of Steady- State Modes of Industrial Power Systems with Diverse Generating Sources to Solve Medium-Term Planning Tasks], Magnitogorsk, Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2013, 112 p.
21. Grigoriev V.A., Zorin V.M. *Teploenergetika i teplotekhnika. Obschie voprosy* [Thermal Engineering and Thermal Technology. Generic Issues.], reference book. Moscow, Energoatomizdat, 1987, 465 p.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТОИМОСТИ УСЛУГ ПО ПЕРЕДАЧЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ЧЕРЕЗ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СЕТИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ СТОРОННИМ ПОТРЕБИТЕЛЯМ С УЧЕТОМ ИХ ДОЛЕВЫХ ВКЛАДОВ

В данной статье подробно рассмотрены разработанные на кафедре ЭПП МГТУ им. Г.И. Носова метод определения долевого вклада в потери электроэнергии и метод определения стоимости потерь. Данные методы позволяют определить долевого вклада в потери электроэнергии каждого конкретного потребителя и стоимость этих потерь с учетом влияния каждого из источников электроэнергии. Применение для расчетов потерь электроэнергии данных методов позволяет рассчитывать со сторонними потребителями на основе научно обоснованных величин. Кроме того, разработанные алгоритмы позволяют потребителю на основе информации о собственной прогнозируемой нагрузке планировать затраты на покупную электроэнергию. С помощью вышеуказанных методов проводились расчеты для схемы ОАО «ММК» для сторонних потребителей. Доля нагрузочных потерь сторонних потребителей в условиях названного объекта составляет 22,13% от общей величины нагрузочных потерь.

Ключевые слова: потери электроэнергии, стоимость потерь электроэнергии, долевого вклад потребителя, модифицированный метод последовательного эквивалентирования, потребители электрической энергии, нагрузочные потери активной мощности.

ВВЕДЕНИЕ

Расчет и анализ потерь электроэнергии является одной из наиболее важных задач при управлении эксплуатационными режимами системы электроснабжения. Управление уровнем потерь в электрических сетях электроэнергии – сложная комплексная задача. В связи с развитием оптового рынка электроэнергии принято подразделять потери на технологические, коммерческие и небалансные. Наиболее полная классификация отчетных потерь с экономических позиций дается Ю.С. Железко в [1]. Для определения потерь электроэнергии традиционно используются различные методы расчета, подробно описанные в литературе.

Для снижения фактического уровня потерь электрической энергии до их экономически обоснованного и документально подтвержденного технологического уровня осуществляется нормирование потерь. Норматив потерь электрической энергии включается в тариф на передачу электрической энергии по электрическим сетям и, следовательно, оплачивается сторонними потребителями электрической энергии, подключенными к электрической сети рассматриваемого потребителя. Для правильной оценки стоимости услуг по передаче необходимо знать расчетный вклад каждого потребителя в суммарные потери электроэнергии [2]. Кроме того, одним из важнейших экономических показателей системы электроснабжения является стоимость потерь электроэнергии. Стоимость дополнительных потерь электроэнергии в сетях крупного градообразующего предприятия компенсируется за счет включения стоимости услуг по ее передаче в тарифы для сторонних потребителей предприятия. В настоящее время большинство предприятий имеют в своем составе собственные электростанции, а также покупают электроэнергию у различных энергоснабжающих организаций. Стоимость покупной электроэнергии и себестоимость электроэнергии, выработанной на собственных электростанциях, различна. Это значительно усложняет процедуру расчета с потребителями. Правильно оценить стоимость услуг по передаче электроэнергии

можно лишь, зная долю каждого потребителя в потерях активной мощности и в стоимости потерь.

Ряд печатных публикаций посвящен анализу потерь электроэнергии на основе зарегистрированных графиков нагрузки и эквивалентного сопротивления участка сети. В работе [3] описывается методика расчета интервалов неопределенности потерь электроэнергии, определяемых погрешностью исходных данных; методика ориентирована на оценку эффективности мероприятий по снижению потерь и выявление информации, подлежащей первоочередному уточнению. В [4] предлагается определение нормативов потерь в электрической сети на основе нормативов потерь в т.н. «модулях», повторяющихся частях сети. Подобный подход, предусматривающий использование ограниченного числа эквивалентных расчетных схем и времени наибольших потерь и ориентированный на сети напряжением до 10 кВ, рассмотрен в [5]. Как один из способов аппаратного определения потерь электроэнергии и их распределения между потребителями, в [6] рассматривается применение счетчиков потерь, первые конструкции которых появились еще в довоенные годы [7]. Использовать принцип функционально-стоимостного анализа технологического расхода электроэнергии с целью экономической адаптации электрической сети к изменяющимся потокам электроэнергии предлагают авторы статьи [8]. Некоторые вопросы расчета потерь по результатам телеизмерений и, при необходимости, псевдоизмерений с учетом наблюдаемости отдельных районов рассмотрены в [9] и [10]. В ряде работ потери электроэнергии рассматриваются как один из критериев оптимальности режима. Так, в [11] исследуется снижение потерь мощности и энергии за счет оперативной реконфигурации сети; в [12] потери мощности – как критерий оптимальной настройки устройств FACTS, обеспечивающих увеличение предельно допустимых перетоков. Вклад нагрузки отдельных потребителей в [13] оценивается применительно к таким параметрам режима электрической сети, как напряжения и потоки мощности и используется для решения задачи оценивания состояния.

Долевого вклад потребителя в потери в настоящее время оценивается в большинстве случаев по прибли-

женным и упрощенным методам, например по методу экспертных оценок или пропорционально потребляемой мощности без учета точки подключения [2]. Применение таких методов приводит к погрешностям и неточностям расчета потерь и, следовательно, к конфликтам при взаиморасчетах с потребителями. Поэтому разработка метода, который учитывал бы долевого вклад в потери электроэнергии каждого потребителя, является актуальной задачей на сегодняшний день.

В рамках решения этой проблемы на кафедре ЭПП МГТУ им. Г.И. Носова разработаны метод определения долевого вклада в потери электроэнергии и метод определения стоимости потерь. В качестве исходных данных используются результаты расчета установившегося режима. Расчет установившегося режима ведется модифицированным методом последовательного эквивалентирования [14], который учитывает всю специфику сложносвязанных промышленных электрических сетей. Данный метод реализован с помощью приемов объектно-ориентированного программирования в интегрированной среде разработки Borland C++ Builder.

АЛГОРИТМ РАСЧЕТА РЕЖИМОВ СИСТЕМ МОДИФИЦИРОВАННЫМ МЕТОДОМ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ЭКВИВАЛЕНТИРОВАНИЯ

В алгоритме используется многолучевая схема замещения с одной поперечной ветвью, при эквивалентировании воспринимаемой как внутренние проводимости и ЭДС. Связи элемента с другими элементами являются полноправными элементами схемы замещения. На прямом ходе решения задачи (свертывание схемы) для каждого элемента схемы вызывается функция исключения единичного узла (элемента). Данный метод применяется для схем любой сложности и конфигурации, при этом прямой ход расчета никак не связан с иерархией элементов схемы и не требует специального порядка нумерации, элементы нумеруются в том же порядке, в каком они вводились в исходную схему. Прямой ход расчета заканчивается определением эквивалентных ЭДС и проводимостей на шинах n -го элемента, причем это может быть любой элемент схемы.

Обратный ход расчета (развертывание схемы) организуется в соответствии с тем же принципом, что и прямой ход, и заключается в выделении на каждом шаге из эквивалентной схемы очередного элемента. Наиболее полно модифицированный метод последовательного эквивалентирования рассмотрен в [3].

Разработанный метод определения долевого вклада в потери мощности основан на учете вклада рассматриваемого потребителя в поток мощности через каждый элемент (рис. 1). В свою очередь, долевого вклада в потери каждого элемента, через который проходит поток от данного потребителя, определяется модулем соотношения полной мощности потребителя с учетом потерь на участке от потребителя до текущего элемента к полной мощности, протекающей по элементу. В схеме на рис. 1 поперечные ветви схем замещения элементов не показаны.

Долевой вклад потребителя m в суммарные нагрузочные потери в электрической сети

$$D_m = \sum_{i=1}^N d_{im}. \quad (1)$$

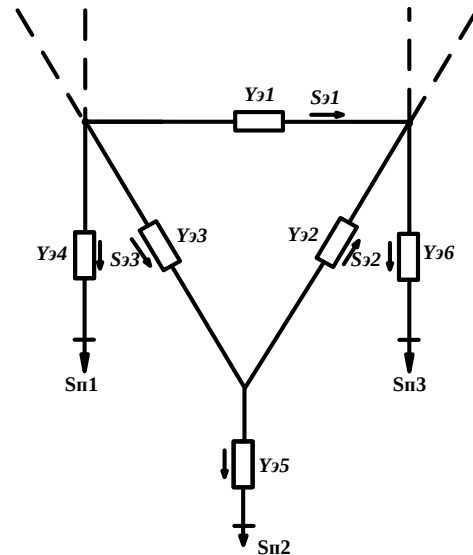


Рис. 1. Расчетная схема участка сети для определения долевого вклада в потери мощности

Долевой вклад потребителя m в потери, создаваемые в элементе i :

$$d_{\Delta,im} = \left| \frac{\sum \Delta \dot{S}_{\Delta i} + \dot{S}_{n,m}}{\dot{S}_{\Delta i}} \right| \cdot \Delta P_i, \quad (2)$$

где i – порядковый номер элемента; m – порядковый номер потребителя; N – количество элементов схемы; $S_{\Delta i}$ – полная мощность, передаваемая через элемент i ; $\Delta S_{\Delta i}$ – потери полной мощности в элементе i ; $S_{n,m}$ – нагрузка потребителя с номером m ; ΔP_i – суммарные нагрузочные потери в элементе i , создаваемые всеми потребителями.

Вклад в потери элемента №3 потребителя №2 (см. рис. 1):

$$d_{3,2} = \left| \frac{\sum \Delta \dot{S}_{\Delta 3} + \dot{S}_{n2}}{\dot{S}_{\Delta 3}} \right| \cdot \Delta P_{\Delta 3}.$$

На рис. 1 $\dot{S}_{n1}$, $\dot{S}_{n2}$, $\dot{S}_{n3}$ – нагрузка потребителей, $\dot{Y}_1 - \dot{Y}_6$ – проводимости системы электроснабжения. Расчет ведется для каждого из электрически несвязанных участков сети с перебором всех нагрузочных элементов. Расчет для каждого из потребителей реализован в виде рекурсивной функции, которая просматривает все связи текущего элемента. Для каждого элемента определяется поток мощности по связи с другим элементом. В случае, если поток направлен встречно направлению обхода схемы, определяется вклад по (1), после чего устанавливается соответствующий флаг. Это нужно для того, чтобы учесть уже пройденные элементы сети. При этом выполняется суммирование вкладов во все элементы сети для каждого из потребителей. Для каждой из связей рассматриваемого элемента выполняется повторный вызов рекурсивной функции. После прохода схемы до источника питания все установленные флаги сбрасываются. Далее расчет повторяется для следующего потребителя, принадлежащего данной схеме. Вклад в поток мощности и потери

для элемента №3 обусловлен потребителями П2 и П3.

Данная методика позволяет определять потери активной мощности с учетом вклада каждого отдельного потребителя в активные потери всей рассчитываемой схемы на основе параметров установившегося режима и не зависит от иерархии элемента в системе электрообеспечения. На основе разработанной методики был написан программный модуль, включенный в программный комплекс автоматизированного режимного анализа КАТРАН 6.0, разработанный на кафедре ЭПП МГТУ (свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2012612069).

АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТОИМОСТИ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

В качестве исходных данных используются результаты расчета установившегося режима, на основе которых определяются затраты на передачу электроэнергии для каждого элемента схемы сети, после чего эти величины суммируются. Дополнительными данными для расчета величины стоимости потерь является величина стоимости электроэнергии для ее источников (коп./кВт·ч). Функция определения стоимости вызывается для всех элементов, кроме источников электроэнергии и выключателей. Для связи текущего элемента определяется ток связи

$$i_{ij} = (\dot{U}_{\text{вн}} - \dot{U}_j K_{\text{тр}j}) \dot{Y}_j, \quad (4)$$

где i – текущий элемент схемы; j – связь текущего элемента с другим элементом.

При этом определяется знак величины. Если ток направлен по связи к текущему элементу, то определяется комплексный поток мощности по этой связи. Затем потоки мощности для всех элементов схемы суммируются.

$$\dot{S}_{ij} = I_{ij} \dot{U}_j; \quad (5)$$

$$\dot{S}_{\Sigma i} = \sum_{j=1}^K \dot{S}_{ij}. \quad (6)$$

где i – текущий элемент схемы; j – связь текущего элемента с другим элементом; K – количество учитываемых связей.

Стоимость для текущего элемента схемы (на рис. 2 – проводимость Y_1) определяется по активной составляющей потока мощности с помощью рекурсивной функции пропорционально потокам от каждого предыдущего элемента, с которым у текущего элемента есть связь (поперечные проводимости Y_2, Y_3, Y_4 на рис. 2):

$$C_{\Sigma i} = \frac{\sum_{j=1}^K \text{Re } \dot{S}_{ij} C_{ij}}{\text{Re } \dot{S}_{\Sigma i}}, \quad (7)$$

Здесь C_{ij} – стоимость потерь электроэнергии.

Затем стоимости для каждого потребителя суммируются

$$C_{\Sigma \Delta P_{\text{нагр}}} = \sum_{i=1}^N C_{\Sigma i} \cdot \Delta P_i, \quad (8)$$

где N – количество элементов.

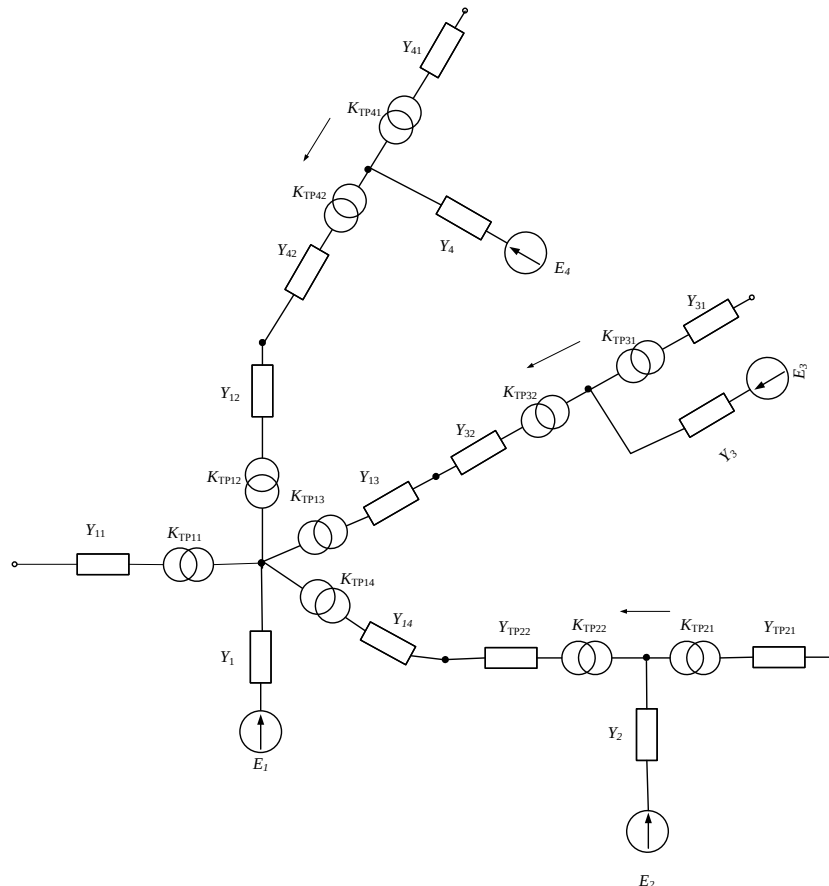


Рис. 2. Схема замещения участка сети

Расчет стоимости повторяется для следующего элемента сети, источником для которого является только что пройденный элемент. Расчет ведется для каждого из несвязанных участков сети и может начинаться с любого из элементов-источников электроэнергии. За источник электроэнергии для начала расчета берется синхронный генератор или узел связи с энергосистемой. Общая стоимость потерь электроэнергии определяется суммированием стоимостей потерь по каждому элементу.

С помощью вышеуказанных методов и разработанного программного обеспечения проводились расчеты для схемы Магнитогорского энергетического узла (МЭУ). При годовом максимуме нагрузки МЭУ около 1500 МВт нагрузочные потери активной мощности в сетях 10 кВ и выше составляют 20,2 МВт. Из них нагрузочные потери сторонних потребителей 4,47 МВт, что в процентном соотношении составляет 22,13% от общей доли нагрузочных потерь. Основными сторонними потребителями МЭУ являются:

- на напряжении 110 кВ – ОАО «ММК-Метиз», МП «Горэлектросеть», потребители юга Челябинской области и Башкирии;
- на напряжение 35 кВ – МП «Горэлектросеть», МП «Магнитострой»;
- на напряжение 10 кВ – МП «Горэлектросеть», ЗАО «Механоремонтный комплекс», Водоканал, ЗАО «Огнеупор», ЗАО «Профит», МП «Магнитострой».

Наибольшая доля потерь у потребителей на напряжение 110 кВ ОАО «ММК-Метиз», МП «Горэлектросеть» (величина этих потерь соответственно 0,08 и 0,324 МВт). Суммарные нагрузочные потери сторонних потребителей по уровням напряжения составляют 0,97 МВт – на напряжение 110 кВ; 0,11 МВт – на напряжение 35 кВ; 3,34 МВт – на напряжение 10 кВ.

Расчитанные таким образом величины потерь и их стоимости являются основой для определения стоимости услуг по передаче электроэнергии, являющейся составной частью тарифа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Совместное применение для расчетов со стороны потребителя определения долевого вклада и алгоритма определения стоимости потерь позволяет осуществлять расчет на основе научно обоснованных величин, избегая упрощенных методик.

Разработанные алгоритмы позволяют потребителю на основе информации о собственной прогнозируемой нагрузке наиболее корректно планировать затраты на покупку электроэнергии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Железко Ю.С., Артемьев А.В., Савченко О.В. Расчет, анализ и нормирование потерь электроэнергии в электрических сетях: Руководство для практических расчетов. М.: НЦ ЭНАС, 2004. 280 с.
2. Инструкция по организации в Министерстве энергетики Российской Федерации работы по расчету и обоснованию нормативов технологических потерь электроэнергии при ее передаче по электрическим сетям. Введена приказом Минэнерго РФ №326 от 30.12.2008. М., 2008.
3. Расчеты на ЭВМ интервалов неопределенности расхода электроэнергии на ее транспорт в разомкнутых сетях 6–110 кВ / Ю.С. Железко, В.Э. Воротницкий, Р.П. Бирюкова, О.К. Хавкина // Электрические станции. 1983. №5. С. 39-42.
4. Свешников В.И. Нормирование и анализ потерь мощности и энергии в электрических сетях энергосистемы // Электрические станции. 1974. №2. С. 67-70.
5. Щербаков А.М. Расчет технических потерь электроэнергии в сельских электрических сетях 10 и 0,4 кВ // Энергетик. 1980. №3. С. 3-4.
6. Рыклин Ф.Г., Татаринцев А.Г. Об учете и распределении потерь электроэнергии в магистральных линиях и узлах нагрузки при помощи счетчиков потерь // Электрические станции. 1971. №8. С. 38-40.
7. Коллегин А.В. К вопросу об измерении потерь в сетях // Электрические станции. 1939. №6. С. 51.
8. Опыт нормирования технологического расхода электроэнергии в электрических сетях / Н.М. Сыч, Н.П. Кеда, Т.М. Ташпулатов, М.А. Усманова, Л.А. Евдокимов // Энергетик. 1991. №3. С. 23-24.
9. Расчет потерь мощности и электроэнергии в электрических сетях в темпе процесса / В.А. Петров, В.Н. Тарасов, Е.И. Борисов, М.Г. Мазур // Энергетик. 1986. №5. С.13.
10. Курсков В.И., Мерпорт Э.И. Об оперативном расчете режима и потерь электроэнергии в электрических сетях при недостатке телеизмерений // Энергетик. 1985. №8. С. 10-11.
11. Napis N.F., Sulaima M.F., Arif R.M., Yusof R.A., Kadir A.F.A., Baharom M.F. A power distribution network restoration via feeder reconfiguration by using EPSO for losses reduction // Journal of Theoretical and Applied Information Technology. 2015. vol. 79. No. 2. pp. 346-350.
12. Rajabi-Ghahnavieh A., Fotuhi-Firuzabad M., Othman M. Optimal unified power flow controller application to enhance total transfer capability // IET Gener. Transm. Distrib. 2015. vol. 9. iss. 4. pp. 358-368.
13. Wedeward K., Adkins C., Schaffer S., Smith M., Patel A. Inventory of load models in electric power systems via parameter estimation // Engineering Letters. 2015. vol. 23. iss. 1. p. 20-28.
14. Модифицированный метод последовательного эквивалентирования для расчета режимов сложных систем электроснабжения / В.А. Игуменцев, Б.И. Заславец, А.В. Малафеев, О.В. Буланова, Ю.Н. Ротанова // Промышленная энергетика. 2008. №6. С.16-22.

INFORMATION IN ENGLISH

DEFINITION OF COST OF SERVICES IN ELECTRIC POWER TRANSFER THROUGH ELECTRIC NETWORKS OF INDUSTRIAL ENTERPRISES TO EXTERNAL CONSUMERS TAKING INTO ACCOUNT THEIR SHARE CONTRIBUTIONS

Malafeev A.V., Yagolnikova E.B., Savinova G.Yu., Olennikova T.B., Altukhova M.A.

The article is concerned with methods of definition of losses, such as the method of definition of the share contribution to losses of electric power and the method of definition of cost of losses, which were developed by the Industrial Electric Power

Supply Department of Nosov Magnitogorsk State Technical University. These methods make it possible to define the share contribution to losses of electric power of each particular consumer and cost of these losses. Application of these

calculations of losses of electric power using the given methods allows the companies to settle accounts with external consumers on the basis of scientifically founded values. Besides, the developed algorithms allow the consumer to plan expenses for the purchased electric power on the basis of the information on the predicted load. The methods mentioned above were used to carry out calculations with the external customers of the OJSC "Magnitogorsk Iron and Steel Works". The share of load losses of external consumers was 22.13% of the total value of load losses.

Keywords: electric power losses, cost of losses of the electric power, share contribution of the consumer to electric power losses, modified method of sequential reduction, consumers of electric energy, load losses of active power.

REFERENCES

1. Zhelezko Yu.S., Artemyev A.V., Savchenko O.V. *Raschet, analiz i normirovanie poter elektroenergii v elektricheskikh setyakh* [Calculation, Analysis and Rating of Electric Power Losses in Electric Networks], textbook for practical calculations, Moscow, "NTs ENAS publishing house", 2004, 280 p.
2. Instruction on the organization in the Ministry of Energy of the Russian Federation of work on calculation and justification of standards of technological losses of the electric power by its transfer through electric networks. Came into effect by the order of the Ministry of Energy of the Russian Federation No. 326 on 30.12.2008, Moscow, 2008.
3. Zhelezko Yu.S., Vorotnitskiy V.E., Biryukova R.P., Khavkina O.K. *Rastsety na EVM intervalov neopredelyennosti raskhoda elektroenergii na eye transport v razomknytykh setyakh 6-110 kV* [Computer Calculations of Intervals of Uncertainty for Electric Power Consumption during its Transfer through 6-110 kV Open-loop networks], Power stations, 1983, no.5, pp. 39-42.
4. Sveshnikov V.I. *Normirovanie i analiz poter moschnosti i energii v elektricheskikh setyakh energosistemy* [Rating and Analysis of Power and energy Losses in Electric Power Networks of Power Grid], Power stations, 1974, no.2, pp. 67-70.
5. Scherbakov A.M. *Raschet tekhnicheskikh poter elektronergii v selskikh elektricheskikh setyakh 10 i 0.4 kV* [Calculation of Technical Losses of Electric Energy in Rural 10 and 0.4 kV Electric Power Lines], Power engineer, 1980, no.3, pp. 3-4.
6. Ryklin F.G., Tatarintsev A.G. *Ob uchete i raspredelenii poter elektroenergii v magistralnykh liniyakh i uzlakh nagruzki pri pomoschi schetchikov poter* [Accounting and Distribution of Electric Energy Losses in Backbone Power Lines and Load Centers by Means of Loss Meters], Power stations, 1971, no.8, pp. 38-40.
7. Kollegin A.V. *K voprosu ob izmerenii poter v setyakh* [Measuring of Losses in Networks], Power stations, 1939, no.6, pp. 51.
8. Sych N.M., Keda N.P., Tashpulatov T.M., Usmanova M.A., Evdokimov L.A. *Opyt normirovaniya tekhnologicheskogo raskhoda elektroenergii v elektricheskikh setyakh* [Practical Experience of Technological Consumption Rating of Electric Energy in Electrical Networks], Power engineer, 1991, no.3, pp. 23-24.
9. Petrov V.A., Tarasov V.N., Borisov E.I., Mazur M.G. *Raschet poter moschnosti i elektroenergii v elektricheskikh setyakh v tempe protsessa* [On-line Calculation of Power and Electric Energy Losses in Electrical Networks], Power engineer, 1986, no.5, pp. 13.
10. Kurskov V.I., Merport E.I. *Ob operativnom raschete rezhima i poter elektroenergii v elektricheskikh setyakh pri nedostatke telezmereniy* [On-line Computation of Conditions and Losses of electric Energy in Electrical Networks in Case of Remote Measurement Failure], Power engineer, 1985, no.8, pp. 10-11.
11. Napis N.F., Sulaima M.F., Arif R.M., Yusof R.A., Kadir A.F.A., Baharom M.F. A power distribution network restoration via feeder reconfiguration by using EPSO for losses reduction, Journal of Theoretical and Applied Information Technology, 2015, vol. 79, no.2, pp. 346-350.
12. Rajabi-Ghahnavieh A., Fotuhi-Firuzabad M., Othman M. Optimal unified power flow controller application to enhance total transfer capability, IET Gener. Transm. Distrib, 2015, vol. 9, iss. 4, pp. 358-368.
13. Wedeward K., Adkins C., Schaffer S., Smith M., Patel A. Inventory of load models in electric power systems via parameter estimation, Engineering Letters, 2015, vol. 23, iss. 1, p. 20-28.
14. Igumenshchev V.A., Zaslavets B. I., Malafeev A.V., Bulanov O.V., Rotanova Yu.N. *Modifitsirovannii metod posledovatel'nogo ekvivalentirovaniya dlya rascheta rezhimov slozhnykh system electrosnabzheniya* [The modified method of a consecutive reduction for calculation of the modes of difficult systems of power supply], Industrial power engineering, 2008, no. 6, pp. 16-22.

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ СРАВНЕНИЕ КОМПЕНСИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ДУГОВЫХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ ШИРОКОГО КЛАССА МОЩНОСТИ

Объектом исследования являются компенсирующие устройства для дуговых сталеплавильных печей (ДСП). Предложена формула для определения мощности конденсаторной батареи в составе фильтров. В качестве примера рассчитана необходимая мощность компенсирующего устройства для комплекса ДСП-10 и агрегата ковш-печь (АКП) сталелитейного завода. Рассмотрены основные виды компенсирующих устройств для дуговых сталеплавильных печей. Рассчитаны потери активной мощности в элементах конденсаторов и дана оценка эксплуатационных затрат.

Ключевые слова: дуговая сталеплавильная печь, компенсация реактивной мощности, фильтрокомпенсирующие устройства, статический тиристорный компенсатор, потери мощности.

ВВЕДЕНИЕ

Электрометаллургический процесс получения жидкой стали в дуговых сталеплавильных печах (ДСП) является наиболее перспективным и продуктивным. В настоящее время в ДСП выплавляется от 30 до 50% общего производства стали. В этом производстве участвуют как сверхмощные агрегаты, у которых мощность печного трансформатора достигает 200-300 МВА, так и малые ДСП литейных цехов с мощностью 5-10 МВА.

Дуговая сталеплавильная печь, как приемник с нелинейной характеристикой, оказывает негативное влияние на качество электрической энергии питающей сети из-за резкопеременного режима работы и значительного потребления реактивной мощности, что является причиной заметных искажений напряжения по форме и величине от заданных (нормируемых) значений. Нарушение электромагнитной совместимости ухудшает технико-экономические показатели как самой печи, так и смежных потребителей в точке общего подключения.

Одним из эффективных решений проблемы является установка дополнительных компенсирующих устройств.

Отметим, что до настоящего времени в русскоязычной технической литературе не утвердилось устойчивой аббревиатуры различных конструкций и схемных решений компенсирующих устройств (КУ). Наряду с их общим обозначением первые разработки регулируемых КУ, проводимые в Московском энергетическом институте под руководством Веникова В.А., получили название ИРМ – источник реактивной мощности [1].

Рассмотрим несколько современных типов компенсирующих устройств для ДСП различной мощности, которые наиболее часто используются в системах электроснабжения металлургических предприятий (рис. 1).

1. Силовые резонансные фильтры или фильтрокомпенсирующие цепи (ФКЦ) представляют собой особый тип конденсаторных установок, задачей которых является фильтрация гармоник совместно с компенсацией реактивной мощности. Состоят из нескольких фильтров высших гармоник, которые могут быть различной конфигурации: узкополосные, широкополосные, режекторные и т.д. Достоинством является

относительно низкая стоимость, простота установки и обслуживания. К недостаткам относится невозможность регулирования реактивной мощности, а значит, и напряжения, и симметрирования нагрузки, что особенно проявляется в сетях с низкой мощностью короткого замыкания.

Включение конденсаторов в составе фильтров технически и экономически оправдано для ДСП малой мощности. При этом установленная мощность конденсаторов выбирается из условия, чтобы при неработающей печи напряжение на высокой стороне печного трансформатора не превышало предельного значения $1,05U_{ном}$. Следует также учитывать повышение напряжения на конденсаторной батарее основной частоты $U_{КБ}/U_{(1)}=K_{пн(1)}$. Так, для фильтра второй гармоники $v=2$ оно составит

$$K_{пн(1)} = \frac{v^2}{v^2 - 1} = 1,33,$$

$$Q_{(1)} = K_{пн} \cdot U^2 \cdot \omega \cdot C = K_{пн} \cdot Q_{КБ},$$

$$\Delta U = \frac{Q_{(1)}}{S_{КЗ}} \cdot 100 \leq 5\%,$$

$$Q_{КБ} \leq \frac{5 \cdot S_{КЗ}}{100 \cdot K_{пн}} = \frac{0,05 \cdot S_{КЗ}}{1,33},$$

$$Q_{КБ} \leq 3,75 \cdot 10^{-2} \cdot S_{КЗ},$$

где $S_{КЗ}$ – мощность КЗ в точке подключения печного трансформатора.

В качестве примера рассчитаем необходимую мощность конденсаторов в составе фильтра второй гармоники для комплекса ДСП-10 и АКП сталелитейного завода ЗАО «Конар» г. Челябинск, где мощность КЗ составляет 173,4 МВА.

$$Q_{КБ} \leq 3,75 \cdot 10^{-2} \cdot 173,4 = 6,5 \text{ МВАр.}$$

Для сравнения, мощность ФКЦ, рассчитанная по методике Николаева А.А. [4], составила 6,3 МВАр. Расчет показал, что при установке ФКЦ 6,3 МВАр среднее напряжение на шинах 10 кВ в точке подключения ДСП повышается на 0,28 кВ (с 10,14 до 10,42 кВ, рис. 2), а мощность печи увеличивается за цикл плавки на 1,41 МВт.

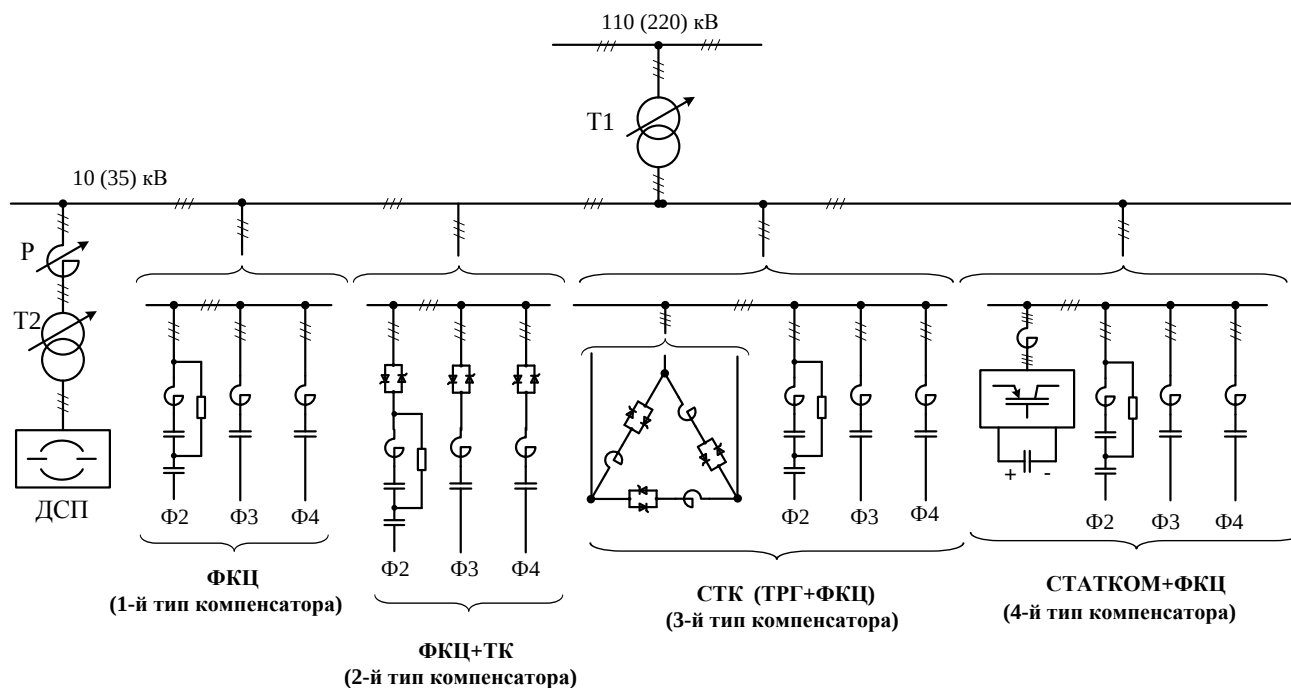


Рис. 1. Однолинейные схемы компенсирующих устройств

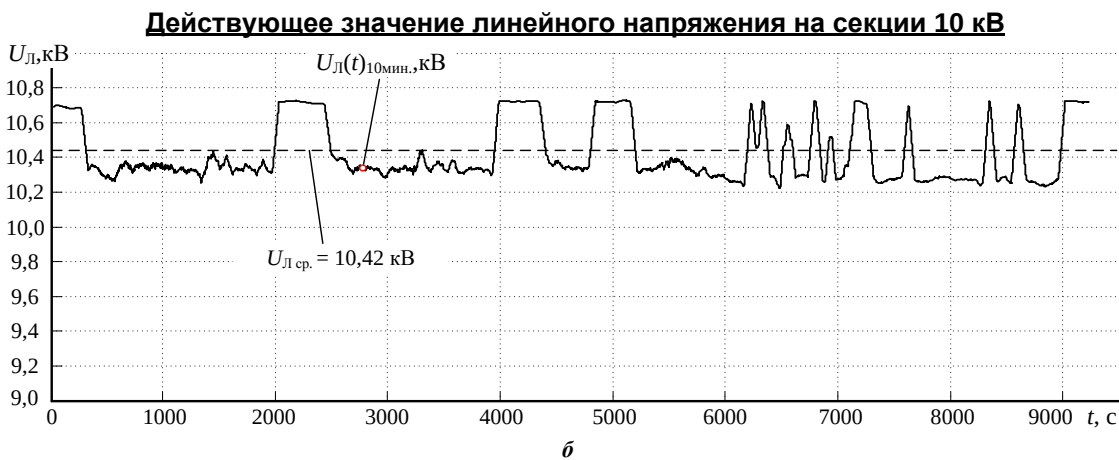
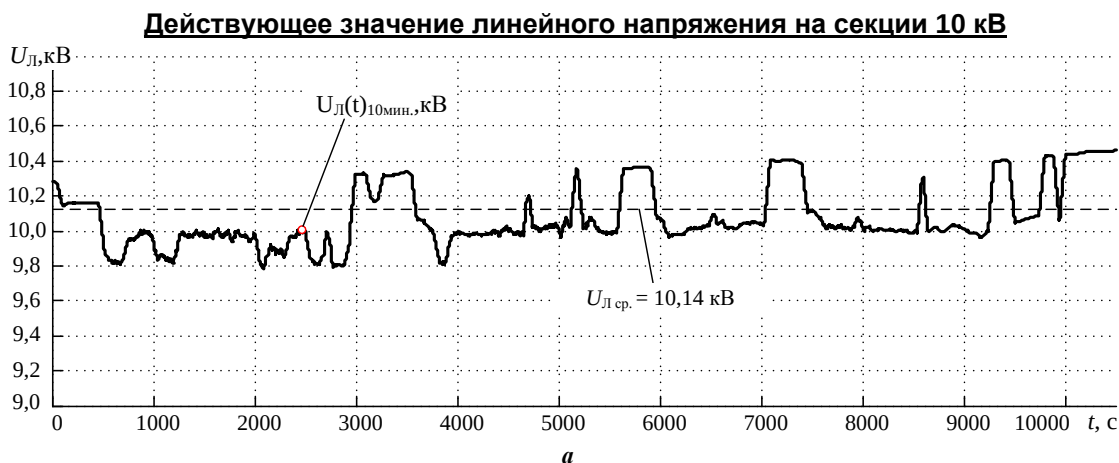


Рис. 2. Графики изменения действующего значения линейного напряжения при работе ДСП-10 без ФКЦ (а), при использовании ФКЦ 6,3 МВАр (б)

2. Конденсаторная батарея, управляемая тиристорами TSC (Thyristor Switched Capacitor). В русскоязычной технической литературе не утвердилась устойчивая аббревиатура данного компенсирующего устройства, поэтому для удобства обозначим его как ФКЦ + ТК (фильтрокомпенсирующие цепи + тиристорный ключ). Тиристорный ключ необходим для бестоковой коммутации конденсаторной батареи, т.к. его включение происходит в момент перехода напряжения через ноль.

Основными достоинствами ФКЦ+ТК являются сравнительно малая масса установки с конденсаторами, а в связи с этим отсутствие необходимости в фундаменте; более простая и дешевая эксплуатация по сравнению с другими установками; отсутствие генерации высших гармоник, высокое быстродействие. Кроме того, выход из строя отдельного конденсатора, при надлежащей его защите, не отражается обычно на работе всей конденсаторной установки. К недостаткам относится невозможность плавного регулирования.

3. Статический тиристорный компенсатор (СТК) – компенсирующее устройство косвенного типа, является основным видом компенсаторов в системах электроснабжения мощных и сверхмощных дуговых сталеплавильных и шахтных печей, а также дуговых печей средней мощности, которые подключены к слабым сетям и (или) имеют на общих шинах чувствительных потребителей электроэнергии, например жилой массив.

СТК состоит из набора фильтрокомпенсирующих цепей и тиристорно-реакторной группы ТГР (TCR - Thyristor Controlled Reactor), благодаря которой данный тип компенсатора способен осуществлять симметрирование нагрузки, эффективно подавлять фликер за счет быстродействующей компенсации реактивной мощности и поддерживать напряжение в точке подключения на заданном уровне. Достоинством СТК является: высокое быстродействие; регулируемая компенсация реактивной мощности; поддержание напряжения на печном трансформаторе на номинальном уровне, что обеспечивает заданную производительность дуговой печи. К недостаткам относится двойная установленная мощность элементов СТК, большие габариты и генерация высших гармоник при работе ТГР.

4. Статический синхронный компенсатор STATCOM (STATic synchronous COMpensator) имеет в своем составе преобразователь напряжения на IGBT-транзисторах и фильтрокомпенсирующие цепи. Из-за высокой стоимости оборудования в настоящее время СТАТКОМ является практически неконкурентоспособным для промышленных предприятий, поэтому к дальнейшему рассмотрению он не принимается [2].

МЕТОДИКА ПРОВОДИМЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Экономическая оценка компенсирующих устройств осуществляется на основе расчета приведенных затрат [6]:

$$Z = p_n \cdot K + C,$$

где p_n – нормативный коэффициент экономической эффективности; K, C – капитальные вложения и эксплуатационные затраты.

В статье приводятся результаты технико-экономических расчетов для трех вариантов КУ – ФКЦ, ФКЦ + ТК и СТК. При этом приняты следующие допущения:

1. Напряжение узла нагрузки, где компенсируется реактивная мощность, равно 10 кВ при генерируемой реактивной мощности до 10 МВАр, и 35 кВ – при Q выше 10 МВАр.
2. Сравнимые варианты обеспечивают изменение реактивной мощности от нуля до Q .
3. Мощность КУ первого варианта ограничена в диапазоне 1–10 МВАр, для второго – 1–100 МВАр, для третьего – 1–200 МВАр.
4. В схемах используются фильтры 2-й (широкополосный), 3-й и 4-й (узкополосные) гармоник.
5. В проводимых исследованиях суммарная мощность ФКУ между резонансными фильтрами распределена равномерно: $Q_{\Phi 2} = Q_{\Phi 3} = Q_{\Phi 4} = 0,333 \cdot Q_{\text{ФКУ}}$, т.к. вопрос рационального распределения мощности между отдельными фильтрами заслуживает специального рассмотрения.

Ввиду того, что стоимость отдельных элементов компенсирующих устройств является закрытой, их сравнение проводится по эксплуатационным затратам, которые учитывают потери в самих КУ, а также элементах сети:

$$C = b \cdot \Delta W.$$

Для первого варианта при расчете эксплуатационных затрат учитываются потери активной мощности в конденсаторах $\Delta P_{\text{кб}}$ и реакторах $\Delta P_{\text{р}}$.

$$\Delta P_{\text{кб}} = \Delta p_{\text{кб уд.}} \cdot Q_{\text{кб уст.}};$$

$$\Delta P_{\text{р}} = 3 \cdot I_{\text{р}}^2 \cdot R_{\text{р}},$$

где $\Delta p_{\text{кб уд.}}$ – удельные потери мощности ($\Delta p_{\text{кб уд.}} = 0,0045$ кВт/кВАр); $I_{\text{р}}$ – ток в цепи реактора.

Потери электроэнергии определялись по формуле [5]

$$\Delta W = \Delta P_{\Sigma} \cdot t_{\text{р}} + Q \cdot k_{\text{пп}} \cdot (1 - k_{\text{в}}) \cdot t_{\text{ц}},$$

где ΔP_{Σ} – суммарные потери мощности; $k_{\text{пп}}$ – коэффициент изменения потерь; $k_{\text{в}}$ – коэффициент включения (принимается 0,7); $t_{\text{ц}}$ – время цикла ДСП (принимается 7000 ч).

Коэффициент изменения потерь учитывает потери электроэнергии в сети от перетока реактивной мощности, рассчитывается только для первого варианта КУ, т.к. во втором и третьем обеспечивается условие $Q_{\Sigma} = Q_{\text{КУ}} + Q_{\text{ДСП}} \rightarrow 0$.

Для второго варианта учитываются потери активной мощности в конденсаторах $\Delta P_{\text{кб}}$, реакторах $\Delta P_{\text{р}}$ и тиристорах $\Delta P_{\text{тир}}$ [3].

$$\begin{aligned} \Delta P_{\text{тир}} &= N_{\text{тир}} \left(I_{\text{тир}} \cdot \Delta U_{\text{тир}} + I_{\text{тир}}^2 \cdot R_{\text{тир}} \right) = \\ &= N_{\text{тир}} \left(\frac{\sqrt{2}}{\pi} I_{\text{р(к)}} \cdot \Delta U_{\text{тир}} + I_{\text{р(к)}}^2 \cdot R_{\text{тир}} \right), \end{aligned}$$

где $N_{\text{тир}}$ – общее число тиристоров в схеме; $I_{\text{тир}}$, $I_{\text{тир.ср}}$ – действующее и среднее значение тока тиристора;

$I_{p(k)}$ – ток в цепи реактора или конденсатора; $\Delta U_{\text{тир}}$ – пороговое значение напряжения; $R_{\text{тир}}$ – внутреннее сопротивление тиристора.

Количество тиристорov рассчитывается по формуле

$$N_{\text{тир}} = 6 \cdot n_{\text{послед}} \cdot n_{\text{парал}},$$

где $n_{\text{послед}}$, $n_{\text{парал}}$ – количество тиристорov, включенных последовательно и параллельно.

$$n_{\text{послед}} = \frac{2\sqrt{2} \cdot U_{\text{л}}}{U_{\text{обр}}},$$

$$n_{\text{парал}} = \frac{0,45 \cdot Q_{\phi}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{л}} \cdot I_{\text{ср}}},$$

где $U_{\text{обр}}$, $I_{\text{ср}}$ – обратное напряжение и средний ток тиристора.

Потери электроэнергии

$$\Delta W = \Delta P_{\Sigma} \cdot t_{\text{ц}} \cdot k_{\text{в}}.$$

Для третьего варианта КУ учитываются потери активной мощности в конденсаторах $\Delta P_{\text{кб}}$, реакторах $\Delta P_{\text{р}}$, тиристорах $\Delta P_{\text{тир}}$ и реакторах ТРГ $\Delta P_{\text{ТРГ}}$.

$$\Delta P_{\text{рТРГ}} = I_{\text{р}}^2 \cdot \frac{X_{\text{р}}}{q},$$

где $I_{\text{р}}$, $X_{\text{р}}$, q – ток, индуктивное сопротивление и добротность реактора.

Потери электроэнергии

$$\Delta W = \Delta P_{\text{ФКЦ}} \cdot t_{\text{ц}} + \Delta P_{\text{рТРГ}} \cdot (1 - k_{\text{в}}) \cdot t_{\text{ц}}.$$

Для сравнения эксплуатационных затрат по трем рассмотренным вариантам получены зависимости $C = f(Q_{\text{КУ}})$.

Для большей наглядности на **рис. 3** и **4** представлены два графика: при $Q_{\text{КУ}} = 1-10$ МВАр и $Q_{\text{КУ}} = 1-200$ МВАр.

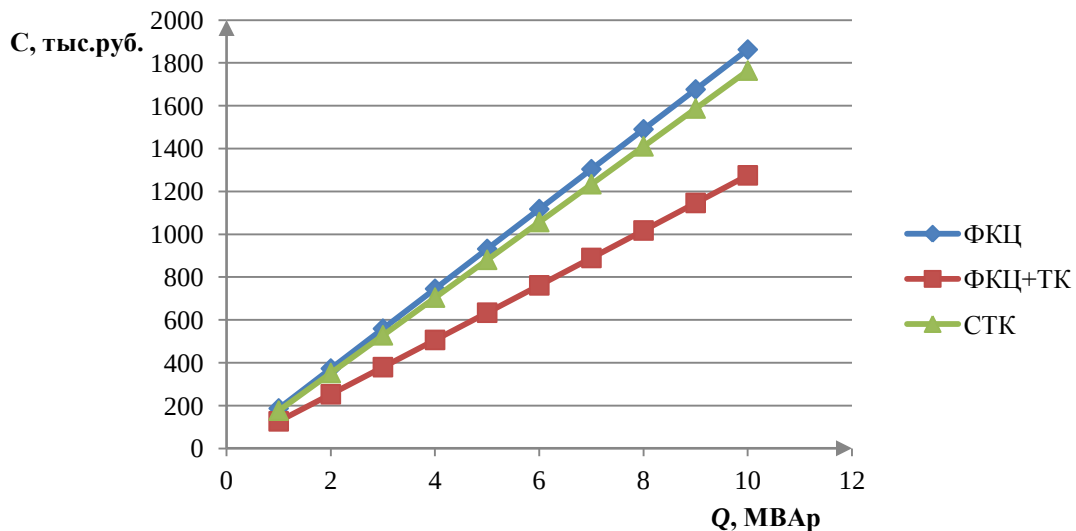


Рис. 3. График зависимости эксплуатационных затрат КУ от генерируемой мощности ($Q_{\text{КУ}} = 1-10$ МВАр)

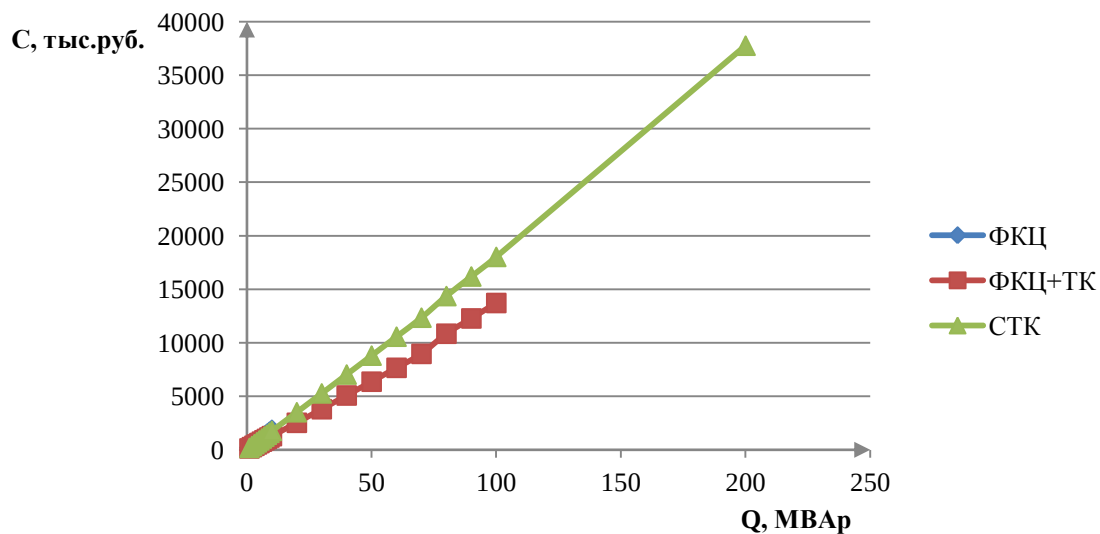


Рис. 4. График зависимости эксплуатационных затрат КУ от генерируемой мощности ($Q_{\text{КУ}} = 1-200$ МВАр)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ приведенных зависимостей позволяет сделать следующие выводы:

- 1) эксплуатационные затраты рассмотренных компенсирующих устройств монотонно увеличиваются с увеличением генерируемой реактивной мощности;
- 2) наиболее экономичным в отношении эксплуатационных расходов является второй рассматриваемый вариант компенсирующего устройства – фильтрокомпенсирующая цепь, управляемая тиристорным ключом, а наиболее затратным – статический тиристорный компенсатор.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Статические источники реактивной мощности в электрических сетях / В.А. Веников, Л.А. Жуков, И.И. Карташев, Ю.П. Рыжов. М.: «Энергия», 1975. 136 с.
2. Компенсирующие устройства в системах промыш-

ленного электроснабжения / Корнилов Г.П., Карандаев А.С., Николаев А.А., Шеметов А.Н., Храмшин Т.Р., Храмшин В.Р., Медведев А.Г. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2012. – 235 с.

3. Кочкин В.И., Нечаев О.П. Применение статических компенсаторов реактивной мощности в электрических сетях энергосистем и предприятий. М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2002. 248 с.

4. Разработка фильтрокомпенсирующего устройства дуговой сталеплавильной печи / А.А. Николаев, Г.П. Корнилов, А.С. Зайцев, С.В. Скакун, Ф.Ф. Урманова // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2015. №5/6. С. 58-63.

5. Федоров А.А., Каменева В.В. Основы электроснабжения промышленных предприятий. М.: «Энергия», 1979. 408 с.

6. Федоров А.А., Корнилов Г.П., Клецкий Н.И. Выбор источников реактивной мощности на основе технико-экономических расчетов // Промышленная энергетика. 1979. № 10. С. 20-22.

INFORMATION IN ENGLISH

TECHNICAL AND ECONOMIC COMPARISON OF COMPENSATING DEVICES FOR ARC FURNACES IN BROAD CLASS OF POWER

Kornilov G.P., Nikolaev A.A., Pyastolova D.Yu.

The object of the study is compensating devices for electric arc furnaces (EAFs). The formula for determining the power capacitor banks as part of the filter was offered. As an example, the research group calculated the required power of the compensating device for complex including an EAF-10 and a ladle furnace at a steel-making enterprise. The main types of compensating devices for arc furnaces are considered in the article. The authors calculated active power losses in the elements of compensating devices and offered the evaluation of operating costs.

Keywords: electric arc furnace, reactive power compensation, filter balancing devices, static var compensator, power loss.

REFERENCES

1. Venikov V.A., Zhukov L.A., Kartashov I.I., Ryzhov Yu.P. *Staticheskie istochniki reaktivnoy moshhnosti v elektricheskikh setyah* [Static Reactive Power Sources in Electric Grids], Moscow, Energy, 1975, 136 p.
2. Kornilov G.P., Karandaev A.S., Nikolaev A.A., Shemetov A.N., Khrumshin T.R., Khrumshin V.R., Medvedev A.G. *Kompensiruyushhie ustroystva v sistemah promyshlennogo*

elektrosnabzheniya [Compensating Devices for Industrial Power Systems], Magnitogorsk: NMSTU, 2012, 235 p.

3. Kochkin V.I., Nechaev O.P. *Primenenie staticheskikh kompensatorov reaktivnoy moshhnosti v elektricheskikh setyah energosistem i predpriyatiy* [Application of Static Var Compensator in Electric Networks of Power and Enterprises], Moscow, NTs ENAS, 2002, 248 p.

4. Nikolaev A.A., Kornilov G.P., Zaitsev A.S., Skakun S.V., Uрманова F.F. *Razrabotka filtrokompensiruyushhego ustroystva dugovoy staleplavilnoy pechi* [Design of Filter Compensating Device in Electric Arc Steel-making Furnace]. *Elektrooborudovaniye: ekspluatatsiya i remont* [Electric equipment: maintenance and repair], 2015. no.5/6, pp. 58-63.

5. Fedorov A.A., Kameneva V.V. *Osnovy elektrosnabzheniya promyshlennykh predpriyatiy* [Fundamentals of Industrial Power], Moscow, Energy, 1979, 408 p.

6. Fedorov A.A., Kornilov G.P., Kleckij N.I. *Vybor istochnikov reaktivnoy moshhnosti na osnove tekhniko-ekonomicheskikh raschetov* [Choice of Reactive Power Sources on the Basis of Technical and Economic Calculations], *Promishlennaya energetika* [Industrial power engineering], 1979, no.10, pp. 20-22.

МОНИТОРИНГ, КОНТРОЛЬ И ДИАГНОСТИКА ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

УДК 62-52-83:656.56

Крюков О.В., Серебряков А.В.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРО-ПРИВОДНЫХ ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩИХ АГРЕГАТОВ

Рассмотрены вопросы проектирования эффективных и достоверных систем оперативной диагностики электродвигателей электроприводных компрессорных станций. Представлены архитектура и методология искусственных нейронных сетей для получения прогнозных моделей электрических машин мегаваттного класса, а также результаты анализа ожидаемых состояний объектов магистрального транспорта газа.

Ключевые слова: электроприводные компрессорные станции, газоперекачивающие агрегаты, электродвигатели мегаваттного класса, искусственные нейронные сети, тесты селекционированных сетей, нечеткая модель Бокса-Дженкинса, метод анализа динамики спектральных составляющих, прогнозирование величин тока и температур статора.

ВВЕДЕНИЕ

Как показали данные статистики и нормативно-технической документации, все технологические установки компрессорных станций (КС) магистральных газопроводов относятся к опасным производственным объектам [1], и поэтому разработка систем мониторинга их состояния – задача первого приоритета при проектировании газотранспортных систем. Современные электроприводные газоперекачивающие агрегаты (ЭГПА) как объекты диагностики представляют собой сложную и пространственно-распределенную техническую систему с разнородными элементами [2-4]. Статистика 131 случаев отказов ЭГПА на 6 КС ООО «Газпром трансгаз Нижний Новгород» в 2006-2014 гг. показала, что наиболее тяжелым ЭГПА по затратам и времени восстановления является выход из строя приводного электродвигателя и, особенно, пробой изоляции статора [5-9].

Для 60 электродвигателей типа СТД-12500-2 и СДГ-12500 за период эксплуатации с 1987 по 2014 год выполнены измерения основных параметров их работы в различных режимах работы в условиях действующих компрессорных цехов и выявлены наиболее характерные виды повреждений. Проведен комплексный анализ и определены 4 группы эксплуатационных факторов [6-9], влияющих на ресурс электродвигателей ЭГПА: нагрев изоляции обмоток статора, изменения параметров питающего напряжения, электродинамические нагрузки в стержнях и частичные разряды в изоляции обмоток.

МЕТОДОЛОГИЯ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЭГПА

В настоящее время существует хорошо апробированный в некоторых технических системах математический аппарат автоматизированной настройки параметров диагностических алгоритмов на основе применения *искусственных нейронных сетей* (ИНС), объединенных в систему принятия решений (СПР) по идентификации различных дефектов [1-5].

Особенностью ИНС является то, что она обладает характеристиками, позволяющими автономно решать проблемы классификации переменных объекта и их

форм, а также самообучения алгоритмам прогнозирования, исходя из опыта отказов. ИНС позволяет разработать непараметрическую модель, которая может воспроизвести любое исправное/неисправное техническое состояние (ТС) ЭГПА и аппроксимировать свою идентификацию.

Такая модель способна запоминать примеры событий, распределяя на их основании веса соединений структуры, вплоть до устранения нейронов или соединений, которые не влияют на запоминание этих примеров.

Архитектура встроенных систем мониторинга и прогнозирования (ВСП) ТС ЭГПА на ИНС представляет собой 2 подсистемы:

- подсистема приема и обработки информации, которая соответствует ВСП работы СТД-12500-2 ЭГПА с приемом данных по ТС приводного высоковольтного синхронного двигателя (ПВСД) и их последующую обработку (распределение данных и оценку переменных);
- подсистема интерпретации полученной информации о ТС с использованием алгоритмов ИНС с распознаванием неисправностей и рекомендациями по реализации дальнейших ее действий (рис. 1).

Порядок построения ИНС ПВСД

Применение при прогнозировании ТС ЭГПА большого числа контролируемых переменных ПВСД (напряжений, токов, частичных разрядов и температуры обмоток статора) позволяет увеличить достоверность процедуры мониторинга и сделать ее более эффективной. Для реализации модуля ИНС вначале определяют его размеры, т.е. число ее входов и выходов (у нас целесообразно эти значения выбрать равными 3 и 1).

Затем архитектура сети формируется исходя из алгоритма обучения и минимизации среднеквадратической ошибки результатов мониторинга и перспектив прогнозирования ТС ПВСД с определением остаточного ресурса.

Прежде чем встраивать блок ИНС (рис. 1) в подсистему интерпретации информации в структуре ВСП, необходимо изучить функционирование трех ИНС с входами различной архитектуры. При этом входы данных трех ИНС не одного и того же размера, а следовательно, и их структуры, выбранные после фазы

обучения, будут отличаться и иметь разное число внутренних слоев и число нейронов в этих слоях. В результате выбора наиболее целесообразной сети ВСМП ТС ПВСД на основе объемного параметрического исследования трех ИНС необходимо принять следующие 4 решения.

1. *Окончательный выбор диагностируемых переменных.* Наиболее информативными входными переменными, характеризующими ТС изоляции обмотки статора СТД-12500-2, являются температура меди, интенсивность частичных разрядов (ЧР) и уровень перенапряжений питающей сети. Это обусловлено тем, что, как показали экспериментальные исследования в натурных условиях различных компрессорных станций (КС), именно эти параметры могут адекватно оценить ТС и заранее спрогнозировать наступление нештатных режимов. К тому же эти переменные доступны прямому измерению штатными техническими средствами и непосредственному их представлению в нейронной базе знаний (НБЗ). В публикациях [1-3,6-7] представлены результаты замеров данных эксплуатационных факторов и общая статистика наблюдений за период

1985-2010 гг. с фиксацией 62 случаев выхода из строя СТД-12500-2.

2. *Конструкция НБЗ.* Для создания на основе ИНС модели, описывающей исправное и неисправное состояние статорной обмотки ПВСД ЭГПА, необходимо создать такую оптимальную конструкцию НБЗ, в которой содержалась бы достаточная информация о возможных дефектах, возникающих в различных режимах работы ЭГПА-12,5. Для этого на основе анализа существующей статистики неисправностей (и симуляции возможных нарушений) машины СТД-12500-2 все они группируются в 12 видов (включая исправные состояния), и по каждому состоянию оцениваются текущие изменения трех выбранных ранее входных переменных в течение всего периода измерений. В итоге НБЗ каждой переменной составила 3000 различных значений (векторов), характеризующих возможные режимы работы электродвигателя. Это значение, соответствующее количеству замеров и результатов поставленных экспериментов, необходимо ввести в конструкцию ИНС (табл. 1).

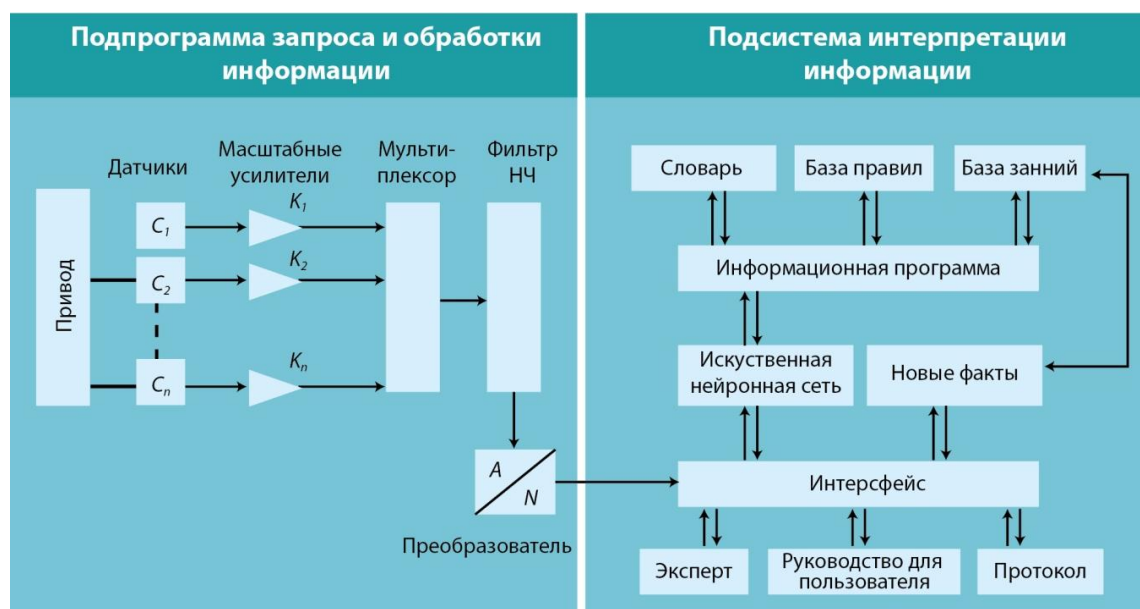


Рис. 1. Архитектура автоматизированной ИНС ПВСД ЭГПА

Таблица 1

Конструкция НБЗ на основе ИНС

Тип неисправности обмотки статора	Символ	Код ИНС
Перегрев в пазовой части расточки		000 000 000 001
Перегрев в лобовой части обмотки		000 000 000 010
Перегрев на выводах		000 000 000 100
Перегрев при запуске агрегата		000 000 001 000
Перенапряжения выхода из синхронизма		000 000 010 000
Перенапряжения при дребезге контактов		000 000 100 000
Перенапряжения при ОЗЗ		000 001 000 000
Перенапряжения при МКЗ		000 010 000 000
Загрязнение масляно-графитовой смесью		000 100 000 000
Дефект изоляции в пазовой части		001 000 000 000
Дефект изоляции в лобовой части		010 000 000 000
Отсутствие признаков дефектов изоляции	QN	100 000 000 000

3. *Создание блока ИНС.* Определившиеся нейронные сети являются многоуровневыми с оптимальным алгоритмом своего обучения. Для встраивания блока ИНС в ВСМП ПВСД предлагается исследовать 3 нейронные сети. После фазы их тестирования и сравнения между собой можно выбрать наиболее подходящую для решения всего комплекса задач прогнозирования ИНС. При этом этапы конструирования и пригодности нейронных сетей разделяются на три фазы (рис. 2). Первая связана с выбором входов и конструкцией НБЗ исходя из файлов, полученных при анализе всех упомянутых трех параметров мониторинга. Вторая связана с выбором выходов сетей (для каждой отдельно) и их кодов, а третья – с выбором архитектуры сетей.

4. *Определение тестов селекционированных сетей.* При числе используемых входов блока ИНС, равном десять (на рис. 2 – $p = 10$) для каждой контролируемой переменной в табл. 2 приведены полученные результаты тестирования по [1-3].

Для трех сетей этап селекционирования выполняется после того, как вторая сеть завершает свое тестирование после 148 презентаций каждого примера. При этом тестирование выполняется в 2 этапа: на первом сеть делает 100 повторяющихся исследований для каждого примера неисправного состояния, на втором – они вновь вводятся в программу тестирования, которая прекращается после 48 итераций со среднеквадратичной ошибкой результатов тестирования, равной $3,7 \cdot 10^{-16}$ (рис. 3).

Таблица 2

Номер ИНС	Результаты тестирования трех ИНС			
	Число нейронов			
	Входной слой	Внутренний слой	Выходной слой	Среднеквадратичная ошибка
1	10	13	11	$3,24221 \cdot 10^{-15}$
2	20	8	11	$3,71314 \cdot 10^{-16}$
3	30	6	11	$3,26580 \cdot 10^{-17}$

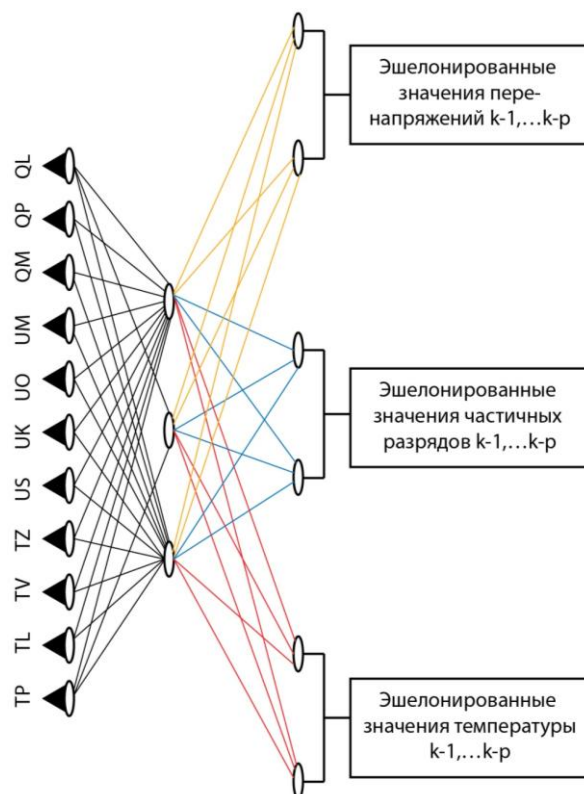


Рис. 2. Структура третьей ИНС

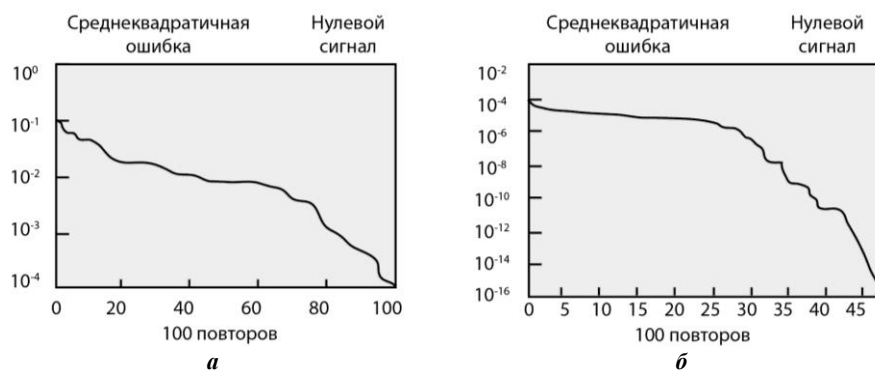


Рис. 3. Эволюция среднеквадратичной ошибки для ИНС

ТЕСТЫ СЕТЕЙ НЕЙРОНОВ

После построения трех сетей нейронов и достижения желаемых точностных показателей при их обучении важнейшим этапом становится их комплексное сопоставление между собой. При этом сравнение производится путем тестирования входов и выходов каждой ИНС. Эта процедура связана с фазой обучения и определением базы тестов, с помощью которых приступают к тестированию способности ИНС распознавать «скрытые» дефекты, ранее не рассматриваемые при оценке работоспособности ЭГПА, и оценки способность ИНС к обобщению результатов.

Так, ВСМП технического состояния ПВСД типа СТД-12500-2 предусматривал выбор из трех ИНС (см. **рис. 2**) наилучшей сети путем тестирования их для ранее приведенных дефектов (см. **табл. 1**). Он позволил идентифицировать их с большой точностью, что подтверждается значениями среднеквадратичных ошибок результатов диагностирования, близких к нулю (см. **табл. 2**). При тестировании третьей сети для дефектов СТД-12500-2, которые были изучены на фазе обучения сети, результаты ее моделирования для неисправностей, связанных с перегревом в пазовой части расточки, представлены в **табл. 3**.

Здесь представлены выходы третьей сети при различных относительных нагрузках механической характеристики электродвигателя. Первая строчка **табл. 3** соответствует дефекту, рассмотренному в данной тестовой фазе, т.е. при перегреве изоляции статорной обмотки СТД-12500-2 в ее средней части расточки. Данный дефект был распознан почти на 100 % для большинства режимов работы ЭГПА. Для других режимов работы результаты тестирования входных переменных ИНС заметно не отличаются. Так, например, минимальное значение результатов тестирования, соответствующих рассматриваемому дефекту, равнялось 0,857, что близко проявлению того же дефекта в режиме 40 % номинальной нагрузки ПВСД.

Таблица 3

Результаты тестирования третьей ИНС

Выходы ИНС	Нагрузка, % номинала					
	90	80	60	40	20	10
1	1,0000	1,0000	1,0000	0,8570	1,0000	0,9605
2	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0005
3	0,0000	0,0000	0,0002	0,0000	0,0000	0,0034
4	0,0049	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
5	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
6	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
7	0,0000	0,0000	0,0000	0,0057	0,0000	0,0000
8	0,2310	0,0000	0,0067	0,0000	0,0000	0,0000
9	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
10	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
11	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

Согласно анализу результатов, полученных на фазе теста всех трех ИНС, выявлено, что третья сеть нейронов (см. **табл. 2** и **табл. 3**) наиболее производительна и, следовательно, именно она целесообразна для применения в ВСМП ЭГПА. Что же касается выходов третьей сети, которые близки к желаемому значению, они должны быть приближены к «0» или к «1», чтобы

обеспечить достоверность идентификации неисправности в изоляции статора ПВСД с указанием первопричины и места его появления. При этом обоснование объективных рекомендаций для устранения подобных неисправностей является главным результатом работы ВСМП на базе ИНС.

СОПОСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТС ЭГПА

Для сопоставления достоверности результатов прогнозирования ТС ПВСД ЭГПА различными методами рассмотрим тренд, описывающий суточные колебания температуры статора СТД-12500-2 в процессе эксплуатации ЭГПА (**рис. 4**, кривая *a*) и произведем анализ эффективности инерционных прогностических методов. Для этого известный временной ряд, описывающий изменение температуры, разобьем на две части, первая из которых будет являться основанием прогноза, а вторая – для проверки апостериорной точности прогноза.

Применение методов на основе нечетких (ARMA-моделей, в частности, использовался метод Бокса-Дженкинса) [1] возможно, так как числовой ряд разностей первого порядка температурного временного ряда является стационарным. Из графика **рис. 4** видно, что методы на основе моделей Бокса-Дженкинса дают очень оптимистичный прогноз с возрастающим трендом (кривая *б*). На основе полученных данных нельзя достоверно определить момент выхода значений температуры за допустимые пределы. Значение средней относительной ошибки прогноза составило 23–58% ($\bar{A} = 0,23 - 0,58$).

Так же для проверки эффективности использовался вышеописанный метод на основе ИНС. Для этого использовалась сеть Ворда, на входы которой подавались предыдущие значения временного ряда. Выбор именно этого типа связан с тем, что ИНС данного типа способны производить классификацию значимости входных значения. Моделирование показало, что построенная и обученная ИНС на границе неопределенности температурного временного ряда позволяет определить общую тенденцию повышения температуры, но дает пессимистичный прогноз (кривая *б*). В результате можно определить тенденции развития процесса, но достоверно определить момент выхода значений температуры за пределы допустимых значений нельзя. Значение средней относительной ошибки прогноза составило 16–46% ($\bar{A} = 0,16 - 0,46$).

Для прогнозирования тренда температуры методом временных рядов (АДСС) [4] использовалась предыстория температурного ряда размером $N=400$ отсчетов. Полученный многоступенчатый прогноз (кривая *г*) позволяет выделить возрастающую тенденцию ряда и с высокой точностью определить момент выхода значений температуры за допустимые границы. Значение средней относительной ошибки прогноза составило 8–34% ($\bar{A} = 0,08 - 0,34$).

На основании проведенных исследований можно сделать вывод, что использование метода временных рядов позволяет делать более точные прогнозы относительно дрейфа температуры статоров СТД-12500-2 по сравнению с применяемыми методами на основе прогнозных моделей и ИНС

Аналогичные результаты получены при сопоставлении прогнозирования токов статора СТД-12500-2 (рис. 5) методами Бокса-Дженкинса (кривая *б*) с ошибкой 34–127%, ИНС Ворда (кривая *б*) с ошибкой 27–84% и метод временных рядов АДСС (кривая *г*) с ошибкой 11–58%.

Однако спецификой функционирования ЭГПА является большая инерционность (постоянные времени), включая изменения тепловых режимов и параметров ЧР. Поэтому рациональный выбор метода прогнозирования технического состояния конкретного ЭГПА определяется совокупностью условий, режимов работы магистральных газопроводов и различными системными особенностями функционирования газоперекачивающей техники на компрессорных станциях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана система мониторинга оценки влияния эксплуатационных факторов ПВСД на ресурс изоляции статора, которая показала:

- нагрев обмоток в средней части двигателя на 23°C выше, чем лобовых частей, а частота пробоев изоляции здесь составляет более 86%. Кроме того, при внезапном останове машины температура растет еще на 15–20°C, вызывая опасность теплового удара и перегрева обмоток;
- линейные напряжения на ЗРУ-10 кВ в течение 82 ч наблюдений могут составлять 10,37–10,91 кВ, превос-

ходя стандартные значения и имея значительные искажения по форме;

– механические нагрузки из-за электродинамических усилий в стержнях на обмотку статора машины незначительны даже при реакторном пуске ПВСД;

– все машины СТД-12500 имеют ЧР различной амплитуды и интенсивности, а онлайн мониторинг ЧР позволяет адекватно оценивать ТС ПВСД.

Результаты исследований эффективности ВСМП ПВСД на основе методов нечёткой логики (Бокса-Дженкинса) и ИНС (сети Ворда) при прогнозировании технических параметров СТД-12500 в случае развития постепенных отказов показали, что они дают более точные результаты по сравнению с традиционными методами экстраполяции и позволяет принимать более адекватные и своевременные решения. При многошаговом прогнозировании быстрых процессов изменения токов в условиях отсутствия дополнительной информации на этапе идентификации модели применение метода прогнозирования на основе временных рядов дает более точный результат. Однако рациональный выбор метода прогнозирования ТС конкретного ЭГПА определяется совокупностью условий, режимов работы МГ и системными особенностями функционирования газоперекачивающей техники на компрессорных станциях магистральных газопроводов.

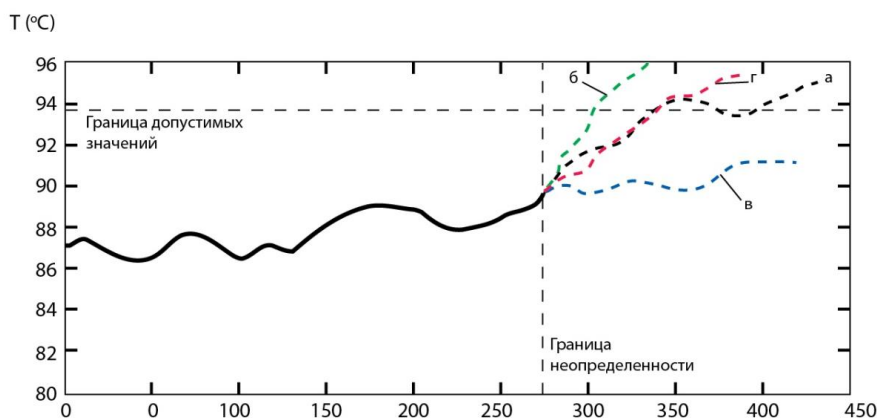


Рис. 4. Прогнозирование температуры статора электродвигателя СТД-12500-2:

а – фактический временной ряд; б – прогноз, полученный с использованием ИНС (сеть Ворда); в – прогноз, полученный с использованием модели Бокса-Дженкинса; г – прогноз, полученный с использованием метода АДСС

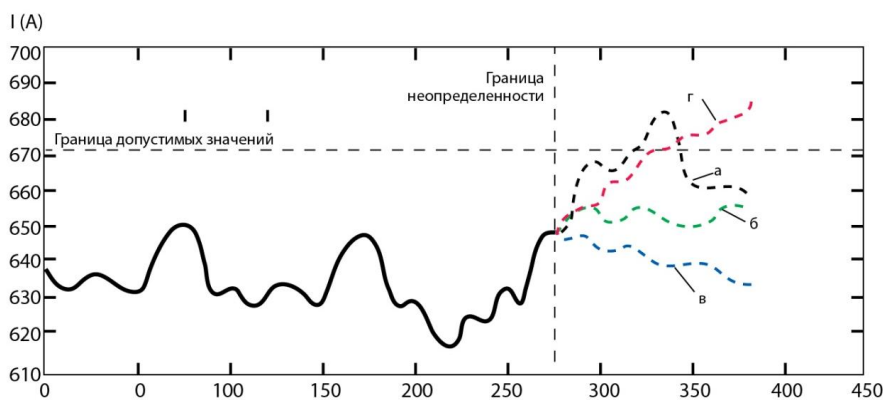


Рис. 5. Прогнозирование тока статора электродвигателя СТД-12500-2:

а – фактический временной ряд; б – прогноз, полученный с использованием ИНС (Ворда); в – прогноз, полученный с использованием модели Бокса-Дженкинса; г – прогноз, полученный с использованием метода временных рядов

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пужайло А.Ф. и др. Энергосбережение и автоматизация электрооборудования компрессорных станций МГ: монография / под ред. О.В. Крюкова. Н.Новгород: Вектор ТиС, 2010. 570 с.
2. Крюков О.В. Методология и средства нейронечеткого прогнозирования состояния ЭГПА // Электротехника, 2012, №9. С.52-57.
3. Крюков О.В. Комплексная система мониторинга и управления электроприводными газоперекачивающими агрегатами // Труды МНПК «Передовые информационные технологии, средства и системы автоматизации и их внедрение на российских предприятиях», АИТА-2011, М.: ИПУ РАН, 2011. С. 329-350.
4. Пужайло А.Ф. и др. Энергосбережение и автоматизация электрооборудования компрессорных станций МГ: монография / под ред. О.В. Крюкова. Н.Новгород, Вектор ТиС, 2011. Т.2. 664 с.
5. Милов В.Р., Шалашов И.В., Крюков О.В. Процеду-

ры прогнозирования и принятия решений в системе технического обслуживания и ремонта // Автоматизация в промышленности. 2010. № 8. С.47-49.

6. Крюков О.В., Степанов С.Е., Титов В.Г. Встроенные системы мониторинга технического состояния электроприводов для энергетической безопасности транспорта газа // Энергобезопасность и энергосбережение. 2012. №2. С. 5-10.
7. Бабичев С.А., Захаров П.А., Крюков О.В. Мониторинг технического состояния приводных электродвигателей газоперекачивающих агрегатов // Контроль. Диагностика. 2009. № 7. С. 33-39.
8. Бабичев С.А., Крюков О.В., Титов В.Г. Автоматизированная система безопасности электроприводных газоперекачивающих агрегатов // Электротехника. 2010. № 12. С. 24-31.
9. Бабичев С.А., Захаров П.А., Крюков О.В. Автоматизированная система оперативного мониторинга приводных двигателей газоперекачивающих агрегатов // Автоматизация в промышленности. 2009. № 6. С. 3-6.

INFORMATION IN ENGLISH

RESULTS OF TECHNICAL STATE PREDICTION OF ELECTRIC GAS-COMPRESSOR UNITS

Kryukov O.V., Serebryakov A.V.

The article is concerned with design of efficient and reliable systems of on-line control of electric motors for electric gas-compressor plants. The authors describe the architecture and methodology of artificial neural networks aimed at developing predictive models for megawatt electrical machines and the analysis results of the anticipated states of the units for bulk gas transport.

Keywords: electric compressor plants, gas compressor units, megawatt electric motors, artificial neural networks, tests of selected networks, fuzzy Box-Jenkins model, method of spectral components dynamics analysis, prediction of current value and stator temperature.

REFERENCES

1. Puzhaylo A.F. and others. *Energoberezhenie i avtomatizatsiya elektroborudovaniya kompressornykh stantsiy* [Energy Saving and Automation of Electrical Equipment of Gas-compressor Units], monograph, under the editorship of O.V. Kryukov, Nizniy Novgorod, Vector TiS, 2010, 570 p.
2. Kryukov O.V. *Metodologiya i sredstva neiro-nechetkogo prognozirovaniya sostoyaniya gazoperekachivayuschikh ustanovok* [Methodology and Means of Neuro-fuzzy prediction of Gas Compressing Unit State], Electrical engineering, 2012, no.9, pp.52-57.
3. Kryukov O.V. *Kompleksnaya sistema monitoringa i upravleniya elektroprivodnymi gazoperekachivayuschimi agregatami* [Integrated System of Monitoring and Control of Electric Gas-compressor Units], Proceedings of «Progressive information technologies, means and automation systems and their implementation in Russian companies», АИТА-2011, Moscow, IPU RAN, 2011, pp. 329-350.

4. Puzhaylo A.F. and others. *Energoberezhenie i avtomatizatsiya elektroborudovaniya kompressornykh stantsiy* [Energy Saving and Automation of Electrical Equipment of Gas-compressor Units], monograph, under the editorship of O.V. Kryukov, Nizniy Novgorod, Vector TiS, 2011, vol.2, 664 p.

5. Milov V.R., Shalashov I.V., Kryukov O.V. *Protsedury prognozirovaniya i prinyatiya resheniy sisteme tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta* [Processes of Forecasting and Decision Making in the System of Maintenance and Repair], Automation in industry, 2010, no.8, pp.47-49.

6. Kryukov O.V., Stepanov S.E., Titov V.G. *Vstroennye sistemy monitoringa tekhnicheskogo sostoyaniya elektroprivodov dlya energeticheskoy bezopasnosti transporta gaza* [Integrated Monitoring Systems of Electric Drive Technical State for Energy Preparedness of Gas Transportation], Energy security and energy saving, 2012, no.2, pp. 5-10.

7. Babichev S.A., Zakharov P.A., Kryukov O.V. *Monitoring tekhnicheskogo sostoyaniya privodnykh elektrodvigately gazoperekachivayuschikh agregatov* [Monitoring of Technical State of Electric Motors of Gas-compressor Units], Control. Diagnostics, 2009, no.7, pp. 33-39.

8. Babichev S.A., Kryukov S.A., Titov V.G. *Avtomatizirovannaya sistema bezopasnosti elektroprivodnykh gazoperekachivayuschikh agregatov* [Automatic Safety System of Electric Gas-compressor Units], Electrical engineering, 2010, no.12, pp. 24-31.

9. Babichev S.A., Zakharov P.A., Kryukov O.V. *Avtomatizirovannaya sistema operativnogo monitoringa privodnykh dvigateley gazoperekachivayuschikh agregatov* [Automatic System of On-line Monitoring of Electric Motors of Gas-compressor Units], Automation in industry. 2009. no.6, pp. 3-6.

ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА, АВТОМАТИКА И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

УДК 004.932.72

Миков А.Ю., Логунова О.С., Маркевич А.В.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ И СТРУКТУРА СИСТЕМЫ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ПОДДЕРЖКИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ОЦЕНКОЙ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ ХОЛОДНОКАТАНОГО ПРОКАТА

Целью исследования в работе является повышение достоверности информации при распознавании дефектов на изображениях поверхности в автоматизированном режиме на основе подсистемы интеллектуальной поддержки принятия решения в системе управления оценкой качества поверхности холоднокатаного проката. Для достижения цели в работе выполнено исследование структуры управления многостадийным производством холоднокатаного листа, определены кортежи взаимосвязанных технологических параметров со структурой изображения поверхности проката, выполнена селекция текстурных признаков изображения и разработана схема взаимодействия модулей системы классификации признаков структуры. Исследования проведены в июне-июле 2015 года для условий листопрокатного цеха одного из крупнейших металлургических предприятий Российской Федерации. Использованы методы системного анализа, классификации изображений, текстурные признаки Харалика. Основным результатом работы является схема взаимодействия модулей системы классификации признаков структуры изображения, которая позволяет выполнить проектирование и разработку программного обеспечения для повышения достоверности информации в интеллектуальной системе поддержки принятия решений при управлении процессом производства холоднокатаного проката.

Ключевые слова: холоднокатаный лист, качество поверхности, признаки Харалика, текстура изображения, управление многостадийным процессом.

ВВЕДЕНИЕ

Экономические и политические кризисы в мировом пространстве привели к проблеме импортозамещения во всех областях деятельности предприятий Российской Федерации. Не является исключением и область управления технологическими процессами и производствами. В настоящее время на российских промышленных предприятиях представлен широкий спектр технологического оборудования, функционирование которого производится в автоматизированном или автоматическом режимах. Эксплуатация этого оборудования требует импортозамещения в области программно-технических средств для автоматизированных систем управления. Особенно необходимо обратить внимание на импортозамещение интеллектуальной составляющей – алгоритмическое и программное обеспечение систем автоматизации [1].

Одним из востребованных продуктов металлургического производства является стальной холоднокатаный лист, который применяется при производстве легких металлоконструкций, элементов и систем вентиляции, аспирации, противопожарной вентиляции, при изготовлении бытовой и медицинской мебели, при производстве торгового оборудования, в автомобильной промышленности для изготовления элементов и деталей корпусов, в производстве электротехнического оборудования для изготовления коробов, распределительных шкафов и пр. Кроме того, из холоднокатаного листа производят перфорированные, волнистые металлические, стеновые и кровельные покрытия. Металлопрофиль идет на изготовление листов для судостроения. Также такие листы незаменимы в крупных промышленных объектах – атомных станциях, плотинах, дамбах. Высокая прочность металла защищает от самых различных неблагоприятных внешних факторов [2]. Востребованность горячекатаного стального листа (является исходным материалом для холодной прокат-

ки) в России достигает 15 млн т [3] и составляет около 20 % от объема производимой стали (рис. 1).

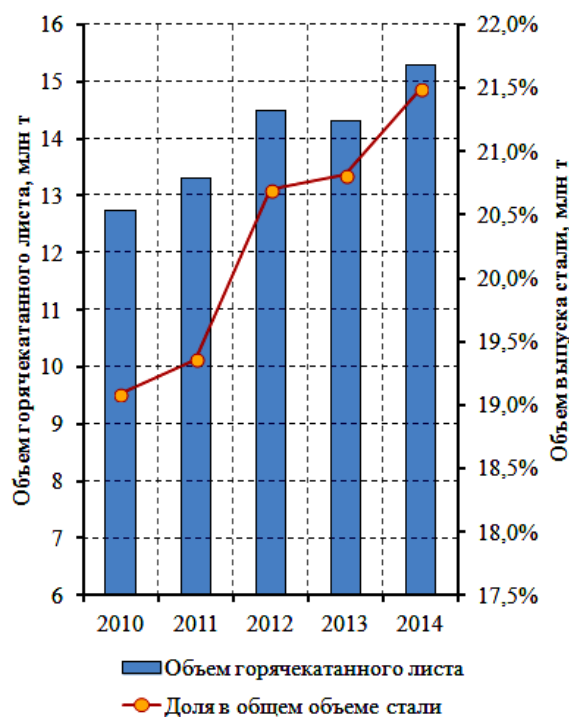


Рис. 1. Объем производства горячекатаной полосы в России и его соотношение к общему объему выпускаемой стали

Высокая востребованность горячекатаного стального листа определяет требования к качеству поверхности. Как отмечается в [4], обнаружение дефектов на поверхности холоднокатаного листа является важной составляющей при производстве автомобильного листа высокого качества. Увеличение надежности обнаружения дефектов достигается за счет снижения ошибочно классифицированных и пропущенных дефектов, которые приводят не только к некондиции, но и снижают коррозионную стойкость, абразивную устойчивость, усталостную прочность металлического листа.

В технологическую цепочку листопрокатного цеха 11 ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» внедрена система автоматической инспекции поверхности полосы *Espresso SI* фирмы *Parsytec*. В которой для обнаружения дефектов используются: сенсоры с диффузной и фокусируемой подсветкой, линейные и матричные камеры, установленные снизу и сверху полосы. Снимки дефектов (или «подозрений» на дефекты) сохраняются в базе данных, что позволяет провести дополнительную обработку изображений и использовать их для дальнейшего развития систем распознавания. К типичным дефектам, которые может обнаружить система *Espresso SI* относятся: «дыра», «царапина», «складка», «окалина» и пр. Но в настоящий момент не обеспечивается достаточный уровень обнаружения некоторых дефектов и присутствуют так называемые «псевдодефекты» [4].

Учитывая наличие информации о поверхностных псевдодефектах, в работе поставлена цель повышения достоверности информации при распознавании дефектов на изображениях поверхности в автоматизированном режиме на основе подсистемы интеллектуальной поддержки принятия решения в системе управления оценкой качества поверхности холоднокатаного проката.

Для достижения цели решаются задачи:

– расширение системы автоматизированного комплекса *Espresso SI* фирмы *Parsytec* за счет синтеза интеллектуальной поддержки принятия решения в системе управления оценкой качества поверхности холоднока-

таного проката в структуре многостадийного производства;

– построение математического обеспечения для автоматизированной системы идентификации дефектов на основе гибридного нейронечеткого классификатора для объектов в структуре изображения, включающего генерацию признаков для описания объектов на изображении, селекцию признаков с наилучшими классификационными свойствами, обучение разработанной искусственной нейронной сети для классификации признаков;

– разработка структуры адаптивной подсистемы интеллектуальной поддержки принятия решения в системе управления оценкой качества поверхности холоднокатаного проката.

СХЕМА МНОГОСТАДИЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА С КОМПЛЕКСНОЙ СИСТЕМОЙ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ПОДДЕРЖКИ УПРАВЛЕНИЯ

Наличие технического комплекса *Espresso SI* фирмы *Parsytec* позволяет выполнить усовершенствование управления в цепочке многостадийного производства металлургической продукции, приведенной в работе [5]. В стандартную структуру управления многостадийным производством металлургической продукции добавляется модуль синтеза интеллектуальной поддержки принятия решения в системе управления оценкой качества поверхности холоднокатаного проката (рис. 2).

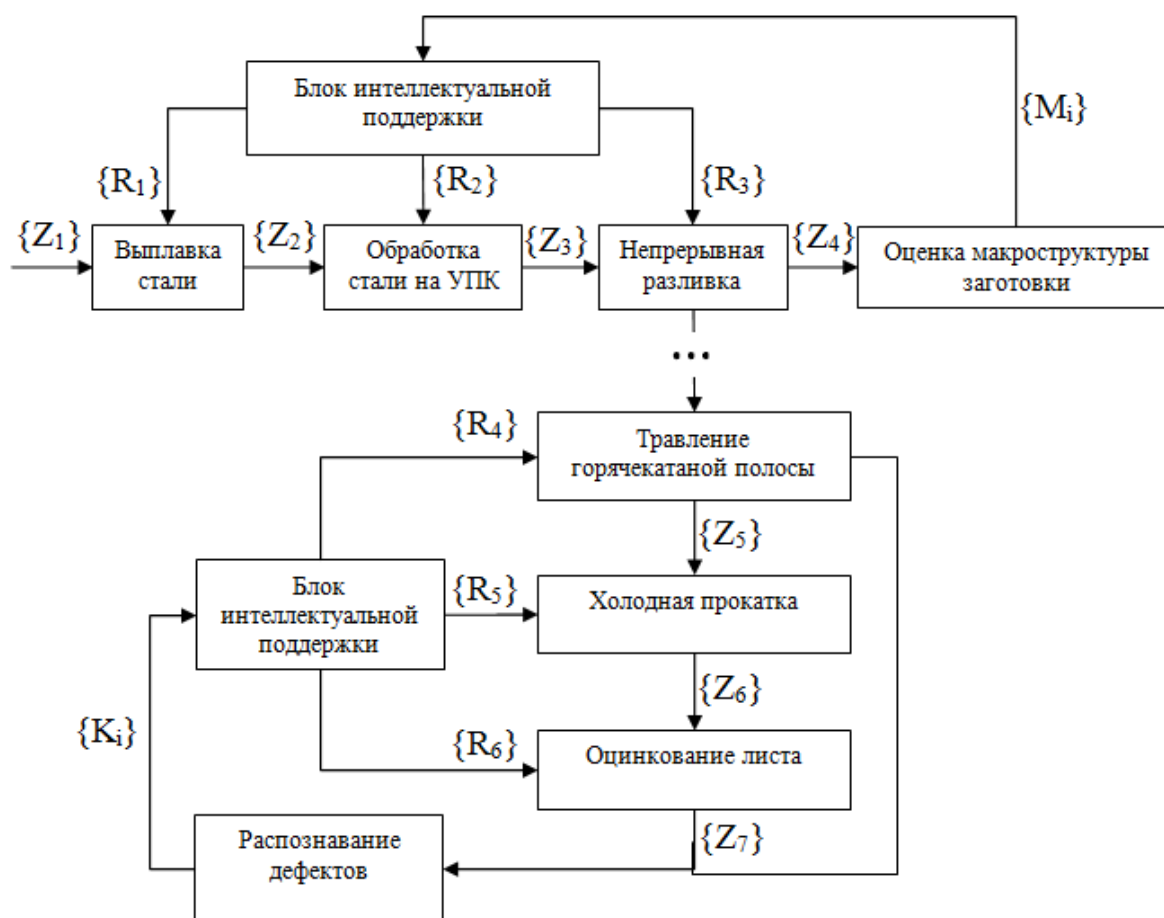


Рис. 2. Схема многостадийного производства холоднокатаного листа

Многостадийный процесс производства металлургической продукции и, в частности, холоднокатаного проката разделен на два крупных этапа: этап производства непрерывнолитой заготовки и непосредственно этап производства проката. На этапе производства заготовок выпускается полуфабрикат, который передается на множество других производственных линий. Именно на этапе производства заготовок закладывается фундамент качества готовой продукции. Дефекты макроструктуры и поверхностные дефекты получают свое развитие в процессах прокатного производства.

Проблема установления взаимосвязи между уровнями развития дефектов, полученных в процессе производства непрерывнолитой заготовки, на их последующее развитие в прокатном производстве до настоящего времени не нашла решения даже при наличии развитой корпоративной информационной системы, в состав которой представлен «сквозной» паспорт

плавки. Проблема установления взаимосвязи в первую очередь определена в наличии субъективного фактора в оценке показателей качества продукции. Оценка развития дефектов как для заготовки, так и для стального листа до настоящего времени проводится на основе традиционных методов визуального осмотра. В результате осмотра получают атрибутивные качественные признаки, которые не могут быть использованы для количественной оценки.

Для схемы, приведенной на рис. 2, все входные и выходные параметры приобретают конкретный физический и технологический смысл (см. таблицу). В таблице полужирным шрифтом выделены показатели, передающиеся между стадиями производства и определяющие выбор режимов работы агрегата следующей стадии. Наличие связывающих параметров позволяет организовать комплексное управление всеми стадиями производства.

Состав основных векторов заданий для стадий производства непрерывнолитых заготовок и холодной прокатки

Вектор задания	Координаты вектора	Физический или технологический смысл координаты
$\{Z_1\}$	d	соотношение шихтовых материалов (лом/чугун), %
	$\{c_i\}$	процентное содержание химических элементов на выпуске стали из ДСП, %
	t_1	время дуги под током, мин
	I_1	сила тока, МА
	U_1	напряжение тока, МВ
	$\{l_i\}$	доля элементов неметаллической шихты, %
	$\{v_{п}\}$	расход присадок твердых окислителей, кг
	$\{g_{п}\}$	расход газообразного кислорода, м ³ /ч
	$\{f_{п}\}$	удельный расход ферросплавов, кг/т
	T_1	температура металла при выпуске из ДСП, °С
	T_1	температура металла при выпуске из ДСП, °С
$\{Z_2\}$	$\{c_i\}$	процентное содержание химических элементов на выпуске стали из ДСП, %
	t_2	время дуги под током, мин
	I_2	сила тока, МА
	U_2	напряжение тока, МВ
	$\{g_{i2}\}$	расход газообразного аргона, м ³ /ч
	$\{f_{i2}\}$	удельный расход ферросплавов, кг/т
	T_2	температура металла в сталеразливочном ковше при выходе с УПК, °С
	T_2	температура металла в сталеразливочном ковше при выходе с УПК, °С
$\{Z_3\}$	T_3	температура металла в промежуточном ковше при выходе с МНЛЗ, °С
	$\{c_{к}\}$	процентное содержание химических элементов в сталеразливочном ковше при выходе с УПК, %
	v	скорость вытягивания заготовки, м/мин
	$\{F_{г}\}$	расход воды на зоны вторичного охлаждения МНЛЗ, м ³ /ч
	$\{D_{г}\}$	расход воздуха на зоны вторичного охлаждения МНЛЗ, м ³ /ч
	w	частота качания кристаллизатора
	F	расход воды на кристаллизатор, м ³ /ч
	$\{M_{i3}\}$	задание на оценку макроструктуры заготовки, балл
	$\{M_{i3}\}$	задание на оценку макроструктуры заготовки, балл
	$\{c_{п}\}$	процентное содержание химических элементов в промежуточном ковше МНЛЗ (последняя проба), %
$\{Z_4\}$	$\{I_i\}$	информация об отборе темплета для оценки качества
	$\{I_i\}$	информация об отборе темплета для оценки качества

Вектор задания	Координаты вектора	Физический или технологический смысл координаты
$\{M_i\}$	$\{O_i\}$	фактические результаты оценки качества, балл
	$\{I_i\}$	информация об отборе темплета для оценки качества
$\{Z_5\}$	w	ширина листа, мм
	d	толщина листа, мм
	v	скорость прокатки, м/с
	T	температура травления, °C
	$\{I_n\}$	Изображения поверхности полосы после травления
$\{Z_6\}$	w	ширина листа, мм
	d	толщина листа, мм
	v	скорость прокатки, м/с
	T	температура прокатки, °C
	t	Время выдержки в печи, ч
$\{Z_7\}$	w	ширина листа, мм
	d	толщина листа, мм
	v	скорость прокатки, м/с
	T	температура цинкования, °C
	t	Время выдержки в печи, ч
$\{K_i\}$	$\{I_{i2}\}$	Изображения поверхности оцинкованной полосы

ОПИСАНИЕ ДАННЫХ, ПОЛУЧАЕМЫХ В ХОДЕ РАБОТЫ КОМПЛЕКСА ESPRESSO SI ФИРМЫ PARSYTEC

Изображения поверхности листа холоднокатаного проката (рис. 3), получаемые с камеры, имеют разрешение 101 ppi (пикселей на дюйм) и являются монохромными – в оттенках серого, соотношение сторон 1:6. Дефекты на поверхности листа на изображении случайно расположенные и являются объектами нерегулярной формы, различных размеров, ориентации и яркости.

В работах [6-9] предлагается использование системы интеллектуальной поддержки принятия решений при оценке качества непрерывной заготовки. Авторы использовали статистические и детерминированные методы сегментации изображения серного отпечатка. Также углубленный анализ изображений серных отпечатков привел к необходимости применения теории нечетких множеств при классификации изображений.

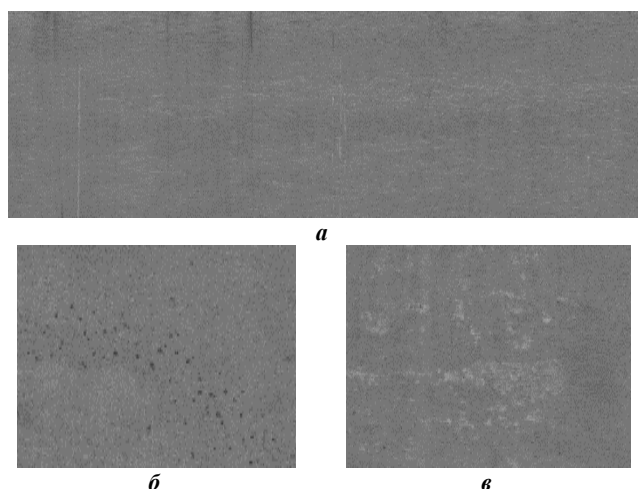


Рис. 3. Изображения фрагментов листового проката: а – с дефектом «царапина»; б – с дефектом «пятна загрязнения»; в – с дефектом «пятна промасливания»

Однако общность свойств изображения не позво-

ляет использовать указанные методы при сегментации изображения поверхности холоднокатаного листа. Проявление поверхностных дефектов носит текстурный характер и требует использования специальных методик для выявления однородности в структуре изображения.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СИСТЕМЫ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ПОДДЕРЖКИ

В работе [10] Р.М. Хараликом предложены текстурные признаки изображения, основанные на его статистических свойствах. Текстурные признаки позволяют агрегировать контекстную информацию с определенными свойствами инвариантности под конкретную задачу распознавания образов.

В рамках задачи распознавания дефектов выбраны текстурные признаки Харалика, основанные на статистиках первого и второго порядков, извлеченных из матрицы пространственной смежности. Матрица пространственной смежности $A[i, j]$ представляет для заданного относительного расстояния между пикселями d и ориентации ϕ общее число пар пикселей, расположенных на смещении d под углом ϕ и обладающих яркостями i и j . Матрица $A[i, j]$ нормирована делением каждого элемента на общее число пар пикселей. По своей сути каждый элемент матрицы A представляет собой вероятность p того, что пиксель со значением яркости i будет найден рядом (на расстоянии d под углом ϕ) с пикселем яркости j :

$$A = \begin{pmatrix} p(0, 0) & p(0, 1) & \dots & p(0, N_g - 1) \\ p(1, 0) & p(1, 1) & \dots & p(1, N_g - 1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p(N_g - 1, 0) & p(N_g - 1, 1) & \dots & p(N_g - 1, N_g - 1) \end{pmatrix},$$

где N_g – размер диапазона яркости (для изображения в оттенках серого при 8-битной глубине цвета $N_g = 256$).

С использованием яркостной матрицы смежности вычисляются текстурные признаки, приведенные в работе [10]:

– угловой момент второго порядка (мера гладкости изображения):

$$f_1 = \sum_{i=1}^{N_g} \sum_{j=1}^{N_g} p^2(i, j);$$

– контраст Харалика (мера локальной дисперсии серого):

$$f_2 = \sum_{n=0}^{N_g-1} n^2 \left\{ \sum_{i=1}^{N_g} \sum_{j=1}^{N_g} p(i, j) \right\};$$

– корреляция Харалика:

$$f_3 = \frac{\sum_{i=1}^{N_g} \sum_{j=1}^{N_g} (ij) p(i, j) - \mu_x \mu_y}{\sigma_x \sigma_y},$$

где $\mu_x, \mu_y, \sigma_x, \sigma_y$ – среднее и стандартное отклонение p_x, p_y частной плотности вероятности;

– дисперсия Харалика:

$$f_4 = \sum_{i=1}^{N_g} \sum_{j=1}^{N_g} (i - \mu)^2 p(i, j);$$

– обратный разностный момент (имеет большое значение для низкоконтрастных изображений):

$$f_5 = \sum_{i=1}^{N_g} \sum_{j=1}^{N_g} \frac{1}{1 + (i - \mu)^2} p(i, j);$$

– суммарное среднее:

$$f_6 = \sum_{i=2}^{2N_g} i p_{x+y}(i),$$

где x и y – координаты (строки и столбцы) матрицы пространственной смежности, $p_{x+y}(k) = \sum_{i=1}^{N_g} \sum_{j=1}^{N_g} p(i, j) i + j = k, k = 2, 3, \dots, 2N_g$;

– суммарная дисперсия:

$$f_7 = \sum_{i=2}^{2N_g} (i - f_6)^2 p_{x+y}(i)$$

– суммарная энтропия:

$$f_8 = - \sum_{i=2}^{2N_g} p_{x+y}(i) \log(p_{x+y}(i));$$

– энтропия (мера равномерности):

$$f_9 = - \sum_{i=1}^{N_g} \sum_{j=1}^{N_g} p(i, j) \log(p(i, j));$$

– разностная дисперсия:

$$f_{10} = \sum_{i=0}^{N_g-1} i^2 p_{x-y}(i),$$

где $p_{x-y}(k) = \sum_{i=1}^{N_g} \sum_{j=1}^{N_g} p(i, j) |i - j| = k, k = 0, 1, \dots, N_g - 1$;

– разностная энтропия:

$$f_{11} = - \sum_{i=0}^{N_g-1} i^2 p_{x-y}(i) \log(p_{x-y}(i));$$

– первая информационная мера корреляции:

$$f_{12} = \frac{f_9 - HXY_1}{\max\{HX, HY\}},$$

где $HXY_1 = - \sum_{i=1}^{N_g} \sum_{j=1}^{N_g} p(i, j) \log(p_x(i) p_y(j))$, HX и HY – энтропия $p_x(i) = \sum_{j=1}^{N_g} p(i, j)$ и $p_y(j) = \sum_{i=1}^{N_g} p(i, j)$;

– вторая информационная мера корреляции:

$$f_{13} = \sqrt{1 - \exp(-2HXY_2 - f_9)},$$

где $HXY_2 = - \sum_{i=1}^{N_g} \sum_{j=1}^{N_g} p_x(i) p_y(j) \log(p_x(i) p_y(j))$,

– максимальный коэффициент корреляции:

$$f_{14} = \sqrt{\text{второе по величине собственное значение } Q},$$

где $Q(i, j) = \sum_k \frac{p(i, k) p(j, k)}{p_x(i) p_y(k)}$.

Для каждого расстояния и направления отсчета функции яркости могут быть рассчитаны все 14 признаков Харалика. В связи с чем возникает задача селекции признаков, которые войдут в пространство признаков и будут использованы в дальнейшем на этапе классификации.

Современные средства разработки программного обеспечения дают возможность сосредоточиться на решаемой задаче за счет грамотно выбранного инструментария. В качестве языка программирования в рамках данного исследования используется Python. Python можно отнести к языкам, подходящим для разработки приложений машинного обучения, в арсенале которого присутствует набор библиотек с открытым исходным кодом (NumPy, SciPy, scikit-learn и проч.). Python, являясь интерпретируемым высокоуровневым языком программирования, позволяет быстро проводить эксперименты с различными наборами исходных данных и алгоритмов. Так как изображения представляют собой данные специального вида, к ним также применимы методы интеллектуальной обработки данных, реализованные в библиотеках Python. Также существуют специальные пакеты машинного зрения (mahotas, Skimage, OpenCV и проч.), совместимые с библиотеками систем машинного обучения, что позволяет строить сложные конвейеры машинного зрения.

СТРУКТУРА СИСТЕМЫ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ПОДДЕРЖКИ

Для селекции признаков предлагается использовать методику, предложенную в [11]. Порядок селекции информативных признаков приведен на рис. 4.

В системе классификации признаков текстуры выделяются два модуля: обучения и классификации. На выходе модуля обучения получаем два типа классификатора:

- активный классификатор используется для распознавания дефектов на поверхности металлической полосы;
- тестовый классификатор используется в случае «дообучения» активного классификатора. Используется

для отладки и тестирования процесса распознавания при добавлении новых классов объектов, либо при расширении обучающей выборки. Если в процессе эксплуатации тестовый классификатор дает более высокую верность, чем активный, значит, его можно перевести в статус «активного».

Схема взаимодействия модулей системы классификации признаков структуры изображена на **рис. 5**.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Анализ востребованности металлургической продукции и, в частности, холоднокатаного проката продемонстрировал возрастающую тенденцию объемов его производства в Российской Федерации. Потребители отраслей использования горячекатаного проката выдвигают высокие требования к качеству потребляемой продукции. Эти требования являются вызовом к разработке систем интеллектуальной поддержки системы управления производством, обеспечивая достоверную информацию о качестве продукции.

2. Исследована и проанализирована структура многостадийного производства холоднокатаного стального листа, начиная от стадии выплавки стали до стадии травления, прокатки и цинкования. Результаты системного анализа продемонстрировали отсутствие

модулей интеллектуальной поддержки управления на этапах непрерывной разливки стали и листовой прокатки. Однако на этих этапах представлены и функционируют программно-аппаратные комплексы для сбора графической информации о качестве полуфабриката – заготовки и листа.

3. Наличие графической информации позволяет сформировать базу знаний и на ее основе разработать систему автоматизированного принятия решений о качестве продукции с пониженной долей человеческого фактора. Выполнена селекция текстурных признаков Харалика для выявления нарушения текстуры изображений поверхности холоднокатаного листа для формирования математического обеспечения интеллектуальной поддержки системы управления производством.

4. Использование методов системного анализа, классификации изображений, текстурных признаков Харалика позволило разработать схему взаимодействия модулей системы классификации признаков структуры изображения, на основе которой выполняется проектирование и разработка программного обеспечения для повышения достоверности информации в интеллектуальной системе поддержки принятия решений при управлении процессом производства холоднокатаного проката.

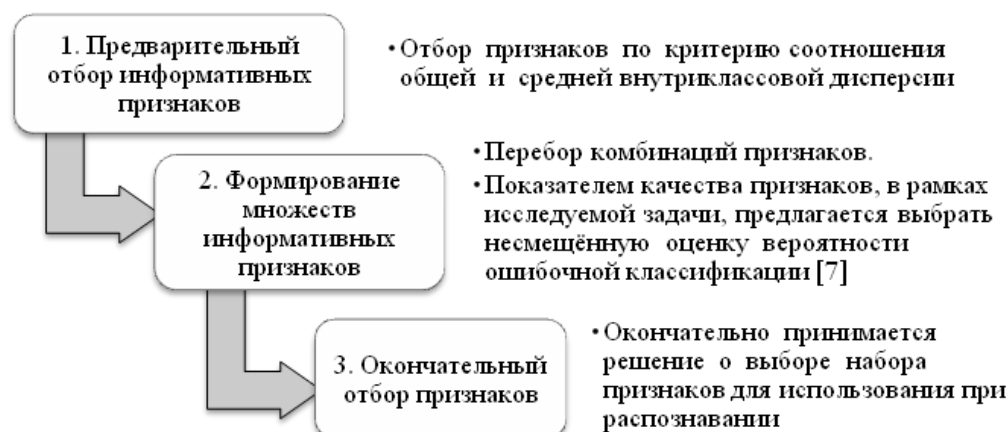


Рис. 4. Этапы селекции признаков для задачи распознавания

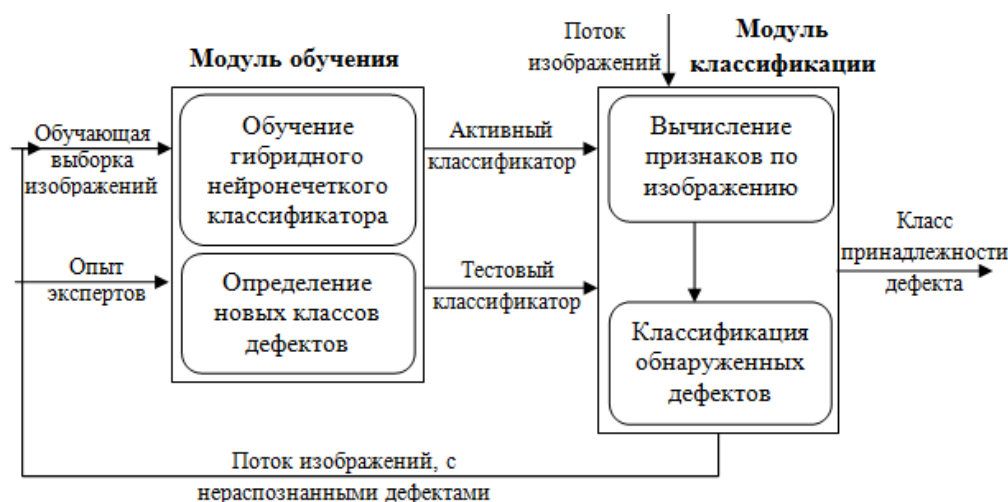


Рис. 5. Схема взаимодействия модулей системы классификации признаков структуры

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мышляев Л.П., Ивушкин А.А. Задачи разработки систем автоматизации управления при импортозамещении // Системы автоматизации в образовании, науке и производстве: труды X Всероссийской научно-практической конференции. Новокузнецк: Изд. Центр СибГИУ, 2015. С. 7.
2. Сайт компании «Аэросталь» [Электронный ресурс]. СПб., 2015. Режим доступа : <http://www.steelaero.ru>, свободный. Загл. с экрана.
3. Сайт компании Worldsteel association [Электронный ресурс]. Brussels, 2015. Режим доступа: <http://www.worldsteel.org>, свободный. Загл. с экрана.
4. Миков А.Ю., Логунова О.С., Маркевич А.В. Обоснование необходимости повышения точности обнаружения дефектов на поверхности холоднокатаного листа для машиностроения // Электротехника. Энергетика. Машиностроение: сб. науч. тр. I Междунар. науч. конф. молодых ученых. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2014. С. 109-111.
5. Logunova O.S., Matsko I.I., Posochov I.A. Integrated system structure of intelligent management support of multistage metallurgical processes // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2013. № 5(45). С. 50-55.
6. Logunova O.S., Matsko I.I., Posohov 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. № 9-12. С. 1407-1418.
7. Логунова О.С., Парсункин Б.Н., Суспицын В.Г. Автоматизированная оценка качества непрерывнолитой заготовки // Сталь. 2004. №12. С. 101-104.
8. Logunova O.S., Posokhov I.A. Classification method of sulfur print image based on characteristics of intensity histogram // Advances in Communication Technology and Systems Proceedings of the 2014 International Conference on Communication Technology and System (ICCTS 2014). Ser. "WIT Transactions on Information and Communication Technologies", 2014. С. 20-29.
9. Мацко И.И., Белявский А.Б., Логунова О.С. Система управления в технологической цепочке производства непрерывнолитой заготовки с использованием автоматизированной оценки качества. // Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах. 2014. №1(4). С. 55-61.
10. Haralick R.M., Dinstein, Shanmugam K. Textural features for image classification // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. 1973. November, vol. SMC-3. P. 610-621.
11. Глумов Н.И., Мясников Е.В. Метод отбора информативных признаков на цифровых изображениях // Компьютерная оптика. 2007. Т.31, №3. С. 73-76.

INFORMATION IN ENGLISH

SOFTWARE AND STRUCTURE OF INTELLECTUAL SUPPORT SYSTEM FOR DECISION-MAKING FOR COLD-ROLLED STEEL SURFACE QUALITY ASSESSMENT MANAGEMENT SYSTEM

Mikov A.Yu., Logunova O.S., Markevich A.V.

The purpose of the present research is to increase information reliability of surface images defects recognition in the automatic mode on the basis of a subsystem of intellectual support for decision-making in the cold rolled steel surface quality assessment control system. To achieve the purpose, the research was carried out is on the structure of cold rolled steel multistage production management, tuples of interconnected process parameters with the structure of the cold rolled steel surface images were defined, selection of texture features of the images was carried out and a scheme of the interaction of modules of the structural features classification system was developed. The research was carried in the period of June – July 2015 under conditions of the sheet rolling shop of one of the largest industrial metallurgical works in the Russian Federation. Methods of system analysis, images classification, Haralick's texture features were used. The main result of the research is a scheme of the interaction of the modules of the images structure features classification system, which makes it possible to design and develop software to improve information reliability in the intelligent decision support system for the management of the cold-rolled sheet production process.

Keywords: cold rolled sheet, surface quality, Haralick's texture features, texture image, multistage production management.

REFERENCES

1. Myshlyayev L.P., Ivushkin A.A. *Zadachi razrabotki sistem avtomatizatsii upravleniya pri importozameschenii* [Development of Automatic Control Systems in the Process of Import Substitution], Automation systems in education, science and manufacturing: Proceedings of X All-Russian scientific conference. Novokuznetsk, Publishing center of SibGIU, 2015. p. 7.
2. Web-site of «Steelaero», St. Petersburg, 2015, Available at: <http://www.steelaero.ru>, free access.
3. Web-site of Worldsteelassociation, Brussels, 2015, Available at: <http://www.worldsteel.org>, free access.
4. Mikov A.Yu., Logunova O.S., Markevich A.V. *Obosnovanie neobkhodimosti povysheniya tochnosti obnaruzheniya defektov na poverkhnosti holodnokatannogo lista dlya mashinostroeniya* [Justification of Necessity to Improve Accuracy of Defects Detection on the Surface of Cold-rolled Sheet for Machine-building], Electrical engineering. Power engineering. Machine-building: collection of scientific papers of I International scientific conference of young scientists, Novosibirsk, Publishing center of NGTU, 2014, pp. 109-111.
5. 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, no.5 (45), pp. 50-55.
6. Logunova O.S., Matsko I.I., Posohov I.A., Lukyanov S.I. Automatic system for intelligent support of continuous cast billet production control processes, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, vol.74, no.9-12, pp. 1407-1418.
7. Logunova O.S., Parsunkin B.N., Suspitsyn V.G. *Avtomatizirovannaya otsenka kachestva nepreryvnolitoi zagotovki* [Automatic Quality Assessment of Concast Billet Quality], Steel, 2004, no.12, pp. 101-104.
8. Logunova O.S., Posokhov I.A. Classification method of sulfur print image based on characteristics of intensity histogram, Advances in Communication Technology and Systems Proceedings of the 2014 International Conference on Communication Technology and System (ICCTS 2014). Ser. "WIT Transactions on Information and Communication Technologies", 2014, pp. 20-29.
9. Matsko I.I., Belyavskiy A.B., Logunova O.S. *Sistema upravleniya v tekhnologicheskoi tsepoche proizvodstva nepreryvnolitoi zagotovki s ispolzovaniem avtomatizirovannoy otsenki kachestva* [Control System in Processing Chain of Concast Billet Using Automatic System of Quality Assessment], System software in industrial and social spheres, 2014, no.1(4), pp. 55-61.
10. Haralick R.M., Dinstein, Shanmugam K. Textural features for image classification, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1973, November, vol. SMC-3, pp. 610-621.
11. Glumov, N.I., Miasnikov E.V. *Metod otbora informativnykh priznakov na tsifrovyykh izobrazheniyakh* [Informative Features Selection in Digital Images], Computer optics, 2007, vol.31, no.3, pp. 73-76.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НОВЕЙШИХ ТЕХНОЛОГИЙ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ НА УСРЕДНИТЕЛЬНЫХ СКЛАДАХ

Представлен анализ проблем усреднения полезных ископаемых на складах в горнодобывающей промышленности. Выявлены ключевые подходы, необходимые для успешной реализации автоматизированной системы управления качеством. Представлена концепция и новейшие технологии системы контроля качества полезных ископаемых на усреднительных складах.

Ключевые слова: полезное ископаемое, контроль качества, усреднительный склад, химический анализ, автоматизированная система.

ВВЕДЕНИЕ

Конкурентоспособность предприятий горнодобывающего комплекса во многом зависит от качества готовой продукции, качества сырья и объемов добываемых полезных ископаемых. Исходя из этого, одним из наиболее важных параметров эффективной работы горнодобывающих и перерабатывающих предприятий является стабильное качество полезного ископаемого, поступающего из карьера на переработку [1,3]. Величина содержания полезного ископаемого в исходном сырье вариативна, она является объектом контроля и воздействия при управлении качеством в потоках карьера и перерабатывающих комплексах. Определение и поддержание качества полезных ископаемых в современной промышленности является задачей автоматизированных систем. Соответственно чем эффективнее работает система управления качеством (в соответствии с заложенными ограничениями, правилами и показателями качества), тем меньше будет величина колебания содержания полезного ископаемого в сырье [3]. Управление качеством полезного ископаемого осуществляется посредством усреднения (приведение к единому показателю качества). Необходимость усреднения качества возникает при существенной изменчивости показателей качества полезных ископаемых, добываемых в карьерах и шахтах и поступающих на переработку, т.к. их нестабильность отрицательно влияет на технологию переработки и её экологические последствия.

На горнодобывающих предприятиях усреднение полезного ископаемого осуществляется [1,2]:

- при планировании горных работ (в соответствии с плановыми объемами и качеством полезного ископаемого устанавливают направление развития горных работ, конкретные участки и блоки месторождения, подлежащие отработке в планируемые календарные сроки);
- на этапе оперативного управления горными работами (регулируется нагрузка на забой);
- на этапе формирования транспортных потоков и смешивания полезных ископаемых в участковых и общерудничном звеньях;
- на этапе формирования усреднительно-перегрузочных складов (далее УПС);
- на этапе отгрузки из складов.

Контрольной точкой усреднения полезного ископаемого перед подачей его в производство или отгрузкой потребителю является усреднительный склад. Таким образом, для обеспечения оптимального качества полезных ископаемых необходимо контролировать и управлять процессом его усреднения в усреднительных складах.

Как показала практика горнодобывающей и перерабатывающей промышленности, усреднение полезных ископаемых в штабелях осуществляется бесконтрольно и на основании неактуальной информации об объеме и химическом составе полезного ископаемого, поступающего на склад. Это вызвано следующими причинами:

- отсутствие актуальной информации химических показателей штабеля;
- неоднородность поступления полезных ископаемых с различными химическими составами;
- задержка информации о результатах химического анализа из лабораторий (задержка может превышать несколько часов);
- отсутствие средств оперативного контроля качества полезного ископаемого;
- отсутствие достоверной и оперативной информации о химическом составе полезного ископаемого в процессе добычи и его переработки.

На основании вышеизложенного предлагается реализация системы контроля качества полезных ископаемых в усреднительных складах (далее Система). Концептуально Система должна обеспечивать следующие функции (в режиме реального времени):

- формирование послойного (по химическому составу полезного ископаемого) состояния штабеля;
- возможность принятия управляющих воздействий на технологический процесс с целью формирования оптимального усреднения полезного ископаемого в штабеле;
- автоматическое определение объема и веса полезного ископаемого в штабеле;
- автоматический расчет среднего химического состава полезного ископаемого в штабеле.

Система предназначена для решения следующих узких вопросов УПС:

- неравномерное распределение материала с учетом угла рассыпания;
- отсутствие достоверных данных о качестве и количестве материала на складах;
- большая задержка при поступлении данных о химическом составе материала;

- неоптимальное усреднение полезного ископаемого;
- отсутствие оперативной информации о текущем состоянии склада.

Архитектура Системы подразумевает наличие трёх подсистем, выполняющих заложенные функции в соответствии с оптимальным решением проблем усреднения (рис. 1):

1. Подсистема определения химического состава материала.
2. Подсистема формирования карты объемов склада.
3. Подсистема отображения данных.

ПОДСИСТЕМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА МАТЕРИАЛА

Подсистема определения химического состава материала предназначена для:

- получения результатов химического анализа материала (в режиме реального времени), поступающего на склад;
- формирование события о появлении нового слоя материала на основании результатов химического анализа (путём проведения анализа на предмет появления материала с другим качеством);
- усреднение результатов химического анализа в слое;
- передачи следующих данных в подсистему формирования карты склада: химический анализ слоя; факт появления нового слоя.

Для получения данных по химическому составу в качестве источников первичной информации может использоваться один или несколько предлагаемых вариантов: промышленный анализатор; химическая лаборатория; переносные анализаторы; данные с сопроводительной документации (паспорт качества и т.д.).

Алгоритм работы подсистемы определения химического состава материала приведен на рис. 2 и заключается в следующем:

- осуществляется ввод уставок на колебания химического состава, на основании которых реализуется событие формирования нового слоя материала;
- осуществляется сбор данных химического анализа в режиме реального времени;
- для увеличения точности расчетов осуществляется фильтрация данных химического анализа по верхним частотам;
- по всем компонентам химического анализа осуществляется сравнение разницы полученных результатов с результатами в предыдущий момент времени с уставками на колебание. Если разница ниже уставок, то осуществляется усреднение результатов химического состава по формуле

$$K_{\text{эл.ср}} = \sum K_{\text{эл}} / k,$$

где $K_{\text{эл.ср}}$ – среднее содержание компонента в слое материала; $K_{\text{эл}}$ – содержание компонента в слое материала; k – количество измерений за время формирования слоя.

Если разница выше уставок, то осуществляется обнуление среднего результата химического анализа и передача события о формировании нового слоя и усредненные результаты химического анализа в подсистему формирования карты склада. Таким образом, выходной информацией подсистемы будет являться средний результат химического анализа слоя материала, поступающего на склад, и событие возникновения нового слоя материала в режиме реального времени.

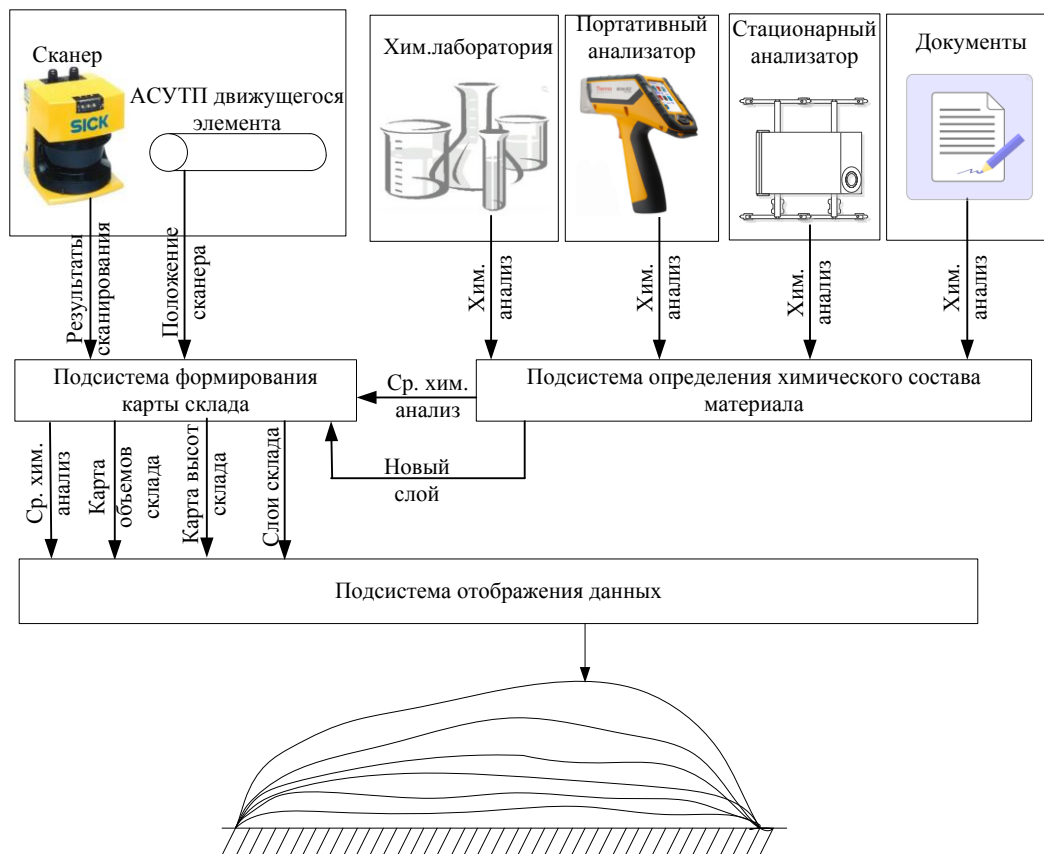


Рис. 1. Архитектура Системы



Рис. 2. Алгоритм работы подсистемы определения химического состава материала

ПОДСИСТЕМА ФОРМИРОВАНИЯ КАРТЫ СКЛАДА

Подсистема формирования карты склада предназначена для выполнения следующих функций в режим реального времени:

- опрос 2D-сканера и датчиков (АСУТП) положения движущегося элемента сканера;
- получение данных с подсистемы определения химического состава материала;
- формирование карты высот склада;
- формирование карты объемов склада;
- послойное формирование склада в зависимости от химического состава поступающего материала.

Для формирования карты высот склада (в режиме реального времени) необходимо формирование массива координат поверхности штабеля. В качестве источника первичной информации для этого может использоваться лазерный 2D-сканер. Для того чтобы обеспечить перемещение 2D-сканера в пространстве, он может быть установлен несколькими способами (рис. 3):

- На движущемся элементе (например, разгрузочная тележка, конвейер и т.д.). При этом зона сканирования будет соответствовать границам перемещения движущегося механизма.
- На опоре над усреднительным складом. При этом необходимо применение сканера с вращением на 360 или 180 градусов, в зависимости от габаритных размеров усреднительных складов. Зона сканирования будет ограничена углом сканирования.

При больших габаритных размерах усреднительных складов возможна установка комплекта лазерных сканеров, которые бы обеспечивали полное покрытие складского пространства.

Для обеспечения своевременной и достоверной информации о текущем состоянии усреднительных складов работа лазерного сканера может иметь как непрерывный, так и дискретный режим работы. Сканирование может осуществляться по какому-либо событию [3]:

- изменение характеристик материала, поступающего на усреднительные склады (смена места выемки, смена

поставщика материала, изменение химического состава и т.д.);

- контрольные временные точки отчетного периода (начало/конец смены, суток, месяца и т.д.).

При агрессивных условиях работы 2D сканера (запыленность, влажность, пиковые температуры и т.д.) необходимо предусматривать защитные средства: защитный кожух; обдув лазерной головки; охлаждение; обогрев и прочие.

На основании полученных данных от 2D-сканера и положения движущегося элемента в подсистеме согласно алгоритму (рис. 4) осуществляется программная обработка данных. При последующем сканировании действия повторяются, в результате чего осуществляется учет и мониторинг послойного формирования (выборки) усреднительного склада [2,3]. Описание алгоритма представлено ниже:

1. Осуществляется ввод следующих исходных данных (пояснения см. на рис. 5, где x – направление перемещения движущегося элемента сканера, y – направление сканирования):

- максимальное и минимальное положение движущегося элемента, перемещающего сканер $x_{\max}$, $x_{\min}$;
- максимальный и минимальный угол сканирования $\alpha_{\max}$, $\alpha_{\min}$ (угол сканирования рассчитывается исходя из фактических размеров склада);
- угол смещения сканирования $\Delta\alpha$;
- размеры сетки склада (n – расстояние, на которое должен сместиться движущийся элемент со сканером, чтобы осуществить расчет карты высот; m – расстояние, через которое должны учитываться точки сканирования, чтобы осуществить расчет карты высот).

2. Осуществляется разбивка складской поверхности на сетку размером $m \times n$ (см. рис. 6). Дискретность разбивки должна быть выбрана на основании требуемой точности расчетов.

3. Осуществляется сбор данных о положении движущегося элемента.

4. Осуществляется сбор данных со сканера.

5. Для увеличения точности расчетов осуществля-

ется фильтрация сканированных данных по верхним частотам [4].

6. Для увеличения точности расчетов, пока движущий элемент осуществляет перемещение сканера на отрезок n , усредняются все его показания при каждом угле сканирования по формуле

$$L_{\text{ср}}(\alpha) = \sum L(\alpha) / k,$$

где $L_{\text{ср}}(\alpha)$ – среднее показание сканера при перемещении его на отрезок n ; $L(\alpha)$ – показания сканера при перемещении его на отрезок n ; α – угол сканирования; k – количество сканирований за время перемещения сканера на отрезок n .

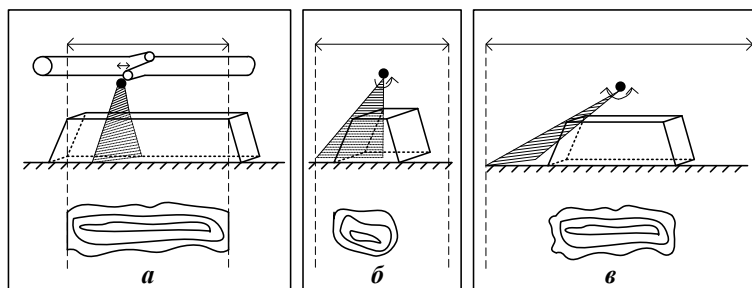


Рис. 3. Методы установки лазерного 2D-сканера

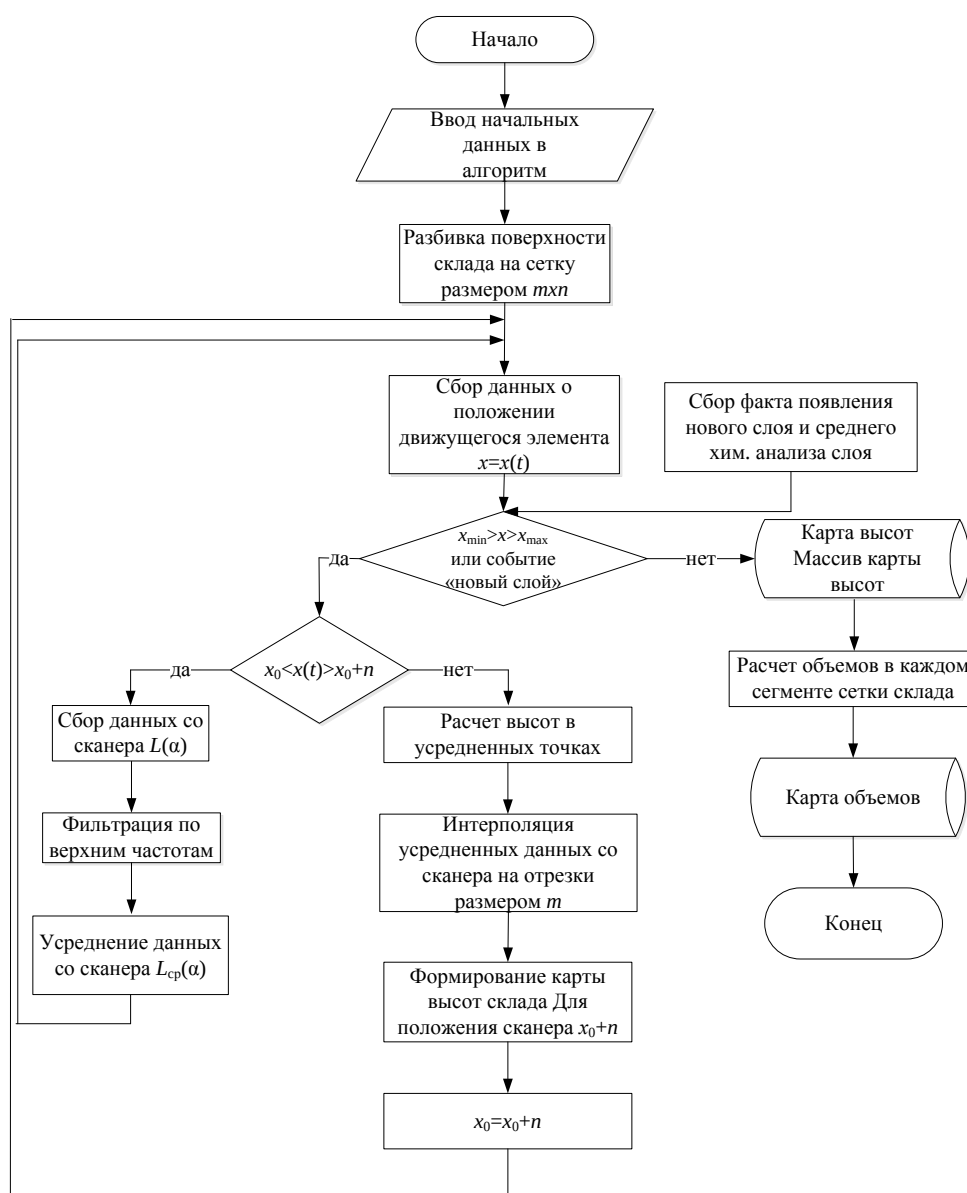


Рис. 4. Алгоритм формирования полигональной сетки штабеля

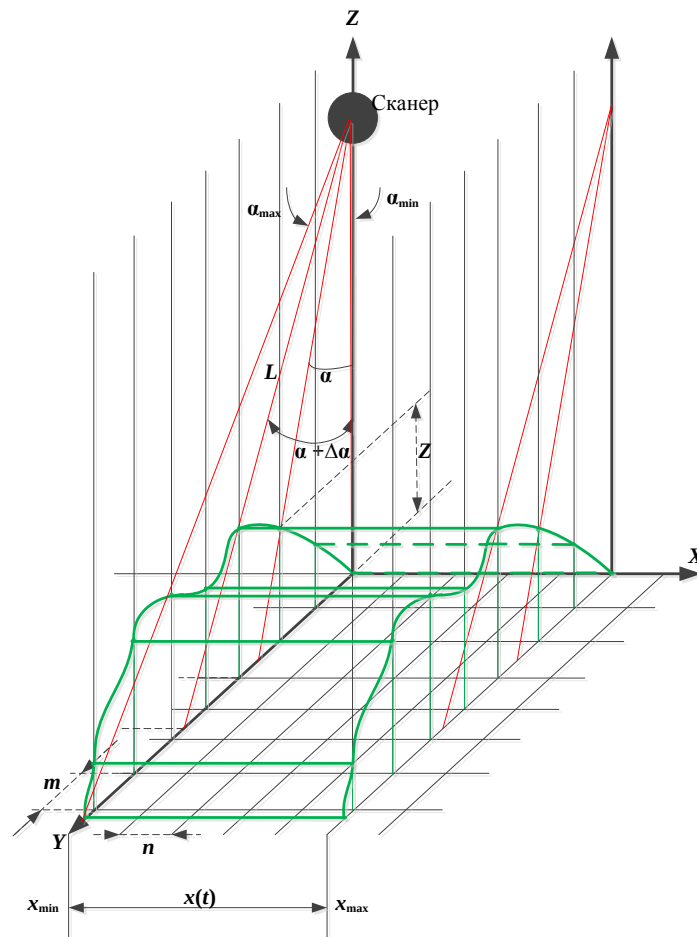


Рис. 5. Пояснения к алгоритму формирования полигональной сетки

7. Рассчитываются высоты в усредненных точках по формуле

$$Z(\alpha) = L(\alpha) \cdot \cos \alpha,$$

где $Z(\alpha)$ – координата точки поверхности склада по оси Z ; $L(\alpha)$ – результат сканирования поверхности склада; α – угол сканирования.

8. Осуществляется интерполяция усредненных данных со сканера на отрезки m по формуле

$$z_3 = z_1 + \frac{y_3 - y_1}{y_2 - y_1} \cdot (z_2 - z_1),$$

где z – расстояние от сканера до поверхности точки; y – расстояние от точки до вертикали сканера.

В результате получается карта высот на отрезке n ($Z[x, y]$) (рис. 6, а). Далее повторяются шаги алгоритма с 3 по 7 до тех пор, пока положение движущего сканера элемента не достигнет граничных значений $x_{\max}$ и $x_{\min}$ или из подсистемы определения химического состава материала не придет событие «Формирование нового слоя». В результате получаем карту высот всего склада (рис. 6, б). Наложение на карту высот склада слоев материала – массив карт высот.

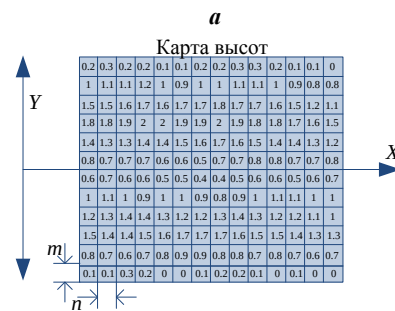
9. Рассчитываются объемы в каждом сегменте склада по формуле

$$V[x; y] = Z[x; y] \cdot n \cdot m,$$

где $V[x, y]$ – карта объемов; $Z[x, y]$ – карта высот.

Выходной информацией подсистемы будет яв-

ляться карта объемов и карта высот склада.



б

Рис. 6. Карта высот:

а – одного отрезка склада; б – всего склада

ПОДСИСТЕМА ОТОБРАЖЕНИЯ ДАННЫХ

Подсистема отображения данных предназначена для отображения пользователям в режиме реального времени следующих данных:

– карта склада по слоям и объем материала на складе;

- средний химический состав материала на складе;
- объем материала на складе по слоям;
- средний химический состав материала на складе по слоям;
- показатель эффективности усреднения материала на складе;
- формирование отчетности и т.д.

Подсистема отображения данных может быть реализована в любом удобном графическом редакторе.

Приведенное описание концепции Системы решает комплекс задач по контролю качества полезных ископаемых и проблемы с актуальностью учетной информации. В основе Системы лежит событийная модель слежения за послойным формированием склада, алгоритм автоматизированного составления актуальной карты склада с ее визуализацией на АРМ. Таким образом, внедрение системы контроля качества полезных ископаемых на усреднительных складах позволит: оперативно управлять процессом усреднения полезного ископаемого за счет принятия решений на основании актуальной информации; оперативно управлять остатками на усреднительных складах; оперативно и достоверно учитывать объемы горнодобывающих и перерабатывающих работ; минимизировать зависимость процесса усреднения от маркшейдерских съемок.

Решение подходит не только для горнодобывающей промышленности, но и для других отраслей, где применяется усреднение на складах в штабелях с новейшими технологиями автоматизации производства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бурмистров К.В., Цуприк Л.С., Бурмистрова И.С. Совершенствование процесса формирования и эксплуатации усреднительных складов на горнодобывающих предприятиях путем применения 2D-сканирования // Комбинированная геотехнология: устойчивое и экологически сбалансированное освоение недр: материалы международной научно-технической конференции, г. Магнитогорск, 2015. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2015. С. 45-46.
2. Панов А.Н., Цуприк Л.С., Бурмистров К.В., Бурмистрова И.С. Обеспечение управления качеством полезного ископаемого при добыче и переработке фосфоритового сырья // Маркшейдерское и геологическое обеспечение горных: сб. науч. трудов по материалам II международной научно-практической конференции / Под ред. Е.А. Горбатовой. Магнитогорск: МДП, 2015. С. 99-105.
3. Азарян В.А. Разработка функциональной схемы управления качеством в рудопотоках карьеров с целью повышения эффективности работы // Качество минерального сырья. 2011. С. 60-64.
4. Лукьянов С.И., Панов А.Н., Васильев А.Е. Основы инженерного эксперимента: учеб. пособие. М.:РИОР: ИНФРА-М, 2014. 99 с.

INFORMATION IN ENGLISH

APPLICATION OF THE LATEST INDUSTRIAL AUTOMATION TECHNOLOGIES TO PROVIDE QUALITY CONTROL OF MINERAL DEPOSITS IN BLENDING STOCKPILES

Panov A.N., Burmistrov K.V., Rybakov A.G., Burmistrova I.S., Bortsov D.N.

The article is concerned with the analysis of the problems of mineral deposits homogenization at warehouses in the mining industry. The key approaches have been identified, which are necessary for successful implementation of an automated quality control system. In addition, the concept of the latest technologies of the quality control system of mineral deposits in blending stockpile were represented.

Keywords: mineral deposits, quality control, homogenization warehouse, chemical analysis, automated system.

REFERENCES

1. Burmistrov K.V., Tsuprik L.S., Burmistrova I.S. *Sovershenstvovanie prtsessa formirovaniya i ekspluatatsii usrednitelnykh skladov na gornodobyvayuschilh predpriyatiyakh putyem primeneniya 2D-skanirovaniya* [Improving of Forming Process and Homogenization Warehouses Operation at Mining Enterprises using 2-D Scanning], Combined geotechnology, sustainable and environmentally sound subsoil management: materi-

als of the international scientific conference, Magnitogorsk, 2015, collection of abstracts, Magnitogorsk, MSTU, 2015, pp. 45-46.

2. Panov A.N., Tsuprik L.S., Burmistrov K.V., Burmistrova I.S. *Obespechenie upravleniya kachestvom poleznogo iskopaemogo pri dobyche i pererabotke fosforitovogo syrya* [Control of Mineral Product Quality in the Process of Mining and Processing of Phosphatic Rock], Surveying and geological support of mining: collection of scientific articles of II International scientific conference, under the editorship of E.A. Gorbatoba, Magnitogorsk, MDP, 2015, pp. 99-105.

3. Azaryan, V.A. *Razrabotka funktsionalnoy skhemy upravleniya kachestvom v rudopotokakh karyerov s tselyu povysheniya effektivnosti raboty* [Development of Functional Diagram for Quality Control in Ore Flows of Open-pit Mines to Improve Operating Efficiency], Quality of mineral ore materials, 2011, pp. 60-64.

4. Lukyanov S.I., Panov A.N., Vasilyev A.E. *Osnovy inzhenernogo eksperimenta* [Fundamentals of Engineering Experiment], textbook, Moscow, RIOR, INFRA-M, 2014, 99 p.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Алтухова Марина Александровна – начальник бюро учета электроэнергии лаборатории электроиспользования центра энергосберегающих технологий, ОАО «ММК», г. Магнитогорск, Россия.

Белый Алексей Владимирович – канд. техн. наук, доцент каф. автоматизированного электропривода и мехатроники, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия.

Борцов Дмитрий Николаевич – магистрант, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия.

Бурмистров Константин Владимирович – канд. техн. наук, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия.

Бурмистрова Ирина Сергеевна – магистрант, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия.

Варганов Дмитрий Евгеньевич – инженер-проектировщик, ООО «ЮГРАЭНЕРГО», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: gtbi@yandex.ru.

Варганова Александра Владимировна – ст. преподаватель, каф. электроснабжения промышленных предприятий, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: aleksandra-khlamova@yandex.ru.

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

Воронин Сергей Григорьевич – д-р техн. наук, зав. каф. "Электромеханика и электромеханические системы", ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (национальный исследовательский университет), г. Челябинск, Россия.

Козлов Сергей Васильевич – аспирант, каф. электротехники и возобновляемых источников энергии, ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (Национальный исследовательский университет), г. Челябинск, Россия.

Корнилов Геннадий Петрович – д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой электроснабжения промышленных предприятий, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: korn_mgn@mail.ru.

Крюков Олег Викторович – канд. техн. наук, доцент, главный специалист, АО «Гипрогазцентр», г. Нижний Новгород.

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

Малафеев Алексей Вячеславович – канд. техн. наук, доцент, каф. электроснабжения промышленных предприятий, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: malapheev_av@mail.ru.

Маркевич Артем Валерьевич – канд. техн. наук, ОАО «ММК».

Мещеряков Виктор Николаевич – д-р техн. наук, зав. каф. электропривода, Липецкий государственный технический университет, г. Липецк, Россия.

Миков Анатолий Юрьевич – ст. преп., каф. вычислительной техники и программирования, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И.

Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: mikov.ayu@gmail.com.

Николаев Александр Аркадьевич – канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрой автоматизированного электропривода и мехатроники, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: alexniko@inbox.ru.

Оленникова Татьяна Борисовна – начальник лаборатории электроиспользования центра энергосберегающих технологий, ОАО «ММК», г. Магнитогорск, Россия.

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

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

Пястолова Дарья Юрьевна – студентка кафедры электрооборудования промышленных предприятий, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: melnikova_dasha1993@mail.ru.

Рыбаков Антон Геннадьевич – инженер отдела АСУП, ЗАО «КонсОМ ККС», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: rubakov.a@konsom.ru.

Савинова Галина Юрьевна – инженер, ОАО «МАГНИТОГОРСКИЙ ГИПРОМЕЗ», г. Магнитогорск, Россия.

Сарваров Анвар Сабулханович – д-р техн. наук, проф., зав. каф. автоматизированного электропривода и мехатроники, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: anvar@magtu.ru.

Серебряков Артем Владимирович – канд. техн. наук, доцент НГТУ им. П.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород.

Сироткин Евгений Анатольевич – аспирант, каф. электротехники и возобновляемых источников энергии, ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (Национальный исследовательский университет), г. Челябинск, Россия. E-mail: ea.sirotkin@gmail.com

Соломин Евгений Викторович – д-р техн. наук, проф., каф. электротехники и возобновляемых источников энергии, ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (Национальный исследовательский университет), г. Челябинск, Россия.

Толчеев Василий Михайлович – магистр, каф. электропривода, Липецкий государственный технический университет, г. Липецк, Россия. E-mail: IHTIS-savior@Yandex.ru.

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

Хафизов Глеб Тагирович – аспирант, каф. "Электромеханика и электромеханические системы", ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (национальный исследовательский университет), г. Челябинск, Россия. E-mail: Bloodnighthorror@mail.ru.

Ягольникова Евгения Борисовна – ст. преподаватель, каф. электроснабжения промышленных предприятий, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: yagolnikovaevgenia@inbox.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Altukhova Marina Aleksandrovna – Chief of Bureau of Electric Power Accounting, Laboratory of electric power consumption, Center of Power Saving Technologies, OJSC "MMK", Magnitogorsk, Russia.

Belyi Aleksey Vladimirovich – Ph.D.(Eng.), Associate Professor, Automated Electric Drive and Mechatronics Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Bortsov Dmitriy Nikolaevich – undergraduate, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Burmistrov Konstantin Vladimirovich – Ph.D.(Eng.), Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Burmistrova Irina Sergeevna – undergraduate, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

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

Khafizov Gleb Tagirovich – a post-graduate student of the department of "Electromechanics and electromechanical systems", FSSFEI HPE "South Ural State University" (national research university), Chelyabinsk, Russia.

E-mail: Bloodnighthorror@mail.ru.

Kozlov Sergey Vasilyevich – postgraduate student, the Department of electrical engineering and renewable energy sources, Federal State State-Financed Educational Institution of High Professional Education "South Ural State University" (national research university), Chelyabinsk, Russia.

Kornilov Gennady Petrovich – D.Sc (Eng.), Professor, Head of the department of electric power supply of industrial enterprises, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: korn_mgn@mail.ru.

Kryukov Oleg Viktorovich – Ph.D.(Eng.), Associate Professor, Main Specialist of JSC "Giprogahtsentr", Nizhny Novgorod.

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

Malafeev Aleksey Vyacheslavovich – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, department of industrial electric power supply, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: malapheev_av@mail.ru.

Markevich Artem Valeryevich – Ph.D. (Eng.), OJSC «MMK».

Mesheryakov Viktor Nikolaevich – D.Sc. (Eng.), head of Electric Drive Department, Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia.

Mikov Anatoly Yuryevich – Assistant Professor, Department of Computer Engineering and Software Engineering, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: mikov.ayu@gmail.com.

Nikolaev Alexander Arkadyevich – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Head of the chair of automated electric drive and mechatronics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: alexniko@inbox.ru.

Olennikova Tatyana Borisovna – Chief of Laboratory of electric power consumption, Center of Power Saving Technologies, OJSC "MMK", Magnitogorsk, Russia.

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

Panova Alexander Nikolaevich – Ph.D. (Eng.), Head of Process Automation Department, CJSC «KonsOM SKS», Magnitogorsk, Russia. E-mail: panov.a@konsom.ru.

Pyastolova Daria Yurievna – student of the department of electric power supply of industrial enterprises, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: melnikova_dasha1993@mail.ru.

Rybakov Anton Gennadyevich – engineer, CJSC «KonsOM SKS», Magnitogorsk, Russia. E-mail: rubakov.a@konsom.ru. E-mail: rubakov.a@konsom.ru.

Sarvarov Anvar Sabulkhanovich – D.Sc. (Eng.), professor, head of Automated Electrical Drive and Mechatronics department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: anvar@magtu.ru.

Savinova Galina Yuryevna – Engineer, OJSC «MAGNITOGORSK GIPROMEZ», Magnitogorsk, Russia.

Serebryakov Artiom Vladimirovich – Ph.D.(Eng.), Associate Professor, Alekseev NGTU, Nizhny Novgorod.

Sirotkin Evgeny Anatolyevich – postgraduate student, the Department of electrical engineering and renewable energy sources, Federal State State-Financed Educational Institution of High Professional Education "South Ural State University" (national research university), Chelyabinsk, Russia. E-mail: ea.sirotkin@gmail.com.

Solomin Evgeny Victorovich – D.Sc.(Eng.), Professor, the Department of electrical engineering and renewable energy sources, Federal State State-Financed Educational Institution of High Professional Education "South Ural State University" (national research university), Chelyabinsk, Russia.

Tolcheev Vasily Mikhailovich – Master of Engineering, Electric Drive Department, Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia. E-mail: IHTIS-savior@Yandex.ru.

Varganov Dmitriy Evgenyevich – project engineer, LLC "YUGRAENERGO", Magnitogorsk, Russia. E-mail: gtbi@yandex.ru.

Varganova Aleksandra Vladimirovna – Assistant Professor, Industrial Power Supply Systems Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: aleksandra-khlamova@yandex.ru.

Vasilyev Alexander Evgenyevich – Ph.D. (Eng.), associate Professor of Electronics and Microelectronics Engineering department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Voronin Sergei Grigorevich – D.Sc. (Eng.), head of the department of "Electromechanics and electromechanical systems", FSSFEI HPE "South Ural State University" (national research university), Chelyabinsk, Russia.

Yagolnikova Evgeniya Borisovna – Assistant Professor, Industrial Power Supply Systems Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: yagolnikovaevgenia@inbox.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), 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).