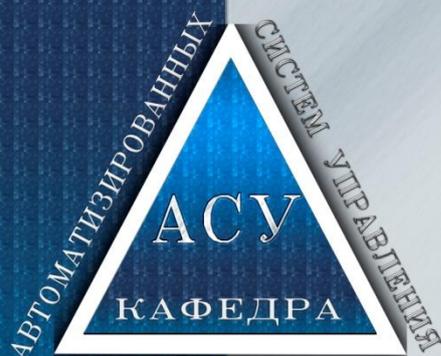


Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
профессионального образования  
«Магнитогорский государственный технический  
университет им. Г.И. Носова»

# АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПРОИЗВОДСТВА

AUTOMATION  
OF TECHNOLOGIES AND  
PRODUCTION

№ 2(8), 2015



# МАГНИТОГОРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМ. Г.И. НОСОВА

## Кафедра «Автоматизированные системы управления»



Зав. кафедрой  
канд. техн. наук, доцент  
**С.М.Андреев**



Докт. техн. наук,  
профессор  
**В.М.Рябков**



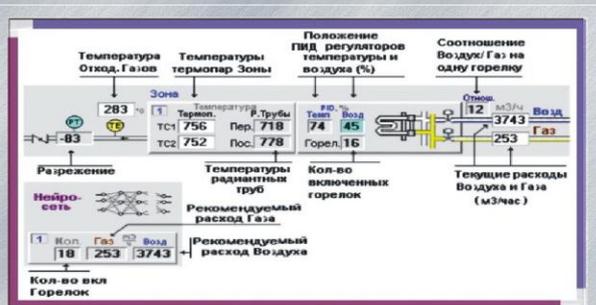
Докт. техн. наук,  
профессор  
**Б.Н.Парсункин**



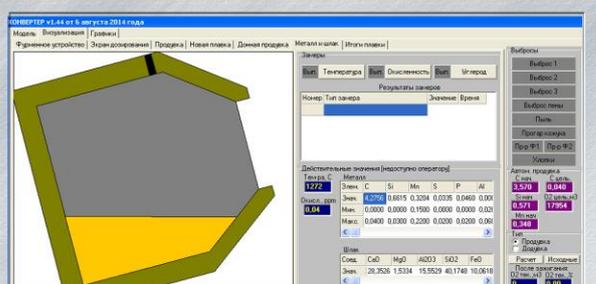
Канд. техн. наук,  
доцент  
**А.И.Блохин**

Кафедра Автоматизированных систем управления (до 2013 – кафедра Промышленной кибернетики и систем управления) была организована 30.04.1975 года приказом № 197 Министерства высшего и среднего специального образования СССР по инициативе первого заведующего кафедрой Виталия Макаровича Рябкова. В разные годы кафедрой руководили профессор Парсункин Борис Николаевич (1975 – 1987 г), доцент Блохин Александр Инокентьевич (1989 – 2005). В настоящее время кафедру возглавляет доцент, канд. техн. наук Андреев Сергей Михайлович.

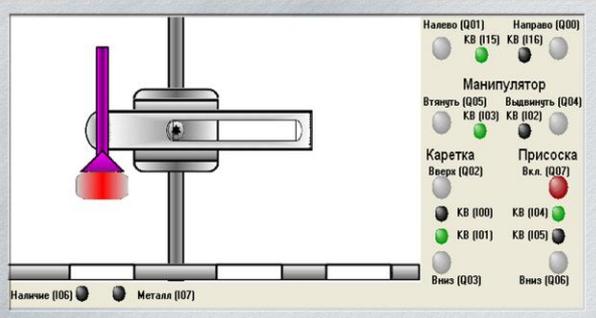
## РАЗРАБОТКИ СОТРУДНИКОВ КАФЕДРЫ АСУ



Интеллектуальные системы управления, основанные на использовании искусственных нейронных сетей и нечеткой логики. Область применения - управление температурными режимами протяжных печей (АНГЦ), процессами дробления материалов, электрическими параметрами ДСП.



Системы обучения управлению на основе комплексных имитационных математических моделей конвертерного процесса, обработки стали в агрегате печь-ковш, агломерационного процесса с учетом качества металлургического агломерата, а также ряда других процессов. Модели используются в составе имитационных тренажеров для обучения сотрудников металлургических предприятий НЛМК и ММК.



Простые и сложные модели объектов управления, предназначенные для обучения программированию промышленных микропроцессорных контроллеров (робот-манипулятор, робот Kuka, лифт, тележка). Каждая модель представляет законченный программный продукт, оснащенный интерфейсами для подключения через протоколы DDE, OPC или для связи со средами симуляции исполнения программы контроллеров S7-300/400 фирмы Siemens.

# АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПРОИЗВОДСТВА

№2 (8) май 2015 г.

Международный научно-технический журнал

Учредитель: ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный  
технический университет им. Г.И. Носова»

## О журнале

Журнал «Автоматизированные технологии и производства» основан в 2012 году на базе сборника «Автоматизация технологических и производственных процессов в металлургии», который издавался кафедрой промышленной кибернетики и систем управления (с 2013 кафедра автоматизированных систем управления - АСУ) с 2004 по 2012 год. В журнале публикуются научные статьи, посвященные автоматизированным системам в промышленности, управлению технологическими процессами и качеством продукции, практическому применению современных методов управления и обучения сотрудников предприятий. Освещаются вопросы, связанные с моделированием систем управления, разработкой промышленных тренажеров и стендов для проведения научных исследований. Приоритетным направлением журнала является освещение результатов работ в области управления процессами черной металлургии, а также решения задач энерго- и ресурсосбережения с использованием оптимизирующих алгоритмов управления. Журнал предназначен для специалистов в области автоматизации технологических процессов, для работников производственных предприятий, эксплуатирующих системы автоматизации, проектных институтов и вузов, специализирующихся в области информационных технологий.

**Основные направления журнала:** автоматизированные системы управления технологическими процессами; системы контроля и управления качеством и экологичностью продукции; математическое моделирование и программное обеспечение производственных процессов; технические средства для автоматизации технологических процессов и производств; автоматизированные технологии в образовании; информационные системы.

## Редакционная коллегия

**Парсункин Борис Николаевич** - д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры автоматизированных систем управления ФГБОУ ВПО Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия;

**Лисиенко Владимир Георгиевич** - Вице-президент АИН, президент РУО АИН, профессор, д-р техн. наук, заведующий кафедрой «Автоматика и управление в технических системах» ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия;

**Салганик Виктор Матвеевич** - доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой обработки металлов давлением ФГБОУ ВПО Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия;

**Вдовин Константин Николаевич** - доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой литейного производства и материаловедения ФГБОУ ВПО Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия;

**Андреев Сергей Михайлович** – канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой автоматизированных систем управления ФГБОУ ВПО Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия;

**Логунова Оксана Сергеевна** - доктор технических наук, заведующий кафедрой вычислительной техники и программирования ФГБОУ ВПО Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия;

**Спирин Николая Александрович** – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой теплофизики и информатики в металлургии, ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия;

**Рябчиков Михаил Юрьевич** - канд. техн. наук, доцент кафедры автоматизированных систем управления ФГБОУ ВПО Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия;

## Контакты

**Главный редактор:** Парсункин Борис Николаевич  
Тел.: (3519) 29-85-58  
**Редакционный совет:** Андреев Сергей Михайлович  
Тел.: (3519) 29-84-32  
E-mail: atp@magtu.ru  
Рябчиков Михаил Юрьевич  
Тел.: +79028910112  
E-mail: mr\_mgn@mail.ru  
**Дизайн:** Рябчикова Елена Сергеевна

**Адрес редакции:** 455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38. Тел.: (3519) 22-14-93.  
Факс (3519) 23-57-60.  
E-mail: rio\_mgtu@mail.ru

Журнал подготовлен к печати издательским центром МГТУ им. Г.И. Носова, 455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38. Отпечатан на полиграфическом участке МГТУ им. Г.И. Носова, 455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38.  
Выходит в свет 05.2015. Тираж 100 экз. Цена свободная.

---

---

## СОДЕРЖАНИЕ

### Математическое моделирование и программное обеспечение производственных процессов

<i>М.Ю. Рябчиков, В.В. Гребенникова.</i> Комплекс моделей автоматизированной системы интеллектуальной поддержки управления качеством металлургического агломерата.....	4
<i>И.Г. Самарина, Е.Ю. Мухина, С.М. Андреев.</i> Разработка структуры нейросетевой математической модели процесса отжига полосы в протяжной печи.....	9
<i>Е.С. Петрякова, И.Н. Идрисов, А.Б. Лымарь, М.В. Вечеркин.</i> Компьютерная модель для исследования пусковых процессов в асинхронных электроприводах.....	14
<i>С.С. Воронин, А.А. Радионов, Д.Ю. Усатый.</i> Использование переключаемых передаточных функций при моделировании работы гидравлического привода.....	17
<i>К.В. Лицин.</i> Разработка высокочастотного фильтра в системе бездатчикового определения углового положения ротора электродвигателя.....	22
<i>Н.С. Сибилева, О.С. Логунова, В.В. Павлов.</i> Теоретико-множественная модель взаимодействия компонентов сложно-структурированной смеси.....	25
<i>А.Г. Саидходжаев.</i> Новый метод определения электрических нагрузок на основе интервальных аналогов интерполяционных сплайнов.....	28
<i>М.Ю. Рябчиков, Т. Г. Сухоносова.</i> Подход к управлению кислородно-конвертерным процессом с использованием комплексных моделей.....	31
<i>М.Ю. Рябчиков, Е.С. Рябчикова.</i> Прикладные модели химических процессов в агрегате печь-ковш используемые в задачах управления и обучения.....	36

### Системы контроля и управления качеством и экологичностью продукции

<i>М.В. Семенов, С.С. Красильников, Д.В. Швидченко, Р.С. Пишинограев.</i> Вибродетектирование шлака при сливе стали из сталковша в промежуточный ковш.....	40
<i>О.В. Березюк.</i> Определение регрессии коэффициента уплотнения твердых бытовых отходов от высоты полигона на основе компьютерной программы "RegAnaliz".....	43
<i>Е.Н. Марченко, Е.А. Завьялов.</i> Повышение срока службы электродвигателей подъема тележки проковша на основе комплексной оценки воздействующих факторов.....	46
<i>Т. Г. Сухоносова, А.И. Сунаргулова.</i> Исследование влияния технического обслуживания на эксплуатационную надежность системы управления.....	49

## ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ

### Оформление

**Количество авторов** – не более 5.

**Размер страницы:** – А4. Все поля – 20 мм.

**Стили:** **УДК:** Times New Roman, обычный, размер 12 пт, выравнивание по левому краю. **Заголовок статьи:** Times New Roman, полужирный, размер 12 пт, межстрочный интервал одинарный, выравнивание по центру. **Фамилия, инициалы авторов:** Times New Roman, полужирный курсив, размер 12 пт, межстрочный интервал одинарный, выравнивание по центру. **Сведения об организации и электронный адрес:** Times New Roman, курсив, размер 11 пт, межстрочный интервал одинарный, выравнивание по центру. Наличие эл. адреса хотя бы одного из авторов является обязательным. **Основной текст:** Times New Roman, обычный, размер 12 пт, межстрочный интервал одинарный, отступ первой строки абзаца 1,25 см, выравнивание по ширине. **Стиль для подзаголовков** (Введение, Актуальность работы, Основные проблемы и решения, Выводы, Заключение и т. д.): Times New Roman, полужирный курсив, размер 12 пт, межстрочный интервал одинарный, выравнивание по левому краю. Наличие подзаголовков не обязательно.

**Рисунки:** Размер рисунков не должен превышать размеров одной страницы; не допускается выполнение рисунков средствами MS Word; рекомендуется использование векторных форматов; не допускается обтекание рисунков текстом с группировкой подписи и рисунка в одно полотно (надпись); файлы рисунков необходимо также приложить отдельно; на все рисунки по тексту должны быть выполнены ссылки по шаблону – рис. номер; подпись рисунка строится по шаблону: Рис. Номер. Наименование рисунка.

**Таблицы:** Перед таблицей должна быть выполнена ссылка по формату – табл. номер. Все таблицы нумеруются и, при необходимости, именуется: шрифт Times New Roman, размер 11 пт, курсив. Выравнивание таблиц – по центру.

**Список литературы:** Список оформляется согласно ГОСТ 7.1–2003. Ссылки на использованные источники даются по тексту и обозначаются цифрами в квадратных скобках (например: [1]).

**Количество ссылок на источники:** не рекомендуется менее 4-х.

**Самоцитирование:** не рекомендуется более 25% от общего числа ссылок.

**Оформление формул:** Формулы выполняются в редакторе MS Equation 3.0 и выравниваются по центру. Нумерация формул необходима, если по тексту есть ссылки на эти формулы. Номера формул (в круглых скобках) выравниваются по правому краю.

**Размерности величин** выбираются и обозначаются согласно ГОСТ 8.417-2002.

### Пример оформления

### Предоставление материалов

УДК 669.1:622

пустая строка

**Контроль качества металлургического агломерата с использованием модели восстановимости**

**М.Ю. Рябчиков<sup>1</sup>, В.В. Гребеникова<sup>2</sup>, Е.С. Рябчикова<sup>3</sup>**

<sup>1,2,3</sup> ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия.

**Control of iron ore sinter properties with reducibility index model**

**M.Y. Ryabchikov<sup>1</sup>, V.V. Grebennikova<sup>2</sup>, E.S. Ryabchikova<sup>3</sup>**

<sup>1,2,3</sup> Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia  
<sup>1</sup>mail@mail.ru

пустая строка

*Аннотация, курсивом. Аннотация, курсивом. Аннотация, курсивом. Аннотация, курсивом. Аннотация, курсивом. Аннотация, курсивом.*

**Ключевые слова:** *ключевые слова; ключевые слова; ключевые слова; ключевые слова; ключевые слова.*

*Abstract, italic. Abstract, italic.*

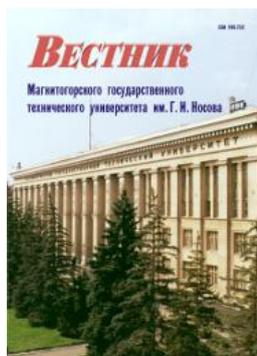
**Keywords:** *keywords; keywords; keywords; keywords; keywords.*

пустая строка

Для опубликования статьи в журнале необходимо представить в электронном виде по e-mail: [atr@magtu.ru](mailto:atr@magtu.ru) текст статьи, сведения об авторах и экспертное заключение о возможности опубликования. Контактный тел.: +79028910112 (Рябчиков Михаил Юрьевич, личный e-mail: [mr\\_mgn@mail.ru](mailto:mr_mgn@mail.ru)).

За достоверность научно-технической информации ответственность несет автор. Перепечатка материалов возможна только с письменного разрешения редакции. При перепечатке ссылка на «Автоматизированные технологии и производства» обязательна.

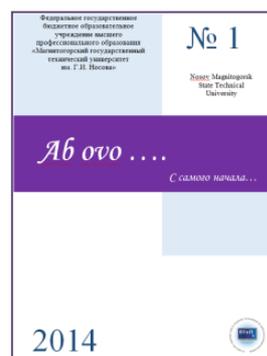
### Другие рекомендуемые периодические издания



Вестник магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова



Электротехнические системы и комплексы



Журнал молодых исследователей: магистров и аспирантов



Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах

**КОМПЛЕКС МОДЕЛЕЙ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ  
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ПОДДЕРЖКИ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ  
МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО АГЛОМЕРАТА**

**М.Ю. Рябчиков<sup>1</sup>, В.В. Гребенникова<sup>2</sup>**

<sup>1,2</sup>ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»,  
г.Магнитогорск, Россия.

**MODELS OF INTELLIGENT ASSISTANCE SYSTEM FOR  
SINTER QUALITY MANAGEMENT**

**M.Yu. Ryabchikov<sup>1</sup>, V.V. Grebennikova<sup>2</sup>**

<sup>1,2</sup>Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

<sup>1</sup>mr\_mgn@mail.ru

**Аннотация.** В данной статье рассматривается структура комплекса моделей для решения задач управления качеством металлургического агломерата и обучения технологов-операторов. Определены требования к модели спекания шихтовых материалов, входящей в комплекс и рассмотрены проблемы ее создания.

**Ключевые слова:** управление качеством металлургического агломерата; комплекс моделей; обучение сотрудников предприятия; комплексная оценка качества агломерата.

**Abstract.** The paper considers the structure of models used for decision making in the process of sinter quality management and engineers' training. We define requirements for the model of batch sintering as a part of the set under consideration. We also view some issues of the model development.

**Keywords:** sinter quality management, set of models, employers' training, integrated sinter quality assessment.

**Структура комплекса моделей, цели и задачи его  
создания**

Разрабатываемый комплекс моделей предназначен для решения двух задач, к которым можно отнести: обучение технологического персонала управлению агломерационным процессом с целью обеспечения требуемого качества производимого агломерата; расчет показателей качества производимого агломерата при известных параметрах смеси железорудных материалов и контролируемых данных о ходе реального процесса спекания.

При решении задачи обучения информационное взаимодействие может быть представлено схемой на рис. 1. С использованием частотной модели возмущений задаются текущие параметры химического состава смеси ЖРС, параметры которой оператор получает периодически в соответствии с моделируемым периодом сбора спектра рентгенофлуоресцентным анализатором [1]. Совместно с информацией о качестве агломерата оператор управляет дозированием известняка и коксика, а также технологическими параметрами спекания.

При решении задач управления качеством агломе-

рата в условиях действующего металлургического производства информационное взаимодействие может быть представлено схемой на рис. 2.

При контроле качества агломерата с использованием моделей часть необходимой информации о состоянии процесса может быть получена непосредственно с датчиков технологической информации. Например, температура в последних вакуумкамерах позволяет оценить завершенность процесса спекания. Однако, ряд технологических параметров, используемых в модели качества агломерата, не доступен для контроля. Чтобы определить, например, время пребывания материалов в высокотемпературном состоянии требуется использование модели спекания.

Таким образом, основу разработанного программного комплекса составляют модель спекания шихтовых материалов, включая процессы окомкования, увлажнения и зажигания, а также модель качества агломерата.

Комплексная оценка качества металлургического агломерата является актуальной задачей с момента появления данного процесса. В работе [2] предложена структура, позволяющая гибко комбинировать результа-



Рис. 1. Схема взаимодействия обучающегося с комплексом моделей

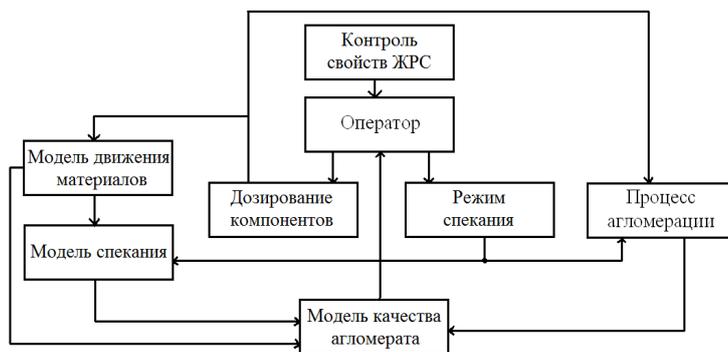


Рис. 2. Схема оператора с системой контроля качества агломерата на базе комплекса моделей

ты расчетов одного показателя качества группой моделей. Из рассмотрения подобных моделей расчета индексов  $TI$ ,  $RI$ ,  $RDI$ ,  $g$  [2, 3] можно сделать вывод о том, что многие известные модели требуют учета влияния на качество технологических параметров спекания, что требует разработки соответствующих моделей.

### Модель процесса спекания шихтовых материалов

Вопросам моделирования процесса спекания шихтовых агломерационных материалов уделено внимание Коротичем В.И. [4], Клейном В.И. [5] и многими другими исследователями [6, 7].

Изучение этих работ показывает, что в настоящий момент получили распространение два подхода, первый из которых [5] предполагает теплотехнический расчет на основе тепловых балансов с определением изменения среднемассовой температуры агломерата по длине агломашины. Второй подход [8, 9] основан на представлении спекаемых материалов набором конечных объемов с расчетом индивидуальных для них температур. Каждый из подходов имеет свои преимущества и недостатки при использовании модели спекания совместно с моделью качества агломерата.

Модель, предложенная в [5] предполагает выполнение расчетов по относительной длине агломашины или, по относительной завершенности процесса спекания. Переход к подобному параметру позволяет задаться геометрическими параметрами зон в соответствии со схемой на рис. 3.

Согласно [5], средняя по высоте температура мате-

риалов определяется из выражения:

$$t_{cp} = \frac{Q_n^p \cdot V_2 + 1000 \cdot \psi \cdot G_{ш} \cdot \left[ \frac{c_t t_{ш}^H}{\psi} + C_{ш} \cdot n^l - 2512 \cdot W_{ш} - 3977 \cdot P_{ш} \right]}{1000 \cdot G_{ш} \cdot c_t \cdot (1 - \psi) + \frac{-3600 \cdot W_T \cdot S \cdot (t_k^2 - t_n^2) \cdot c_t^2}{+ 1000 \cdot G_{ш} \cdot c_t \cdot K_{acn} \cdot \psi}}, \quad (1)$$

$$n^l = 34280 \frac{n_{cm}}{n_{cm} + 1} + 10270 \frac{1}{n_{cm} + 1},$$

где  $G_{ш}$  – расход шихтовых материалов, кг/ч;  $C_{ш}$  – удельный расход углерода на 1 кг шихты, кг/кг;  $W_T$  – скорость фильтрации газа через слой с учетом технологических факторов, м/с;  $t_{ш}^H$  – начальная температура шихты, °С;  $K_{acn}$  – выход аглоспека из шихты меняющийся от 0 до 1 по длине машины, доли;  $S$  – площадь поверхности спека, м<sup>2</sup>;  $t_k^2, t_n^2$  – температуры газа на входе и выходе из слоя спекаемых материалов, °С;  $\psi$  – степень завершенности процессов испарения, декарбонизации и горения твердого топлива меняющийся от 0 до 1 по длине машины, доли;  $n_{cm}$  – стехиометрический коэффициент.

Базовое значение скорости фильтрации газа через слой  $W_0$  определяется согласно выражению:

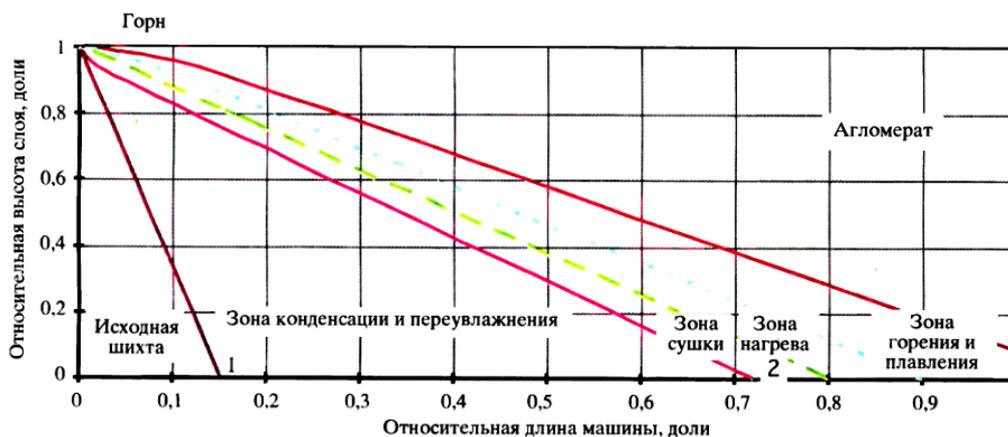


Рис. 3. Схема расположения и относительная высота отдельных зон в продольном сечении агломерируемого слоя [5]

$$W_0(i) = a \cdot \frac{1}{\sqrt{K_\Sigma(i)}}, \quad K_\Sigma = K_t \cdot K_{cmp},$$

$$K_{cmp} = K_{ок} \sum_{j=1}^6 \frac{h_j}{h_\Sigma} \cdot \xi_j, \quad K_t = \frac{t_i + 273}{t_{ш} + 273}, \quad (2)$$

где  $K_\Sigma$  – суммарный коэффициент газодинамического сопротивления;  $t_{ш}, t_i$  – среднemasовые температуры исходной шихты и  $i$ -го участка, °C;  $h_j$  – высоты указанных на рис. 3 зон ( $j=1 \div 6$ ) для  $i$ -го участка;  $\xi_j$  – относительные сопротивления зон;  $a$  – величина, зависящая от свойств шихты и определяемая экспериментально;  $K_{ок}$  – определяет влияние процесса увлажнения и окомкования.

В процессе создания модели агломашины К-3-75 для условий ОАО «Северсталь» были подобран параметр  $a = 1.97$ . Относительные сопротивления зон при этом принимались на уровне, рекомендуемом в [5].

Однако фактическая скорость фильтрации газа может зависеть и от других технологических факторов, например, степени открытия шиберов вакуум-камер влияющей на развиваемый напор. Приняли, что  $W_T = W_0 \cdot W_{II}$ , где  $W_{II}$  определяли из выражения, предложенного в [10]:

$$dP = L \cdot p \cdot W_{II} \cdot (k_1 \cdot \nu + k_2 \cdot W_{II}), \quad (3)$$

где  $dP$  – перепад давления на слое;  $L$  – длина канала;  $W_{II}$  – скорость фильтрации газа;  $p$  – плотность газа;  $\nu$  – динамическая вязкость;  $k_1, k_2$  – коэффициенты, зависящие от материала и профиля канала.

Приняв  $dP$  в (3), исходя из вакуума в верхней части газоотвода (10780 Па), уровня подсосов и степени открытия шибера на развиваемый напор определяем  $W_{II}$ . В расчетах учитываются зависимости  $p, \nu$  от температуры газа, принимаемой, исходя из  $t_{cp}$ . На рис. 4 показаны рассчитанные для условий машины К-3-75 зависимости  $W_T, W_0, W_{II}$  от относительной длины ленты при высоте слоя 0,27 м.

Полученные значения скорости фильтрации газа через слой привязаны к относительной длине ленты,

значение 1 которой означает завершение процессов спекания. Для расчета процесса в привязке к реальной длине ленты требуется расчет фактической скорости спекания материалов, который выполняли двумя способами. Способ [5] предполагает использование для этого зависимости:

$$W_{СП2} = 69 \cdot n^2 \cdot W_T^n, \quad n = \frac{0,0574}{1000} \cdot dP \cdot h_{ш}, \quad (4)$$

где  $W_{СП2}$  – скорость спекания, мм/мин;  $h_{ш}$  – высота слоя шихты, м.

Способ [4] основан на определении кажущейся теплоемкости шихты:

$$C_{PK} = C_{p\phi} + \frac{\left( Q_{ш} + Q_{II} - \frac{Q_C}{K_C} - Q_D \right)}{1100}, \quad (5)$$

где  $C_{PK}$  – кажущаяся теплоемкость шихты, кДж/кг\*К;  $Q_C$  – тепло горения углерода шихты, кДж/кг с.ш.;  $Q_{ш}$  – тепло плавления шихты (приняли 261 кДж/кг с.ш.);  $Q_{II}$  – тепло диссоциации известняка;  $C_{p\phi}$  – истинная теплоемкость шихты при 1100 °C (приняли 1,16 кДж/кг\*К);  $Q_D$  – тепло прочих экзотермических процессов (приняли  $0,1 \cdot Q_C$ ).

Скорость спекания определяется из выражения:

$$W_{СП1} = \frac{1000 \cdot 60 \cdot W_T \cdot C_{p\Gamma}}{C_{PK} \cdot \rho_{нас}}, \quad (6)$$

где  $W_{СП1}$  – скорость спекания, мм/мин;  $C_{p\Gamma}$  – теплоемкость газа (1,38 кДж/кг\*К);  $\rho_{нас}$  – насыпная плотность шихты, кг/м<sup>3</sup>.

Для расчета скорости спекания при нахождении материалов под горном использовали комплекс  $X$ , предложенный в [5], зависящий от температуры газа под горном  $t_3$ , содержания в шихте углерода кокса  $C_{ш}$  и фракционного состава шихты, который оценивали параметром:

$$d_{cp} = 20 \cdot \sum_{k=1}^8 m_k d_k - 20, \quad (7)$$

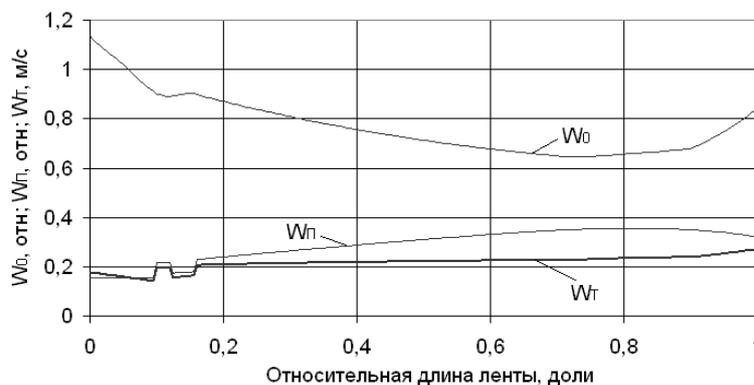
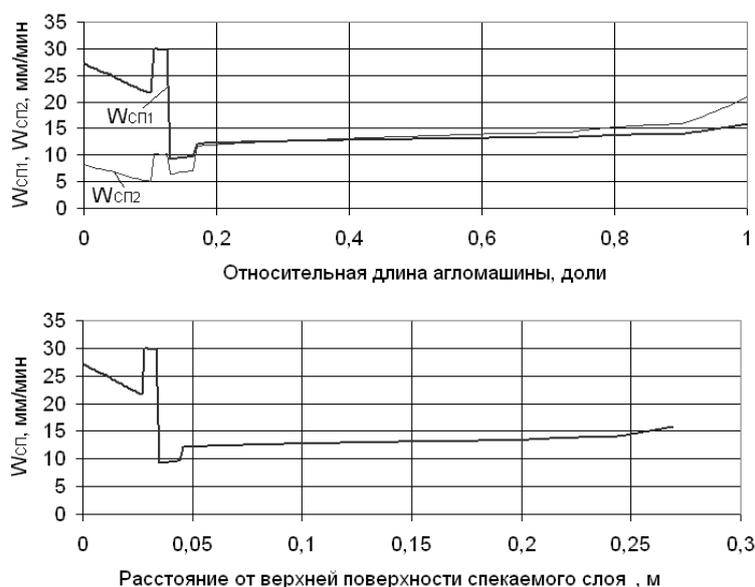


Рис. 4. Рассчитанные для условий машины К-3-75 зависимости  $W_T, W_0, W_{II}$  от относительной длины ленты



**Рис. 5. Рассчитанные зависимости скоростей спекания  $W_{СП1}$ ,  $W_{СП2}$  от относительной длины агломашины и расстояния от верхней поверхности спекаемого слоя для условий машины К-3-75**

где  $m_k$  – массовая доля фракции со средним диаметром частиц  $d_k$ .

Тогда результаты работы [5] можно представить в виде зависимостей:

$$X = Z_1 \cdot Z_2 \cdot Z_3,$$

$$Z_1 = 1.223 + 0.01114 \cdot d_{cp} - 0.000594 \cdot t_3 - 0.00007312 \cdot d_{cp}^2,$$

$$Z_2 = 0.567 - 0.1056 \cdot C_{ш} + 0.001467 \cdot t_3 - 0.0003 \cdot C_{ш} \cdot t_3 + 0.03377 \cdot C_{ш}^2,$$

$$Z_3 = 2.1045309 \cdot 10^{12} \cdot t_3^{-4},$$

где  $C_{ш}$  – процентное содержание углерода в шихте, %.

Согласно [5] отношение объема теплоносителя, приходящегося на единицу обрабатываемой шихты, характеризуется комплексом:

$$X = 60 \frac{\tau_3 \cdot W_T}{h \cdot \rho_{нас}} = \frac{60 \cdot W_T}{W_{СПГ} \cdot \rho_{нас}}, \quad (8)$$

где  $\tau_3$  – время нахождения слоя в зоне зажигания, мин;  $X$  – отношение объема теплоносителя к массе обрабатываемой шихты;  $h$  – глубина прогрева слоя, м;  $W_{СПГ}$  – скорость спекания под горном.

Параметр  $X$  тем меньше, чем выше температура зажигания  $t_3$  и содержание углерода в шихте  $C_{ш}$ , и тем больше, чем крупнее куски шихты; он позволяет по заданным  $t_3$ ,  $C_{ш}$  и крупности шихты в первом приближении оценивать необходимое для зажигания время или рассчитать скорость спекания под горном  $W_{СПГ}$  из выражения (8).

Результаты расчета скоростей спекания для условий машины К-3-75 показаны на рис. 5. Колебания скорости спекания на начальном этапе, также как и колебания скорости фильтрации газа на рис. 4 связаны с

заданными различными значениями степени открытия шиберов первых вакуум-камер.

Комплекс  $X$  также использовали при определении параметра  $\psi$  в (1). Принято, что недостаток времени пребывания материалов под горном приводит к пропорциональному снижению  $\psi$  на протяжении всего последующего процесса.

Кроме параметров, определяющих газодинамическое сопротивление, зажигание и скорость спекания важным параметром адаптации модели в (1) является стехиометрический коэффициент  $n_{см}$ . В ходе настройки модели была принята зависимость

$$n_{см} = -8 \cdot l_{омн}^2 + 8 \cdot l_{омн} + 2.5,$$

где  $l_{омн}$  – относительная длина машины.

Одним из недостатков рассмотренной модели является фиксация размеров зон по относительной длине машины. В некоторой степени влияние отклонения реального процесса от принятой на рис. 3 схемы учитываются принятой зависимостью для  $n_{см}$  в (1). Однако для более полного учета влияния расхода коксика на газовую динамику целесообразно относительное сопротивление зоны горения и плавления  $\xi_{нл}$  сделать переменным. Рост расхода кокса увеличивает сопротивление за счет того, что зона становится шире. В модели геометрические размеры зоны постоянны, но сопротивление  $\xi_{нл}$  увеличивается, чтобы это компенсировать согласно зависимости:

$$\xi_{нл} = 2.5 \cdot (0.01875 \cdot (C_{ш} + 1)^4 - 0.220833 \cdot (C_{ш} + 1)^3 + 1.08125 \cdot (C_{ш} + 1)^2 - 2.379167 \cdot (C_{ш} + 1) + 2.75) \quad (2.9)$$

где  $C_{ш}$  – процентное содержание углерода в шихте, %.

Расчет содержания  $FeO$  в агломерате, определяющего степень восстановления железа непосредственно в самом агломерационном процессе, выполнялся по методике [4]. Согласно ей выполняется оценка состава отходящих агломерационных газов с учетом содержания углерода в шихте и определяется количество  $CO$  пошедшее на восстановление оксидов железа.

Таким образом, созданная для условий машины К-3-75 модель процесса спекания позволяет определить законченность процессов спекания при изменяющемся содержании углерода в шихте, известных условиях зажигания, высоте слоя материалов, режимах увлажнения и окомкования (с учетом основности) через коэффициент  $K_{ок}$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Гребенникова, В.В.** Обзор рентгенофлуоресцентных анализаторов для контроля свойств рудных материалов [Текст]/ В.В.Гребенникова, Н.В.Богданов, М.Ю.Рябчиков, Е.С.Рябчикова // Приборы. 2014. - № 11. -С. 45-50.
2. **Рябчиков, М.Ю.** Моделирование комплексного влияния производственных факторов на механическую прочность металлургического агломерата [Текст] / М.Ю.Рябчиков, В.В.Гребенникова // Металлург. 2013. -№ 4. -С. 40-47.
3. **Рябчиков, М.Ю.** Контроль качества металлургического агломерата с использованием модели восстановимости [Текст] / М.Ю.Рябчиков, В.В.Гребенникова, Е.С.Рябчикова // Сталь. 2014. -№ 2. -С. 4-8.
4. **Коротич, В.И.** Агломерация рудных материалов [Текст] /В.И.Коротич, Ю.А.Фролов, Г.Н. Бездежский // Екатеринбург: ГОУ ВПО “УГТУ-УПИ”, 2003. 400 с.
5. **Клейн, В.И.** Теплотехнические методы анализа агломерационного процесса [Текст] / Клейн В.И., Майзель Г.М., Ярошенко Ю.Г., Авдеенко А.А. // Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2004. 224 с.
6. **Базилевич, С.В.** Агломерация [Текст]/ С.В.Базилевич, Е.Ф. Вегман // – М. Металлургия. 1967. 368 с.
7. **Жилкин, В.П.** Производство агломерата. Технология, оборудование, автоматизация[Текст] / В.П. Жилкин, Д.Н.Доронин // -Екатеринбург: Уральский центр ПР и рекламы, 2004, 292 с.
8. **W. Yang, K. Yang, S. Choi.** Numerical Investigation of Effects of Fuel Characteristics on an Iron Ore Sintering Process // 5<sup>th</sup> Asia-Pacific Conference on Combustion, P. 101-104.
9. **Won Yang, Changkook RYU, Sangmin CHOI, Eungsoo CHOI.** Modeling of Combustion and Heat transfer in an Iron Ore Sintering Bed with Considerations of Multiple Solid Phases / ISIJ Instrumental, Vol. 44 (2004), No. 3, pp. 492-499.
10. **Коротич, В.И.** Газодинамика агломерационного процесса [Текст] / В.И.Коротич, В.П. Пузанов // – М. Металлургия, 1969, 208 с.

## РАЗРАБОТКА СТРУКТУРЫ НЕЙРОСЕТЕВОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ОТЖИГА ПОЛОСЫ В ПРОТЯЖНОЙ ПЕЧИ

И.Г. Самарина<sup>1</sup>, Е.Ю. Мухина<sup>2</sup>, С.М. Андреев<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г.Магнитогорск, Россия.

## THE DEVELOPMENT OF STRUCTURAL NEURAL NETWORK MATHEMATICAL MODEL OF THE PROCESS OF ANNEALING STRIP IN LINGERING FURNACE

I.G.Samarina<sup>1</sup>, E.Yu. Mukhina<sup>2</sup>, S.M. Andreev<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

<sup>1</sup>ig\_samarina@inbox.ru

**Аннотация.** Рассматривается процесс разработки модели нагрева металла при отжиге в протяжной печи, на основе искусственных нейронных сетей с использованием экспериментальных данных, полученных на действующем агрегате.

**Ключевые слова:** агрегат непрерывного горячего цинкования, протяжная печь, модель, искусственная нейронная сеть.

**Abstract.** The process of developing a model of metal heating at annealing in lingering furnace on the basis of the artificial neural network with the use of the experimental data obtained on the operating unit.

**Keywords:** continuous hot-dip galvanizing, lingering furnace, model, artificial neural network.

Так как протяжные печи относятся к объектам с распределенными параметрами, то автоматизация тепловых и технологических режимов связана с трудностями [20, 21] при математическом описании процессов термообработки. Для таких объектов наиболее эффективно использовать нейросетевые модели [1, 2, 13-18], настроенные по реальным параметрам технологического процесса отжига полосы на агрегате непрерывного горячего цинкования.

Задавшись архитектурой нейросетевой модели и используя алгоритм обучения можно значительно упростить процесс моделирования, заменив его автоматическим поиском весовых коэффициентов модели [3, 4, 5].

Широкое применение нашли многослойные искусственные нейронные сети (ИНС), что обусловлено их способностью, моделировать произвольные нелинейные непрерывные функции в результате обучения на множестве примеров [6].

Выбор внутренней структуры ИНС позволяет максимально адаптировать логику ее работы реальному объекту и достаточно существенно повысить ее точность, как модели. При этом определяющим может быть не только степень равномерности данных, но и разная сложность описания влияния факторов на выходной параметр.

Рассмотрим разработку структуры модели отделения нагрева АНГЦ-1 [7] подробно. На *рис. 1* представлена схема взаимодействия системы управления нагрева и ИНС.

Для разработки статистической модели динамического процесса с использованием ИНС необходимо формирование специальной модельной базы данных.

Формирование базы осуществлялось из массива

информации.

Для разработки статистической модели динамического процесса с использованием ИНС необходимо формирование специальной модельной базы данных. Формирование базы осуществлялось из массива информации, накопленной за годы работы агрегата (в работе исследовались данные за два года работы агрегата). Данные в массив сохранялись через каждые 5 с для всего сортамента выпускаемой продукции и всех возможных технологических режимов работы агрегата – толщина, ширина полосы и марки стали. В итоге была получена обучающая выборка. Для целей обучения и тестирования данная выборка была разделена на две части. Но как отмечалось в [7] есть проблемные области, где нет экспериментальных данных. Способ решения этой проблемы предложен в [8].

Согласно поставленным задачам, были использованы следующие параметры (для определенной марки стали): температура в каждой из зон; расход воздух; скорость полосы; толщина и ширина полосы.

Как отмечалось ранее, на изучаемом объекте эффективно использовать ИНС. Так как они имеют универсальные возможности аппроксимации и адаптации, что делает их полезным инструментом для решения задач идентификации.

Основным недостатком ИНС является невозможность работы с предварительно не обработанными данными.

Поэтому после сбора данных необходимо выполнить предварительную обработку данных для обучения ИНС:

– приведение всех данных к числовому виду, то есть кодирование данных;

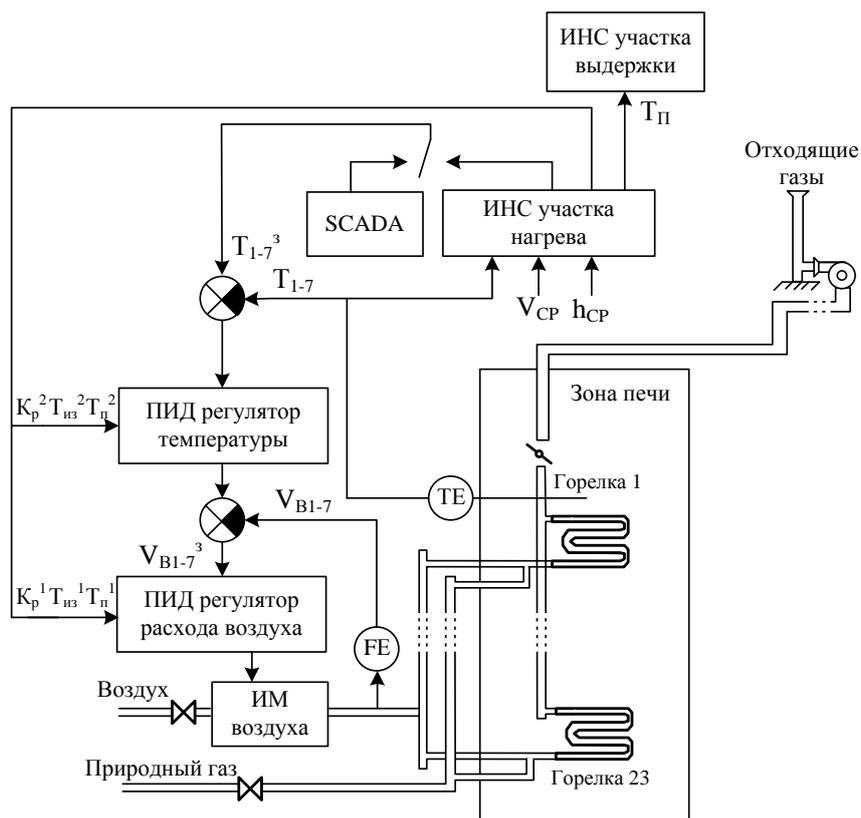


Рис. 1 Схема системы управления нагрева полосы на АНГЦ

– удаление грубых погрешностей и их кластеризация;

– представление данных в такой форме чтобы они имели равномерное распределение по всему диапазону своего значения; приведение данных к единому интервалу значений,  $[-1 \dots 0 \dots 1]$  или  $[-1 \dots 1]$ , (масштабирование).

Приведение данных к единичному масштабу обеспечивается нормировкой каждой переменной на диапазон разброса ее значений. В простейшем варианте это – линейное преобразование в единичный отрезок в соответствии с формулой:

$$\tilde{x}_i = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}},$$

где  $\tilde{x}_i$  – масштабированное значение;  $x_i$  – масштабируемое значение;  $x_{\min}$  – минимальное значение масштабируемого параметра;  $x_{\max}$  – максимальное значение масштабируемого параметра.

Линейное преобразование не всегда способно нормировать основную массу данных и одновременно ограничить диапазон возможных значений этих данных. Поэтому используют нелинейное преобразование, которое нормирует данные и гарантируя, что  $\tilde{x}_i \in [0, 1]$ :

$$\tilde{x}_i = f\left(\frac{x_i - \bar{x}}{\sigma}\right),$$

где  $\bar{x}$  – среднее значение масштабируемого параметра,  $\sigma$

– значение дисперсии масштабируемого параметра [9].

После обработки экспериментальных данных [19], мы получаем обучающую выборку с равномерным распределением входной величины, где все значения нормированы, приведены к единичному интервалу и единообразно закодированы. Равномерное распределение данных в обучающей выборке позволяет создать адекватную нейросетевую модель с предсказуемым поведением на всем диапазоне изменения технологических характеристик моделируемого объекта.

Важной задачей в построении любой ИНС является выбор структуры нейросети. Выбор обуславливается спецификой и сложностью решаемой задачи и основывается на опыте и интуиции разработчика.

Имеются следующие основополагающие принципы при выборе структуры ИНС: возможности сети возрастают с увеличением числа ячеек сети, плотности связей между ними и числом выделенных слоев; введение обратных связей наряду с увеличением возможностей сети поднимает вопрос о динамической устойчивости сети; сложность алгоритмов функционирования сети (в том числе, например, введение нескольких типов синапсов – возбуждающих, тормозящих и др.) также способствует усилению мощи ИНС [10].

Одним из основных критериев выбора архитектуры для нейросетевой модели служит простота реализации на конечных элементах: программируемых логических контроллерах и невысокая вычислительная сложность используемых алгоритмов. Данный критерий является значимыми, поскольку конечная модель будет реализована средствами технической автоматизации, которые ограничены по своим вычислительным ресурсам.

Для решения поставленной задачи целесообразно использовать полносвязную ИНС прямого распространения – Multi Layer Perceptron (MLP) так называемый многослойный перцептрон.

Структура ИНС может быть многослойной [11], но как показывает анализ экспериментальных работ, увеличение числа скрытых слоев более двух не дает существенного улучшения точности распознавания входных образов, зато увеличивается трудоемкость обучения [12, 6].

Количество нейронов в скрытых слоях зависит от объема обучающей выборки, ее характера, требуемой точности осуществления прогноза. В общем случае требуемое количество нейронов в слоях определяется экспериментально в каждой задаче прогнозирования конкретного объекта.

В ряде источников описаны стандартные рекомендации и положения по вопросу выбора и построения различных архитектур НС. Общий принцип выбора числа нейронов в скрытом слое для НС с одним скрытым слоем имеет следующий вид:

- число нейронов в скрытом слое должно быть как минимум в 1,5-2 раза больше числа нейронов во входном слое;
- в общем случае, основной смысл числа нейронов в скрытом слое определяет размерность системы координат, в который проецируется входной вектор.

Если в НС слишком мало нейронов или слоев, то НС не обучится и ошибка при работе сети останется большой. Превышение требуемого количества нейронов тоже мешает работе, поскольку НС становится неспособна к обобщению (т.е. в плохо заполненных обучающими данными интервалах изменения входных – выходных параметров выходной вектор ИНС начинает непредсказуемо меняться).

В процессе обучения ИНС коэффициенты весов синаптических связей часто становятся очень большими, что приводит к параличу сети. Чтобы избежать этого, в прогнозирующей НС использовалась сигмоидная функция  $f$  активизации нейронов (рис.2,а) или функция гиперболического тангенса (рис.2,б), так как данные функции стремятся к предельным значениям, никогда не достигая их.

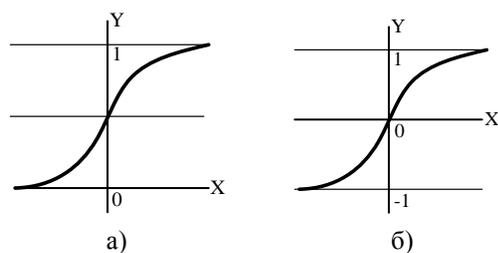


Рис. 2. Виды активационной функции

а – сигмоид  $f(x) = \frac{1}{1 + e^{-ax}}$ ; б – гиперболический тангенс  $f(x) = \frac{e^{2x} - 1}{e^{2x} + 1}$

Использование такого вида функций активации позволяет обеспечить заданную точность аппроксимации при меньшей размерности сети. Единственным и жестким требованием к виду функций активации нейронов, выдвигаемым алгоритмами обучения, остается требование дифференцируемости функции.

В качестве алгоритма обучения ИНС был выбран модифицированный алгоритм обратного распространения ошибки – RPROP (resilient back propagation). Происходит распространение сигналов ошибки от выходов НС к ее входам, в направлении, обратном прямому распространению сигналов в обычном режиме работы [8].

В общем случае задача обучения ИНС сводится к нахождению некоей функциональной зависимости  $Y=f(X)$  где  $X$  – входной, а  $Y$  – выходной векторы. В общем случае такая задача, при ограниченном наборе входных данных, имеет бесконечное множество решений. Для ограничения пространства поиска при обучении ставится задача минимизации целевой функции ошибки НС, которая находится по методу наименьших квадратов:

$$\varepsilon(w) = \frac{1}{2} \sum_{j,p} (Y_{j,p}^{(N)} - d_{j,p})^2,$$

где  $Y_{j,p}^{(N)}$  – реальное выходное состояние нейрона  $j$  выходного слоя  $N$  нейронной сети при подаче на ее входы  $p$ -го образа;  $d_{j,p}$  – идеальное (желаемое) выходное состояние этого нейрона;  $\varepsilon(w)$  – минимизируемая целевая функция ошибки ИНС.

Минимизация ведется методом градиентного спуска, методика описана в работе [1].

Выбор наилучшей структуры производится по следующим показателям настройки: среднеквадратическое отклонение  $E_{СК}$  (MSE – Mean Square Error); среднее по выборке значение абсолютного отклонения  $E_{АБ}$  (MAE – Mean Abs Error); максимальное по выборке значение абсолютного отклонения  $E_{МАХ}$  (MAX Abs Error) [12]. На рис. 3 представлена оптимальная структура ИНС по перечисленным показателям (рис. 4 - 6).

Анализируя полученные графики, можно сделать вывод, оптимальной является структура с одним скрытым слоем и 30 нейронами в нём. При такой структуре сети среднее абсолютное и среднеквадратическое отклонение минимальны, хотя максимальное отклонение по тестовой выборке меньше у сети с двумя скрытыми слоями. Отсутствие монотонной зависимости среднеквадратических и абсолютных отклонений объясняется тем, что за счет усложнения структуры сети путем увеличения числа нейронов в слое или скрытых слоях НС становится неспособной к обобщению данных.

Таким образом, выбор наиболее рациональной структуры ИНС обуславливается видом задач, предполагаемых для решения с помощью данной ИНС. И сводится к поиску такого набора признаков, который при минимальных временных и энергетических затратах (числе обучающих эпох и т.д.) даст наилучший результат.

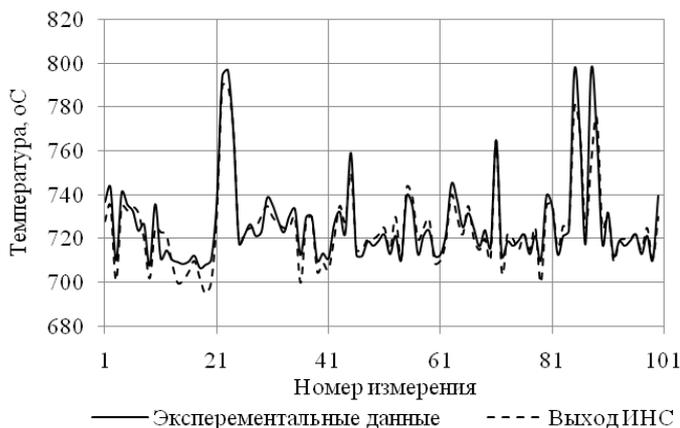
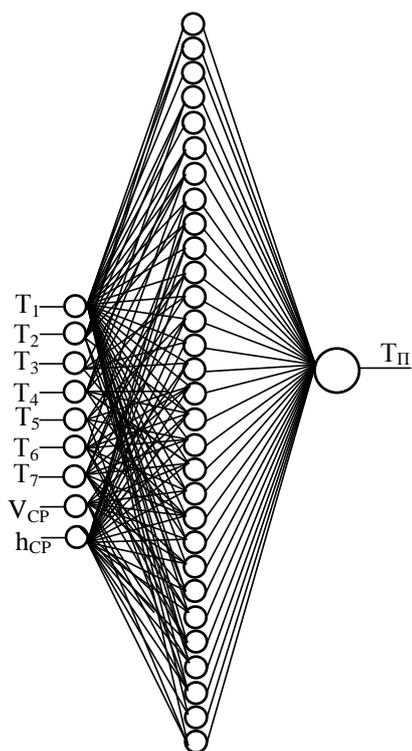


Рис. 3. Архитектура ИНС модели участка нагрева 9-30-1 и результаты обучения

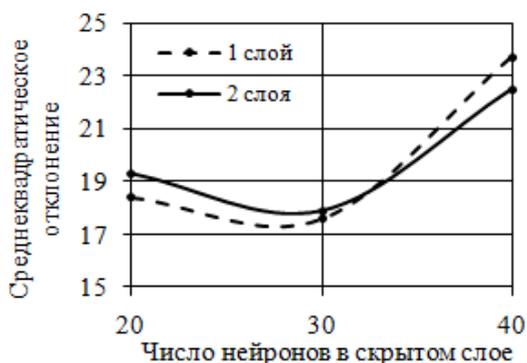


Рис. 4. Среднеквадратические отклонения для сетей различной структуры

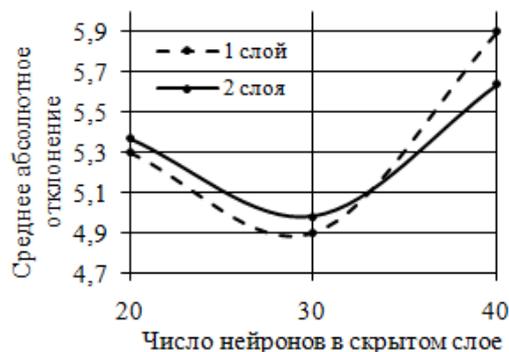


Рис. 5. Средние абсолютные отклонения для сетей различной структуры

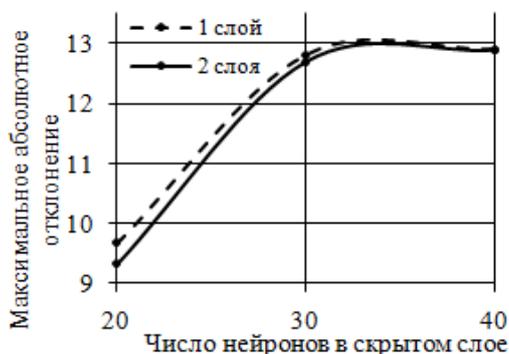


Рис. 6. Максимальные абсолютные отклонения для сетей различной структуры

Анализируя полученные графики, можно сделать вывод, оптимальной является структура с одним скрытым слоем и 30 нейронами в нём. При такой структуре сети среднее абсолютное и среднеквадратическое отклонение

минимальны, хотя максимальное отклонение по тестовой выборке меньше у сети с двумя скрытыми слоями. Отсутствие монотонной зависимости среднеквадратических и абсолютных отклонений объясняется тем, что за

счет усложнения структуры сети путем увеличения числа нейронов в слое или скрытых слоях НС становится неспособной к обобщению данных.

Таким образом, выбор наиболее рациональной структуры ИНС обуславливается видом задач, предполагаемых для решения с помощью данной ИНС. И сводится к поиску такого набора признаков, который при минимальных временных и энергетических затратах (числе обучающих эпох и т.д.) даст наилучший результат.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Андреев, С.М.** Концепция нейросетевой системы управления многозонными нагревательными устройствами протяжного типа / С.М. Андреев // Электротехнические системы и комплексы: межвуз. сб. научн. тр. – Магнитогорск: МГТУ, 2007. – Вып. 5. – С. 344-351
2. **Рябчиков, М.Ю.** Статистические модели нагрева полосы в протяжной печи башенного типа агрегата непрерывного горячего оцинкования / М.Ю. Рябчиков, С.Н. Рахманов, А.А. Беляков // Автоматизированные технологии и производства: сб. научн. тр. - Магнитогорск: ФГБОУ ВПО «МГТУ». 2012. Вып.4. –С. 81-97
3. **Щетинин, В.Г.** Самоорганизация минимальной нейронной сети [Текст] / В.Г. Щетинин. – Красноярск: СО РАН, 1998. – 115с.
4. **Парсункин, Б.Н.** Адаптивные статистические модели, синтезированные на основе ИНС/ Б.Н. Парсункин, С.М. Андреев, Т.Г. Обухова и др. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2012. -№4. -С. 68 - 71.
5. **Хавина, И.П.** Применение нейронных сетей в технологических процессах механообработки/И.П. Хавина, В.В. Лимаренко //Автоматизированные технологии и производства. 2013. -№.5 – С.252-258.
6. **Круглов, В.В.** Искусственные нейронные сети. Теория и практика Текст / В.В. Круглов, В.В. Борисов – М.: Горячая линия – Телеком, 2002. – 382с.
7. **Самарина, И.Г.** Область применения и особенности создания имитационной модели нагрева полосы в печи АНГЦ / И.Г. Самарина, Б.Н. Парсункин, М.М. Чертыковцева // Автоматизированные технологии и производства. 2013. -№.5. – С.43-48.
8. **Рябчиков, М.Ю.** Способ многоуровневого построения моделей на основе искусственных нейронных сетей для расчетов за пределами области рассеяния исходных данных / М.Ю. Рябчиков //Автоматизированные технологии и производства. 2012. -№4. –С. 70-80.
9. **Логовский, А.С.** Применение искусственных нейронных сетей для решения задач управления динамическими объектами. / А.С. Логовский– М.: Финансы и статистика, 2007. – 350с.
10. **Дорогов, А.Ю.** Структурные модели быстрых нейронных сетей Текст / А.Ю. Дорогов, А.А.Алексеев – М.: ПАИМС, 1999. – 213с.
11. **Дмитриенко, В.Д.** Трехслойный перцептрон, способный дообучаться / В.Д. Дмитриенко, А.Ю. Заковоротный, В.А. Бречко // Автоматизированные технологии и производства. 2014. -№6. –С. 12-21.
12. **Сотник, С.Л.** Конспект лекций по курсу «Основы проектирования систем искусственного интеллекта» Текст / С.Л. Сотник– Днепропетровск: НМетАУ, ИК "Системные технологии", 2001. – 67с.
13. **Рябчиков, М.Ю.** Использование модели нагрева полосы при управлении температурным режимом в протяжной печи башенного типа [Текст]/ М.Ю.Рябчиков, Б.Н. Парсункин, С.М.Андреев, Н.А.Головки // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2011. -№ 5. -С. 41-50.
14. **Рябчиков, М.Ю.** Изучение режимов нагрева стальной полосы в протяжной печи башенного типа для светлого отжига[Текст] / М.Ю.Рябчиков, И.Г.Самарина // Металлообработка. 2013. -№ 1 (73). -С. 43-49.
15. **Рябчиков, М.Ю.** Статистические модели нагрева полосы в протяжной печи башенного типа агрегата непрерывного горячего оцинкования[Текст]/ М.Ю.Рябчиков, С.Н.Рахманов, А.А.Беляков // Автоматизированные технологии и производства. 2012. -№ 4. -С. 81-97.
16. **Рахманов, С.Н.** Совершенствование системы управления нагревом полосы на агрегате непрерывного горячего оцинкования с целью снижения количества производимой дефектной продукции [Текст] / С.Н.Рахманов, А.Д. Гурьянов, М.Ю. Рябчиков // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. 2011. -№ 2. -С. 33-35.
17. **Валеев, П.В.** Исследование динамики нагрева полосы в протяжной печи башенного типа [Текст]/ П.В. Валеев, М.Ю.Рябчиков// Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. 2012. Т.2. -№ 70. -С. 63-65.
18. **Самарина, И.Г.** Модель нагрева полосы при отжиге металла в протяжной печи башенного типа [Текст] / И.Г. Самарина, С.М. Андреев // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2014. Том 2, №3. – С.40-45.
19. **Парсункин, Б.Н.** Статистическое исследование и моделирование экономических и технологических процессов металлургического производства: учеб.пособие. / Б.Н. Парсункин, С.М. Андреев, М.В. Бушманова и др.// -Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. тех. ун-та им. Г.И. Носова, 2007. -315 с.
20. **Шестаков, А.Л.** Коррекция динамической погрешности измерительного преобразователя линейным фильтром на основе модели датчика [Текст] /А.Л. Шестаков // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 1991. Т. 34. № 4. С. 8-13.
21. **Шестаков, А.Л.** Динамическая точность измерительного преобразователя с корректирующим устройством в виде модели датчика [Текст] / А.Л. Шестаков // Метрология. 1987. № 2. С. 26-34.

## КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПУСКОВЫХ ПРОЦЕССОВ В АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДАХ

Е.С. Петрякова<sup>1</sup>, И.Н. Идрисов<sup>2</sup>, А.Б. Лымарь<sup>3</sup>, М.В. Вечеркин<sup>4</sup>  
<sup>1,2,3,4</sup> ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»,  
 г. Магнитогорск, Россия.

## COMPUTER MODEL TO STUDY STARTING PROCESSES ASYNCHRONOUS ELECTRIC

E.S. Petryakova<sup>1</sup>, I.N. Idrisov<sup>2</sup>, A.B. Lyumar<sup>3</sup>, M.V. Vecherkin<sup>4</sup>  
<sup>1,2,3,4</sup> Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

<sup>1</sup>petryakova.katya@inbox.ru, <sup>2</sup>ildar\_nailevich@mail.ru, <sup>3</sup>lyumar.alexei@mail.ru

**Аннотация.** Решается задача компьютерного моделирования пусковых процессов в асинхронных двигателях для поиска рациональных пусковых режимов. Описана структура и возможности компьютерной модели для исследования реакторного пуска.

**Ключевые слова:** асинхронный двигатель, компьютерная модель, пусковой режим, реакторный пуск.

**Abstract.** The problem of computer simulation of processes of starting asynchronous electric motorsto search for rational starting modes. The structure and capabilities of computer models for studies of reactor-starter.

**Keywords:** asynchronous electric motors, the computer model, the starting mode, reactorstart.

Одной из проблем при эксплуатации мощных не-регулируемых асинхронных электроприводов является их пуск в работу. Как известно, пусковой ток АД может в 5-10 раз превышать номинальное значение. Это приводит к значительной нагрузке на сеть электроснабжения и, соответственно, к снижению качества электроэнергии. Кроме этого, при прямом пуске АД возникает значительный знакопеременный пусковой момент, амплитуда которого может достигать 5-7 номинальных значений. Это приводит к существенным динамическим нагрузкам в механической системе агрегата и таким негативным последствиям как скручивание валов механических передач, удары и разрушения механических соединений, пробуксовке механизмов и др.

Облегчение условий пуска АД является важной задачей, позволяющей существенно увеличить ресурс двигателя и, в некоторых случаях, экономить электроэнергию [1].

Выбор эффективного и, главное, экономически оправданного способа мягкого пуска представляет собой задачу, решение которой требует учета всех особенностей работы электроприводов в каждом конкретном случае. К таким особенностям относятся: характеристики двигателя, вид нагрузки на валу, мощность питающей сети, допустимое время пуска и др.

Для выбранного способа пуска важным является определение рационального пускового режима. Например, при пуске с помощью тиристорного регулятора напряжения – это закон изменения напряжения подводимого к двигателю. Для реакторного пуска это сопротивление токоограничивающего реактора

и время переключения на сеть. При пуске с переключением обмоток это время переключения со «звезды» на треугольник.

Наиболее приемлемым способом поиска рациональных решений является метод компьютерного моделирования. Оптимальной средой для создания компьютерной модели является пакет MATLAB. Расширение Simulink этого пакета имеет библиотеки виртуальных электрических машин, силовой электроники, источников энергии, измерительных приборов. Это позволяет быстро скомпоновать и исследовать модель практически любой сложности. При отсутствии в составе библиотек необходимых элементов они могут быть построены из элементарных блоков Simulink.

Исходными данными для анализа пусковых режимов могут быть расчетные осциллограммы фазных токов, скорости и электромагнитного момента двигателя. Кроме этого, весьма информативными являются динамическая механическая и динамическая электромеханическая характеристики двигателя.

Для анализа различных способов и режимов пуска была создана компьютерная модель [2], общая структура которой показана на рис. 1. Блок моделирования пусковых устройств позволяет выбрать тип пускового устройства, т.е. способ пуска. Блок управления и коммутации определяет закон управления пусковым устройством, т.е. режим пуска. Блок измерений обеспечивает отображение и запись всех требуемых параметров. Блок моделирования нагрузки позволяет задать характер момента на валу асинхронного двигателя.

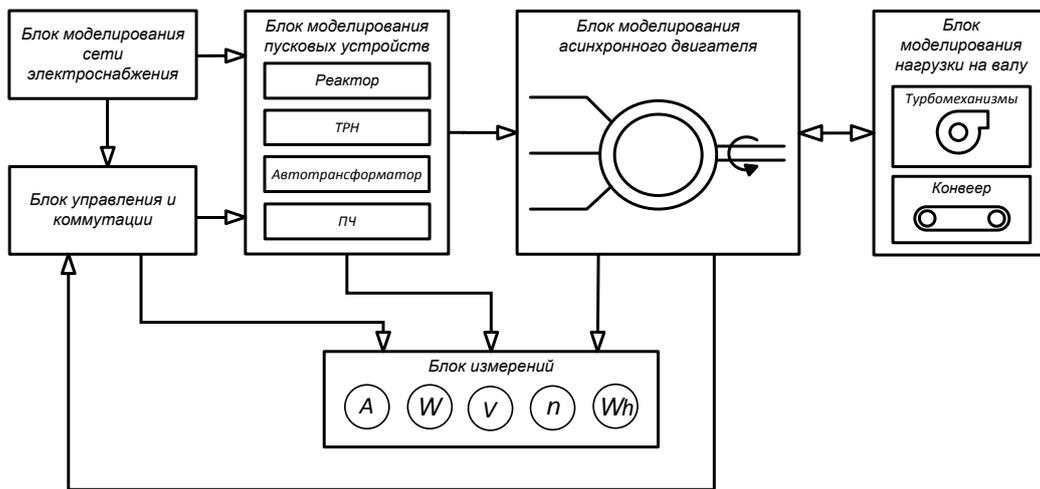


Рис. 1. Функциональная схема компьютерной модели

Простейшим способом облегчения пускового режима является реакторный пуск (рис. 2). Такой пуск является двух ступенчатым. Сначала замыкается коммутатор  $K_1$  и двигатель подключается к сети через реакторы ( $Z_a, Z_b, Z_c$ ). После разгона двигателя до некоторой скорости замыкается коммутатор  $K_2$ , и двигатель оказывается напрямую подключенным к сети. Такой способ позволяет уменьшить бросок тока при пуске и снизить кратность пускового тока первой ступени.

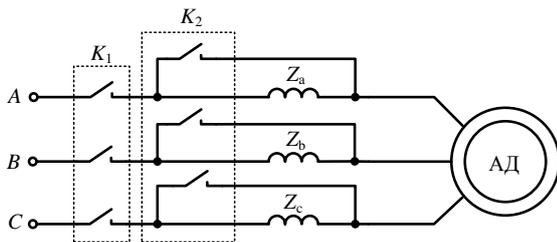


Рис. 2. Схема реакторного пуска

Степень снижения негативного влияния пускового процесса определяется двумя основными факторами:

электрическими характеристиками реактора и временем переключения коммутатора  $K_2$ .

Методика расчета электрических характеристик реактора изложена в специальной литературе. Если пусковой ток необходимо снизить в  $p$  раз, то полное сопротивление реактора в простейшем случае может быть рассчитано по формуле[3]:

$$Z_p = \frac{U_n}{\sqrt{3}I_n} \frac{p-1}{k_i},$$

где  $U_n, I_n$  – номинальные напряжение и ток двигателя;  $k_i = I_{\text{пуск}}/I_n$  – паспортное значение кратности пускового тока двигателя.

Более подробно расчет пусковых реакторов описан в работе [4]. Вопросы рационального соотношений между активным и индуктивным сопротивлением реактора, их связи с характеристиками двигателя, продолжительности работы реактора являются предметом отдельных исследований.

На рис. 3 показана часть компьютерной модели реализующей реакторный пуск по схеме рис. 2.

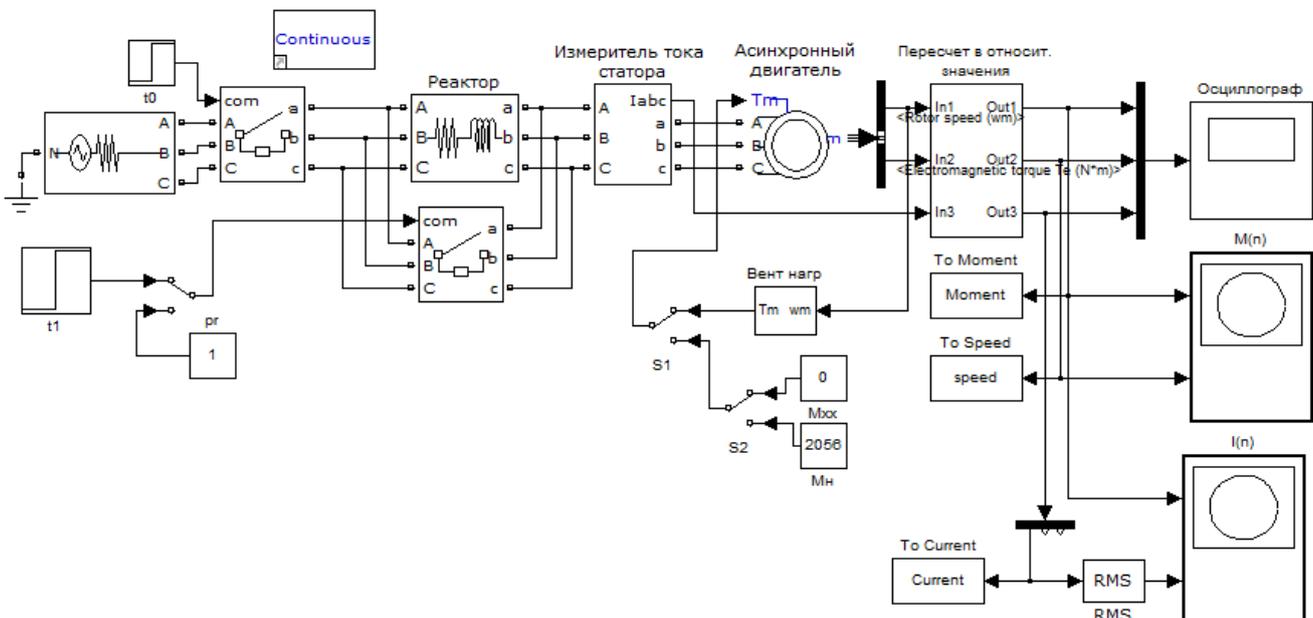


Рис. 3. Компьютерная модель реакторного пуска АД

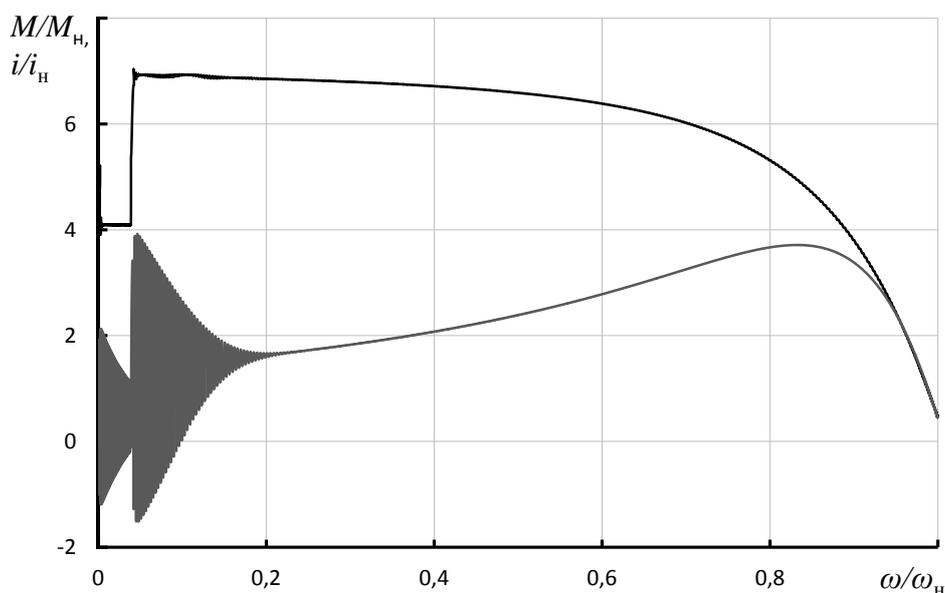


Рис. 4. Динамические механическая и электромеханическая характеристики при реакторном пуске

Модель имеет следующие возможности:

1. Возможность задания различного характера нагрузки на валу двигателя;
2. Возможность задания активного и реактивного сопротивлений реактора;
3. Изменение времени переключения на сеть;
4. Получение расчетных осциллограмм мгновенных или действующих значений токов статорных обмоток, частоты вращения вала и электромагнитного момента двигателя;
5. Получение графической динамической механической и электромеханической характеристик двигателя;
6. Получение численных массивов данных, отражающих исследуемые пусковые процессы.

В качестве примера результата работы модели на рис. 4 приведены расчётные графики динамических пусковых характеристик мощного высоковольтного асинхронного двигателя с вентиляторной нагрузкой.

Сравнивая динамические характеристики различных пусковых режимов, можно выбирать из них такие, которые соответствуют минимальным динамическим нагрузкам. Пример такого исследования приведен в работе [5]. Задача снижения динамических нагрузок может быть решена путем формирования пусковой динамической характеристики, которая в наибольшей степени будет приближена к статической характеристике, то есть ограничением или полным подавлением колебательной составляющей электромагнитного момента. Качество решения этой задачи может быть оценено на основе численных критериев, отражающих степень наличия колебательной составляющей [6]. Получаемые с помощью модели массивы численных данных могут быть использованы для расчета таких критериев.

Таким образом, описанная компьютерная модель является мощным инструментом для поиска рациональных пусковых режимов асинхронных двигателей.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Вечеркин, М.В.** Исследование способов регулирования производительности вентиляторной станции ЛПЦ-10 ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» [Текст] / М.В. Вечеркин, А.С. Сарваров // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2006. - №4. – С. 63-67.

2. **Вечеркин, М.В.** Моделирование пусковых процессов асинхронных двигателей при использовании тиристорных регуляторов напряжения, реакторов, автотрансформаторов и трансформаторно-тиристорных пусковых устройств [Текст] / М.В. Вечеркин, Е.В. Славгородская, В.Б. Славгородский, И.А. Сарваров // Труды VII Международной (VII Всероссийской) научно-технической конференции по автоматизированному электроприводу: ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина». – Иваново, 2012. – С. 350-355.

3. **Карасев, Б.В.** Насосные и воздуходувные станции: Учеб. для вузов [Текст] / Б.В. Карасев // – Мн.: Выш. шк., 1990.-326 с.

4. **Вешневский, С.Н.** Характеристики двигателей в электроприводе [Текст] / С.Н. Вешневский // Изд. 6-е, исправленное. М., «Энергия», 1977.-432 с.

5. **Вечеркин, М.В.** Выбор времени переключения при реакторном пуске асинхронных электроприводов с вентиляторной нагрузкой [Текст] / М.В. Вечеркин, А.С. Сарваров, Е.В. Макарьева // Электротехнические системы и комплексы: Межвузовский сб. науч. тр. Вып. 21.– Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2013. – С. 100-106

6. **Вечеркин, М.В.** Сравнительная оценка способов пуска асинхронных двигателей по колебательной составляющей электромагнитного момента [Текст] / М.В. Вечеркин, А.С. Сарваров, Е.В. Макарьева, А.В. Макаров // Труды VIII Международной (XIX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2014: Т.1 / отв. за вып. И.В. Гуляев. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2014. – С.197-202.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПЕРЕКЛЮЧАЕМЫХ ПЕРЕДАТОЧНЫХ ФУНКЦИЙ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ РАБОТЫ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ПРИВОДА

С.С.Воронин<sup>1</sup>, А.А.Радионов<sup>2</sup>, Д.Ю.Усатый<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г.Магнитогорск, Россия.

## MODELING OF THE HYDRAULIC DRIVE USING THE SWITCHABLE TRANSFER FUNCTION

S.S.Voronin<sup>1</sup>, A.A.Radionov<sup>2</sup>, D.Y.Usaty<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

<sup>1</sup>stsvoronin@gmail.com, <sup>2</sup>radionovaa@rambler.ru, <sup>3</sup>usatydu@gmail.com

**Аннотация.** В статье рассмотрены основные виды конструкций гидроцилиндров как исполнительных устройств механизмов. Приведены различия в работе гидроцилиндров с односторонним и двухсторонним штоком. Составлена простейшая схема гидропривода, перемещающего объект, обладающий массой. На основе составленной схемы разработаны ограничения, имеющие место при моделировании гидропривода. Для гидрораспределителя получено уравнение статической характеристики, связывающее расход жидкости с управляющим воздействием. Приведено сравнение результатов с реальным объектом. С учетом ограничений выведены дифференциальные уравнения, описывающие элементы гидропривода – гидрораспределитель и гидроцилиндр. Получены передаточные функции элементов гидропривода. Показаны преимущества применения переключаемой передаточной функции для гидроцилиндра с односторонним штоком, целесообразность ее применения. На основе дифференциальных уравнений составлена структурная схема гидропривода. Показаны результаты моделирования гидропривода при ступенчатом воздействии.

**Ключевые слова:** гидрораспределитель, гидроцилиндр, модель гидропривода, передаточная функция.

**Abstract.** The article describes the main types of hydraulic cylinders as actuators mechanisms. The differences in the cylinders with one-sided and double-sided stem were given. The simplest scheme of hydraulic drive was composed, moving objects with a mass. Based on this scheme the constraints were designed that occur in the modeling process of the hydraulic drive. For the control valve an equation of static characteristics was obtained, associated fluid flow with control signal. The results were compared with the real object. According to the constraints the differential equations were derived that describe the elements of the hydraulic drive - control valve and cylinder. The transfer functions of elements of the hydraulic drive were obtained. The advantages of the use of switchable transfer function for single-rod hydraulic cylinder are shown, the feasibility of its application are proven. Based on the differential equations, a block diagram of the hydraulic drive was made. The results of the simulation of hydraulic drive with a stepped impact are shown.

**Keywords:** hydraulic control valve, hydraulic cylinder, hydraulic drive model, transfer function.

### Введение

В прокатном производстве основной частью механизмов, создающих усилие на металл или перемещение объектов, являются приводы. На современных прокатных станах, помимо электроприводов, активно стали использоваться гидроприводы. Гидравлические системы позволяют добиться высокой точности позиционирования, быстрой реакции на возмущения и стабильной работы под большими нагрузками.

Важным составляющей правильного расчета величины управляющего воздействия в системе управления гидроприводом является моделирование. Предварительный расчет параметров позволяет правильно определить нагрузки на гидропривод, скорость перемещения и расход жидкости в системе. Также при моделировании определяются устойчивые режимы работы гидропривода.

Обзор литературы показал [1-4], что существую-

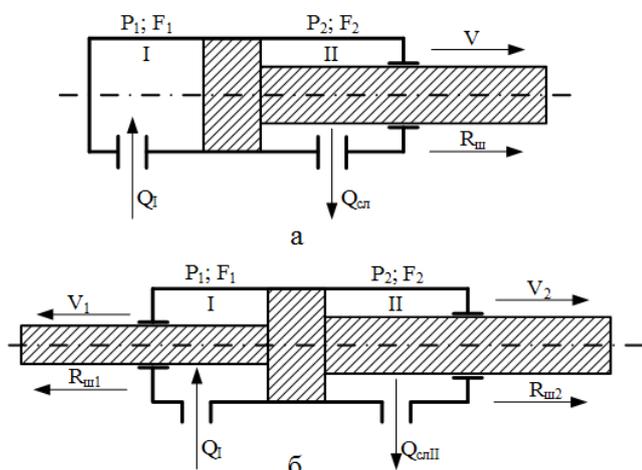
щие модели гидропривода имеют довольно сложную конструкцию, а ряд параметров, используемых при расчетах, сложно вычислить на практике. Кроме этого, большинство моделей не учитывает конструкцию гидроцилиндра (ГЦ), например, разные объемы полостей. На основании этого, целью данной статьи является разработка простой схемы гидропривода, позволяющей в динамике связать основные параметры, такие как расход жидкости, сила, скорость перемещения ГЦ.

### Объект моделирования

В качестве исполнительного устройства в гидроприводе используются гидродвигатели и гидроцилиндры [1]. Последние имеют большое разнообразие видов, в основном по расположению штока. Если обратиться к конструкции гидроцилиндров (рисунок 1), основными параметрами являются:

- объем полостей гидроцилиндра (I и II);

- диаметр штока гидроцилиндра ( $d_{ш}$ );
- давление в полостях гидроцилиндра ( $P$ );
- объем жидкости, поступающей в полости ГЦ ( $Q$ );
- скорость перемещения поршня ГЦ;
- усилия, действующие на шток ГЦ.



**Рис. 1. Основные конструктивно-расчетные схемы гидроцилиндров (а – с односторонним штоком, б – с двухсторонним штоком)**

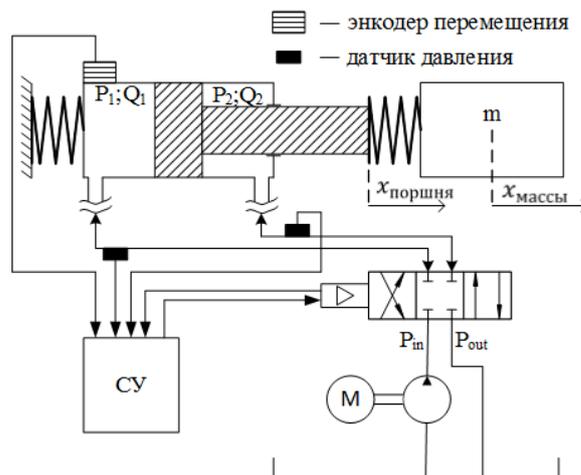
В зависимости от вышеперечисленных параметров, ГЦ может быть с односторонним или двухсторонним штоком [2]. У ГЦ с односторонним штоком подключение к магистралям может быть традиционное или дифференциальное. Разновидностью такого типа служит плунжерный ГЦ, ход которого возможен только в одном направлении, а возврат осуществляется при помощи пружины или другого усилия, приложенного в обратном направлении.

ГЦ с двухсторонним штоком могут быть симметричными и несимметричными [3]. У симметричных цилиндров диаметры штоков в полостях I и II одинаковые.

Если же рассматривать гидропривод как объект управления, на который действуют силы со стороны управляемого объекта, то помимо сил трения гидропривод испытывает инерционную нагрузку [4], которую можно описать как некоторую массу  $m$ , перемещаемую с ускорением. Кроме того, шток ГЦ связан с объектом управления некой упругой связью (рис. 2).

Для описанной выше схемы можно составить систему дифференциальных уравнений, если учесть следующие ограничения:

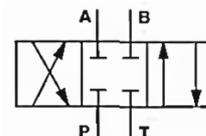
- снабжение гидропривода рабочей жидкостью осуществляется непрерывно, а расход жидкости в питающем резервуаре неограничен;
- давление, которое создается насосом в системе и подается в полость гидроцилиндра постоянно ( $p_{in} = const$ );
- гидроблок с гидрораспределителем (ГР) расположен в непосредственной близости к гидроцилиндру и волновыми процессами, возникающими в трубопроводе между гидроцилиндром и ГР, можно пренебречь;
- не учитывается деформация стенок трубопровода, соединяющего ГР и гидроцилиндр.



**Рис. 2. Простейшая схема гидропривода**

### Уравнение перемещения гидрораспределителя

Для изменения направления потока гидравлической жидкости, а также для управления ее запуском и остановом, служат гидрораспределители [5]. Обозначаются ГР по количеству основных гидравлических линий и по количеству возможных занимаемых позиций. На рисунке 3 показано обозначение 4/3-гидрораспределителя на схемах, который имеет четыре гидравлических линии и три позиции.



**Рис. 3. Графическое обозначение 4/3-гидрораспределителя (P, T – напорная и сливная линии соответственно; A, B – линии подключения гидродвигателя)**

Наиболее распространены ГР золотникового типа, в которых управление гидравлической жидкостью осуществляется посредством перемещения золотника. ГР такого типа обладают целым рядом преимуществ, таких как простота конструкции, малые потери, высокая переключаемая мощность, большое количество вариантов управления и др.

В простейшем случае золотник ГР может принимать только нейтральное и крайние положения. Для управления объемом жидкости, дополнительно к ГР устанавливают дроссель. С помощью дросселя изменяется проходное сечение трубопровода и, как следствие, поток жидкости, подаваемый в гидроцилиндр. Существуют также ГР, в которых золотник может принимать множество промежуточных значений, при этом необходимость в установке дросселя отпадает. В любом случае, математическое описание ГР сводится к поиску зависимости между положением золотника и величиной потока жидкости.

Любой ГР обладает следующими важнейшими характеристиками, которые необходимо учесть при моделировании:

- предел статической и динамической характеристики;

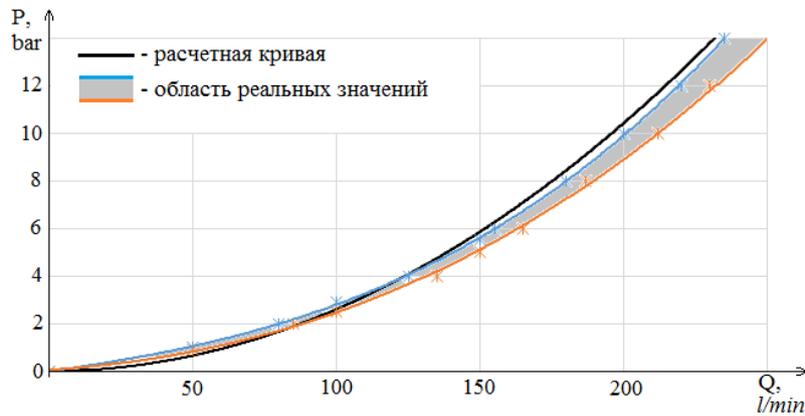


Рис. 4. Сравнение теоретической и экспериментальной зависимостей перепада давления от расхода жидкости ГР NG-16

- потери давления;
- утечки;
- быстродействие.

Рассмотрим случай, когда золотник может занимать любую промежуточную позицию, смещаясь от центрального положения на некоторую величину  $x_3$ . Тогда площадь поперечного сечения потока жидкости будет определяться из следующей зависимости:

$$A(x) = \frac{x_3}{x_{max}} \cdot A_{max} + A_{leak} \quad (1)$$

где  $A(x)$  – текущая площадь отверстия для прохода жидкости,  $m^2$ ;  $x_3$  – величина смещения заслонки от начального положения,  $m$ ;  $x_{max}$  – максимальная величина смещения заслонки,  $m$ ;  $A_{leak}$  – площадь утечки при закрытом отверстии,  $m^2$ ;  $A_{max}$  – площадь отверстия при максимальном открытии заслонки,  $m^2$ ;

Как видно из выражения (1), величина утечки  $A_{leak}$  имеет место даже при нулевой позиции золотника, что при моделировании позволяет учесть такой фактор как «сползание» штока гидроцилиндра.

Гидравлический диаметр потока жидкости определяется по следующей зависимости:

$$D_H = \sqrt{\frac{4 \cdot |A(x)|}{\pi}} \quad (2)$$

Для того, чтобы учесть режим потока жидкости, используется выражение для определения минимального давления для турбулентного потока:

$$p_{cr} = \frac{\rho}{2 \cdot \left( \frac{Re_{cr} \cdot v}{C_D \cdot D_H} \right)^2} \quad (3)$$

где  $\rho$  – плотность жидкости,  $\frac{kg}{m^3}$ ;  $Re_{cr}$  – критическое число Рейнольдса, для круглого сечения  $Re_{cr} \approx 2300$ ;  $v$  – кинематическая вязкость жидкости,  $\frac{m^2}{c}$ ;  $C_D$  – коэффициент расхода потока, для круглого сечения  $C_D \approx 0,2$ .

Учитывая уравнения (1-3) объем потока жидкости через отверстие вычисляется следующим образом:

$$q = C_D \cdot A(x) \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot \frac{p}{(p^2 + p_{cr}^2)^{0,25}}} \quad (4)$$

где  $p$  – перепад давления в ГР.

Для проверки адекватности уравнения (4) была построена зависимость между перепадом давлений и объемом потока жидкости для ГР NG-16 фирмы HERION. Полученная кривая была сравнена с реальными значениями, приведенными в технической документации ГР. Результаты показаны на рисунке 4.

Как видно из рисунка 4, расчетная зависимость вполне удовлетворяет реальным значениям. Экспериментальные данные на рисунке 4 представлены в виде области значений, т.к. на практике перепад давления не может быть определен с достаточно высокой точностью.

Для построения динамических характеристик ГР необходимо рассмотреть систему управления перемещением золотника. Современные ГР могут управляться механически, гидравлически и электрически. Часто встречаются комбинированные типы управления. Рассмотрим ГР, который управляется при помощи электромагнитной системы (рисунок 5).

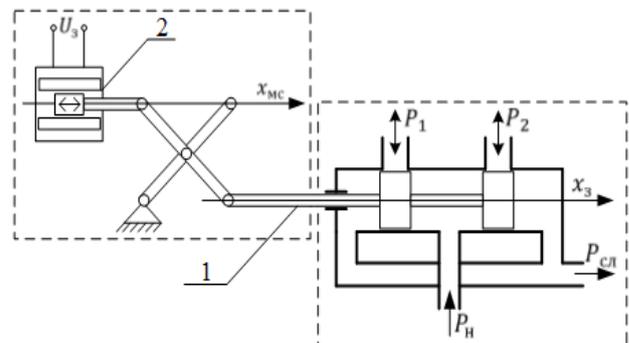


Рис. 5. Схема гидрораспределителя с электромагнитным управлением: 1 – шток золотника; 2 – электромагнитная система;  $U_3$  – задающее напряжение;  $x_{мс}$  – перемещение электромагнитной системы;  $x_3$  – перемещение золотника;  $P_1, P_2$  – давление в полостях гидроцилиндра;  $P_H$  – давление питающей магистрали;  $P_{сл}$  – давление сливной магистрали

Шток золотника соединен рычагом со штоком электромагнитной системы. Если считать, что плечи рычага одинаковы по длине, то перемещение штока золотника будет пропорционально перемещению катушки электромагнита [6,7]. В таком случае, для такой системы будет справедливо выражение

$$T_\Gamma \cdot \frac{dx_3}{dt} + x_3 = x_{мс} \quad (5)$$

где  $T_r$  – постоянная времени.

Для систем с электромагнитными катушками постоянная времени определяется как  $T_r = \frac{L}{R}$  и для быстродействующих ГР равна 2...4 мс. Обычно значение постоянной времени перемещения золотника от нулевого до максимального положения указывается в инструкции по эксплуатации ГР.

Так как напряжение, подаваемое на катушку, пропорционально его перемещению, то уравнение (5) можно привести к следующему виду

$$T_r \cdot \frac{dx_3}{dt} + x_3 = k_{xU} \cdot U_3 \quad (6)$$

где  $k_{xU} = \left| \frac{x_{стmax}}{U_{max}} \right|$  – коэффициент, связывающий напряжение и перемещение магнитной системы.

Таким образом, из уравнения (6) получаем передаточную функцию ГР, связывающую перемещение золотника и задающее напряжение

$$W_{ГР}(p) = \frac{k_{xU}}{T_r \cdot p + 1} \quad (7)$$

Далее, зная значение перемещения золотника и величину давления в напорной магистрали, при помощи статических характеристик (1-4) можно рассчитать расход жидкости ГР. Структурная схема ГР показана на рис. 6.

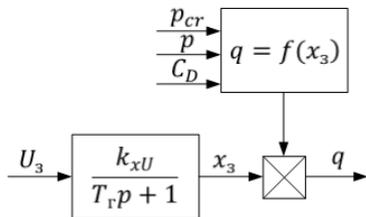


Рис. 6. Структурная схема гидрораспределителя

### Уравнение перемещения гидроцилиндра

Перемещение штока ГЦ создается за счет разности давлений в его полостях. Расход жидкости, поступающей в полость ГЦ, можно описать при помощи линеаризованного дифференциального уравнения [8,9]:

$$q = q_y + q_p = S_{п} \cdot \frac{dy}{dt} + \frac{V_{01}}{B_{ж}} \cdot \frac{dP_1}{dt} + k \cdot P_1 \quad (8)$$

где  $q$  – расход жидкости, поступающей в полость ГЦ,  $\frac{м^3}{с}$ ;  $q_y$  – расход, вызванный перемещением поршня ГЦ,  $\frac{м^3}{с}$ ;

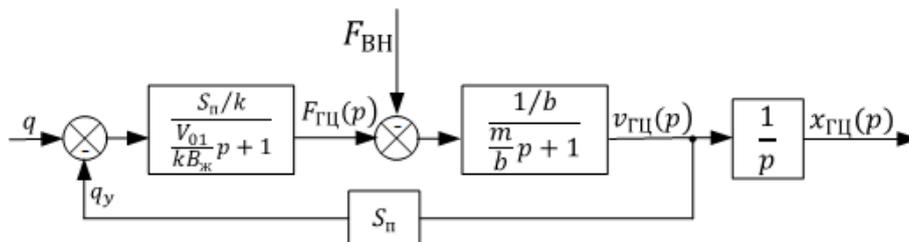


Рис. 7. Структурная схема гидроцилиндра

$y$  – перемещение поршня ГЦ,  $м^2$ ;  $S_{п}$  – эффективная площадь поршня ГЦ,  $м$ ;  $V_{01}$  – объем поршневой полости при начальном положении,  $м^3$ ;  $B_{ж}$  – объемный модуль упругости рабочей жидкости,  $Па$ ;  $P_1$  – давление в поршневой полости,  $Па$ ;  $k$  – коэффициент утечек.

Так как давление  $P$  есть отношение силы к площади, то величину расхода  $q_p$  из уравнения (8) можно привести к следующему виду:

$$\frac{S_{п}}{k} \cdot q_p = \frac{V_{01}}{k \cdot B_{ж}} \cdot \frac{dF_{ГЦ}}{dt} + F_{ГЦ} \quad (9)$$

где  $F_{ГЦ}$  – усилие, создаваемое поршнем ГЦ,  $Н$ .

Передаточная функция объекта будет равна

$$W_{ГЦ} = \frac{S_{п}/k}{\frac{V_{01}}{k \cdot B_{ж}} \cdot p + 1} + S_{п} \cdot v_{ГЦ} \quad (10)$$

где  $v_{ГЦ}$  – скорость перемещения ГЦ,  $м/с$ .

Кроме этого нужно учесть, что ГЦ обладает собственной массой, а также перемещает объект, имеющий массу. Для описания перемещений используется уравнение движения подвижных элементов согласно второму закону Ньютона:

$$F_{ГЦ} - F_{вн} - F_{дин} = m_{пр} \frac{d^2y}{dt^2} \quad (11)$$

где  $F_{вн}$  – внешнее усилие,  $Н$ ;  $F_{дин} = b \frac{dy}{dt}$  – гидродинамическая сила,  $Н$ ;  $b$  – коэффициент вязкого трения,  $кг/с$ ;  $m_{пр}$  – приведенная масса ГЦ, жидкости в гидросистеме и перемещаемого объекта,  $кг$ .

На основании уравнений (8-11) составим структурную схему объекта управления.

### Структурная схема гидропривода и результаты моделирования

Как уже было показано на рисунке 1 (а), из-за наличия штока с одной стороны ГЦ имеет разные площади поршня. Следовательно, если поочередно подавать одинаковый объем жидкости в разные полости, то скорость перемещения и усилие, создаваемое ГЦ, будет отличаться. Для того, чтобы точно определить скорость ГЦ в разных направлениях перемещения, предлагается использовать переключаемую передаточную функцию. В зависимости от знака сигнала управления (направления перемещения), блок переключения делает активной одну из двух передаточных функций ГЦ, которые отличаются

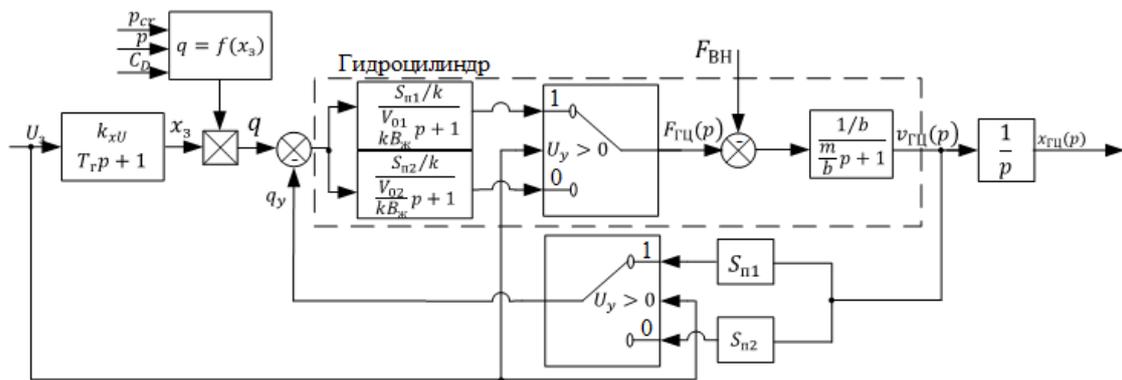


Рис. 8. Структурная схема гидропривода

между собой коэффициентами. Аналогичное переключение осуществляется и в блоке обратной связи (рисунок 7), т.к. эффективная площадь поршня в прямом и обратном направлении также отличается.

На рис. 8 показана структурная схема гидропривода с учетом блоков переключения в ГЦ.

Сигнал задания  $U_3$  управляет скоростью перемещения гидропривода. Это может быть как токовое значение, так и сигнал напряжения. Например, если за «нулевое» положение штока принять среднее значение от общего хода ГЦ, то удобно взять диапазон изменения  $U_3 = -10 \dots 10$  В.

В качестве примера на рис. 9 показаны результаты моделирования гидропривода при скачкообразном изменении сигнала задания +10В/0В/10В. За основу был взят ГЦ, используемый для перемещения прокатных валков в горизонтальной плоскости стана горячей прокатки. На рис. 9 показан расход ГР, усилие, создаваемое ГЦ, скорость перемещения и текущая позиция ГЦ.

На рис. 9 заметно, что скорость перемещения ГЦ в обратном направлении перемещения немного больше, чем в прямом. Это объясняется наличием штока с одной стороны ГЦ с уменьшением эффективной площади (объема) при условии постоянства давления в магистрали.

### Заключение

Полученная модель позволяет при наличии минимального количества данных об элементах гидропривода получить динамические характеристики расхода жидкости ГР, усилия штока ГЦ, скорости и перемещения ГЦ. При этом учитывается важная составляющая – наличие штока с одной стороны ГЦ, что существенно отражается на результатах моделирования (рис. 9).

### ЛИТЕРАТУРА

1. Экснер Х., Фрейтаг Р., Гайс Х. и др. Гидропривод. Основы и компоненты. Учебный курс по гидравлике. Том 1. Издание 2 (на русском языке) [текст]. – Германия: Изд-во Бош Рексрот АГ, 2003.
2. Немировский И.А., Снисарь Н.Г.. Расчет гидроприводов технологических машин [текст]. – Киев: «Техника», 1992. – 181 с.
3. Свешников В.К.. Станочные гидроприводы. Справочник, 3е издание, переработанное и дополненное [текст]. – М.: «Машиностроение», 1995. – 448 с.
4. Попов Д.Н. Динамика и регулирование гидро- и пневмосистем. Учеб. для машиностроительных вузов [текст]. – М.: «Машиностроение», 1976. – 424 с.

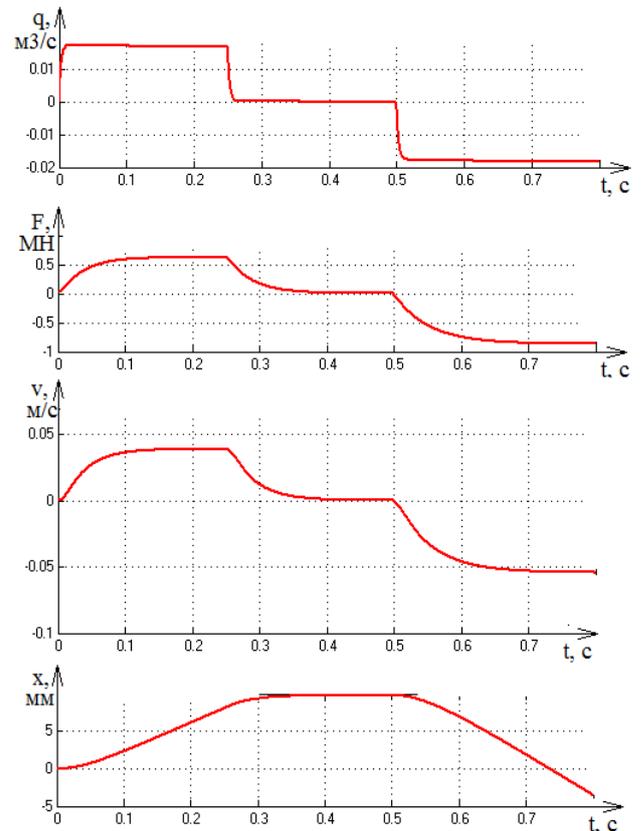


Рис. 9. Результаты моделирования гидропривода

5. Абрамов Е.И., Колесниченко К.А., Маслов В.Т.. Элементы гидропривода: Справочник. 2-е изд., перераб. [текст]. – Киев: Техника, 1977. – 320 с.

6. Бесекерский В.А., Попов К.П.. Теория систем автоматического регулирования [текст]. – М.: Наука, 1972. – 768 с.

7. Васильченко В.А.. Гидравлическое оборудование мобильных машин. Справочник. – М.: Машиностроение, 1983. – 301 с.

8. Герц Е.В. Динамика пневматических систем машин [текст]. М.: Машиностроение, 1985. – 256 с.

9. Навроцкий К.Л. Теория и проектирование гидро- и пневмоприводов: Учебник для студентов вузов по специальности «Гидравлические машины, гидроприводы и гидропневмоавтоматика» [текст]. – М.: Машиностроение. 1991. – 384 с.

## РАЗРАБОТКА ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ФИЛЬТРА В СИСТЕМЕ БЕЗДАТЧИКОВОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ УГЛОВОГО ПОЛОЖЕНИЯ РОТОРА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

К.В. Лицин

ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»,  
г. Магнитогорск, Россия.

## HIGHPASS FILTER DEVELOPMENT IN THE SENSORLESS SYSTEM OF THE DETERMINING ANGULAR POSITION ROTOR ELECTRIC MOTOR

K.V. Litsin

<sup>1,2</sup>Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

k.litsin@rambler.ru

**Аннотация.** В статье рассматривается проектирование фильтра высоких частот Баттерворта. Данный фильтр используется в бездатчиковой системе определения углового положения ротора. Проанализированы преимущества бездатчиковых систем. Представлена математическая модель бездатчикового определения углового положения ротора. Рассмотрены преимущества использования фильтра Баттерворта. Фильтр создан при помощи программных средств. Проанализирована его амплитудно-частотная характеристика и сигналы на входе и выходе. Сделан вывод о возможности применения фильтра в бездатчиковой системе определения углового положения ротора электродвигателя.

**Ключевые слова:** высокочастотная инжекция, высокочастотный фильтр, фильтр Баттерворта, бездатчиковое управление.

**Abstract.** The article discusses the design of Butterworth high-pass filter. This filter is used in a sensorless system for determining the angular position of the rotor. The advantages sensorless systems are analyzed. A mathematical model sensorless determining the angular position of the rotor is presented. The advantages of using a Butterworth filter are viewed. The filter was created by software. Frequency response and signal input and output are analyzed. It is concluded that the possibility of applying a filter in sensorless system for determining the angular position of the rotor of the motor.

**Keywords:** high frequency injection, high frequency filter, Butterworth filter, sensorless control.

Возможность регулирования электропривода при отсутствии каких-либо датчиков скорости и углового положения носит весьма актуальный характер [1-4]. Отказ от использования датчиков положения ротора приведет к следующим преимуществам:

- повышение надежности системы электропривода;
- снижение стоимости привода;
- улучшение массогабаритных показателей;
- при определении скорости путем дифференцирования угла поворота помехи могут существенно повлиять на процесс управления. Отсутствие датчиков определения механических величин позволит это избежать.

Область применения таких электроприводов определяется следующими условиями:

- механизм предъявляет повышенные требования к быстродействию привода;
- не требуется высокая статическая точность и широкий диапазон регулирования скорости (диапазон не более 100);
- установка датчика скорости на вал двигателя невозможна по условиям эксплуатации, технологическим, стоимостным или прочим ограничениям.

Наибольшую сложность при бездатчиковом определении положения ротора вызывает определение начального положения ротора и управление электродвигателем при низких скоростях. Среди су-

ществующих способов, позволяющих определять угловое положение ротора, большинство не дает результата в области нулевых и низких скоростей. В работах [5-10] был рассмотрен метод высокочастотной инжекции, лишенный этого недостатка. Одной из составляющих системы определения углового положения является фильтр высоких частот, позволяющий получить сигнал, используемый в дальнейшем для получения информации об угловом положении.

Целью данной статьи является создание модели высокочастотного фильтра и ее анализ на возможность применения в системе бездатчикового определения углового положения.

Математическая модель бездатчикового определения углового положения ротора представлена на рис. 1 [11].

Для выполнения поставленной цели воспользуемся фильтром Баттерворта 3-го порядка. Его амплитудно-частотная характеристика максимально гладкая на частотах полосы пропускания. Амплитудно-частотная характеристика фильтра Баттерворта является монотонно убывающей функцией частоты. Выбор данного фильтра обусловлен тем, что он сохраняет форму амплитудно-частотной характеристики для более высоких порядков (за исключением более крутого спада характеристики на полосе подавления), тогда как многие другие разновидности фильтров (фильтр Бесселя, фильтр Чебы-



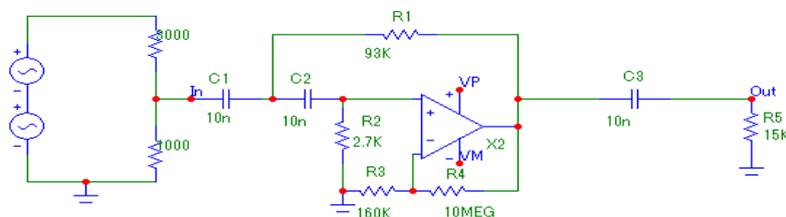
**Рис. 1. Математическая модель обработки высокочастотного сигнала для получения углового положения ротора**

шева, эллиптический фильтр) имеют различные формы амплитудно-частотной характеристики при различных порядках. При проектировании фильтра учитывалось, что частота среза равна 1 кГц, коэффициент усиления 23 дБ.

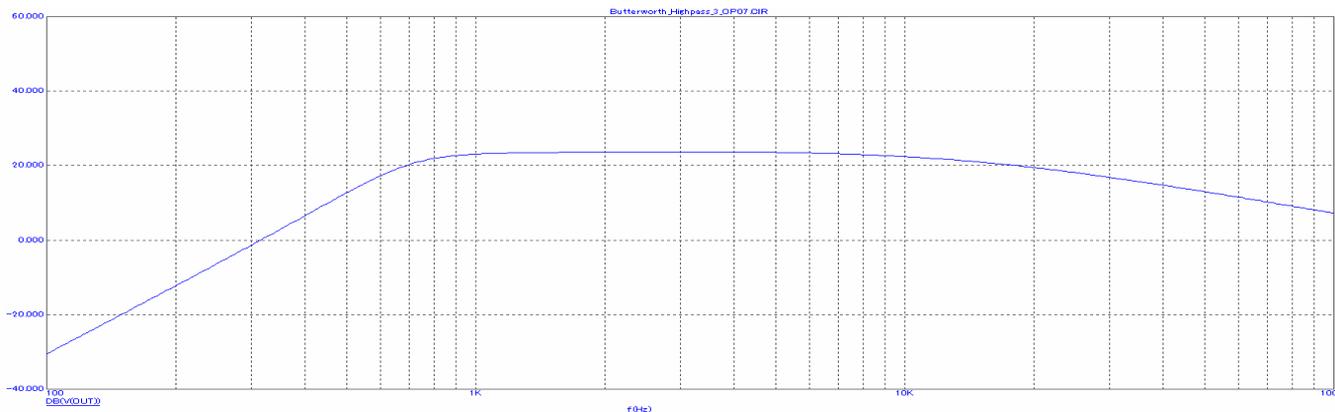
Для создания фильтра воспользуемся программой MicroCap, в которой имеется возможность проектирования ФВЧ. Необходимо учесть, что сигнал на входе образуется путем наложения двух синусоид:

основного сигнала с частотой 50 Гц и инжекционного сигнала с частотой в 1 кГц. В качестве операционного усилителя был выбран OP\_07. В результате, был получен ФВЧ, представленный на рис. 2.

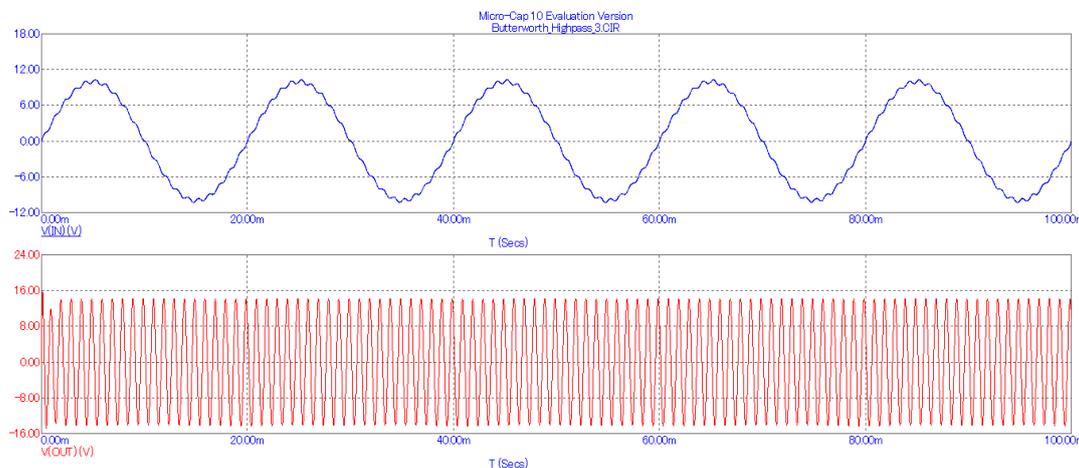
Из рис. 3 очевидно, что необходимые требования, предъявленные при проектировании фильтра выполняются. Рассмотрим так же входной и выходной сигналы напряжения (рис. 4).



**Рис.2. Фильтр Баттерворта третьего порядка**



**Рис.3. АЧХ фильтра высоких частот Баттерворта третьего порядка**



**Рис.4. Входной и выходной сигналы напряжения**

Напряжение на выходе не имеет пульсаций, а значит может быть использовано для дальнейшего получения информации об угловом положении ротора электродвигателя. В результате, разработанный ФВЧ Баттерворта 3-го порядка может быть использован в бездатчиковой системе определения угла поворота ротора.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Басков, С.Н.** Принцип векторно-импульсного управления электродвигателями переменного тока / С.Н. Басков, К.В. Лицин // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия "Энергетика". – 2013. – Т. 13, №1. – С. 92-95.
2. **Корельский, Д.В.** Обзор современных методов управления синхронными двигателями с постоянными магнитами / Д.В. Корельский, Е.М. Потапенко, Е.В. Васильева // Научный журнал "Радиоэлектроника. Информатика. Управление". – 2001. – С. 155-159.
3. **Jang J.-H.** Sensorless drive of smpm motor by high frequency signal injection. – 2002. – P. 7.
4. **Perera C.** Sensorless Control of Permanent-Magnet Synchronous Motor Drives: PhD thesis. – Institute of Energy Technology Aalborg University, 2002.
5. **Басков, С.Н.** Исследование положения вектора потокосцепления ротора при векторно-импульсном пуске / С.Н. Басков, А.С. Коньков, Т.В. Черкас, К.В. Лицин // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия "Энергетика". – 2012. – №37. – С. 68-72.
6. **Kazmierkowski M.P.** Control in power electronics (selected problems) / M.P. Kazmierkowski, R. Krishnan F. Blaabjerg. – Academic press, 2002.
7. **Visinka R.** Системы управления электродвигателями на микроконтроллерах фирмы Motorola / R. Visinka, L. Chalupa, I. Skalka // ChipNews. – 1999. – №1.
8. **Persson J.** Innovative standstill position detection combined with sensorless control of synchronous motors. – Lausanne, Switzerland.: École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL), 2005.
9. **Busca C.** Open loop low speed control for PMSM in high dynamic application. – Aalborg, Denmark: Aalborg universitet, 2010.
10. **Басков, С.Н.** Исследование бездатчикового определения углового положения ротора синхронного двигателя с помощью наложения высокой частоты / С.Н. Басков, К.В. Лицин // Электротехнические системы и комплексы. – 2014. – № 3 (24). – С. 32-34.
11. **Басков, С.Н.** Высокочастотная инжекция сигналов при бездатчиковом методе определения углового положения ротора синхронного двигателя / С.Н. Басков, К.В. Лицин // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2013. – №1. – С. 28-33.

## ТЕОРЕТИКО-МНОЖЕСТВЕННАЯ МОДЕЛЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КОМПОНЕНТОВ СЛОЖНО-СТРУКТУРИРОВАННОЙ СМЕСИ

Н.С. Сибилева<sup>1,a</sup>, О.С. Логунова<sup>1,b</sup>, В.В. Павлов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет  
им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск

<sup>2</sup>ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат», г. Магнитогорск

## SET-THEORETICAL MODEL OF INTERACTION BETWEEN THE COMPONENTS IN THE COMPLEX STRUCTURED MIXTURE

N.S. Sibileva<sup>1,a</sup>, O.S. Logunova<sup>1,b</sup>, V.V. Pavlov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>FSBEI HPENosov Magnitogorsk State Technical University  
38 Lenina av., Magnitogorsk, 455000, Russian Federation

<sup>2</sup>OJSC Magnitogorsk Iron and Steel Works, Scientific-Technical Center, Electric Arc Steel Laboratory

<sup>a</sup>natus224@gmail.com, <sup>b</sup>logunova66@mail.ru

**Аннотация.** В работе представлено описание состава сложно-структурированной смеси, изменяющей свою структуру под воздействием множества внешних воздействий, в терминах теории множеств. Модель множества, которая была получена благодаря проведенному исследованию, представлена как в аналитической форме, так и в графической форме в виде многослойного графа. Полученное множество состоит из кортежей переменной длины в 3D пространстве. В соответствии с построенной моделью был определен состав каждого из множеств применительно к задаче определения структуры шихтовых материалов для дуговой сталеплавильной печи, что, в свою очередь, позволило осуществить постановку математической модели формирования остаточных элементов (хрома, никеля и меди) в готовой стали. Математическая модель состоит из двух последовательных задач многокритериальной оптимизации.

**Ключевые слова:** теория множеств, сложно-структурированная смесь, многослойный граф, структура шихтовых материалов, дуговая сталеплавильная печь.

**Abstract.** The article presents the description of complex structured mixture, changing its structure under the influence of the multitude of external attacks, in terms of multitude theory. Model of the multitude, which has been received during the research, is represented not only in the analytical form, but also in graphical form of the multilayer diagram. The received multitude consists of the tuples, which has a variable length in the 3D space. According to developed technique the composition of each multitude in connection with the task of solving the structure of charging materials for electric arc furnace was determined. In its turn it made possible to set a mathematical model of forming the residual elements (chrome, nickel and cuprum) in steel. Mathematical model consists of two interrelated tasks of multicriteria optimization.

**Keywords:** multitude theory, the complex structured mixture, multilayer diagram, the structure of charging materials, electric arc furnace.

### Introduction

Existence of the complex structured mixtures in engineering sciences, such as metallurgy, pharmacy, building industry and chemistry, necessitates to find interrelations between the structure of the mixture at the inlet and at the outlet and also between the sets of the transforming actions. Identification of the qualitative and the quantitative interrelations can be estimated by the research of the empirical data, which were received within the process monitoring [1-4].

This is necessary for formulation the mathematical models of transformation the composition of the mixture and forecasting the most probable composition of the mixture. It helps to solve the tasks of transformation the structure of the mixture under the conditions, when the analytic description of the process is impossible. That is why it is possible to develop the common procedure of working with the complex struc-

tured mixtures and also to develop algorithms for working with the tasks of interrelated multicriteria optimization, are learned by the example of their using in the tasks of transformation the structure of the mixture.

Mathematical methods, which are the area of research, and the complex structured mixture, which is the object of research, in the aggregate helps to select the research subject: informational, mathematical and software support of the process of the transformation the complex structured mixture. For reliable and full research of this process the set-theoretic analysis of the task of the transformation of the complex structured mixture will be made and the necessary algorithms and models will be developed.

### Methods

Inside of the research – the complex structured mixture is the set of components, which are constitutes the parts

of the selected content, and the each component is represented by the set of the pieces, which are a single whole in terms of the chemical compound or simple fusion of the elements. The example of the complex structured mixture is the charging material for arc furnaces, which is compound of the several types of the materials (the scrap, the hot iron, the lime, the limestone and etc.) and each of these materials in its turn has the known beforehand chemical composition (ferrum, carbon, manganese, sulfur, phosphorus and etc.).

On the Fig. 1 there is the structure of the complex structured mixture, which is changing its own structure under the influence of the external action.

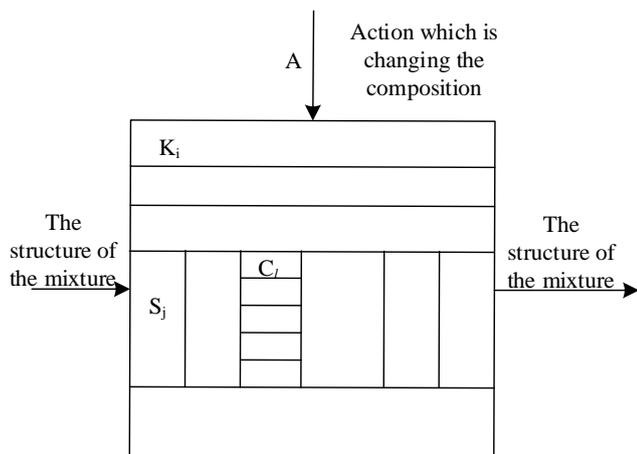


Fig. 1. The scheme of the transformation the complex structured mixture

Let us assume that the complex structured mixture consists of the  $n$  basic components [5], which are combined in the multitude  $K = \{K_i\}$ , where  $i = 1 \dots n$ . Each component  $K_i$  in its own composition has the multitude of the elements, and the each element this multitude can has the different quantity of the components. We will receive the multitude of the constituents  $K_i = \{S_{ij}\}$ , where  $i = 1 \dots n$  and  $j = 1 \dots m_j$ . Each of the element  $S_{ij}$  in its own is the multitude, which includes of the  $q_l$  elements: consists of  $S_{ij} = \{C_{ijl}\}$ , where  $i = 1 \dots n$ ,  $j = 1 \dots m_j$  and  $l = 1 \dots q_l$ .

Under the multitude of the actions  $A = \{A_p\}$ , where  $p = 1 \dots k_p$  in the mixture there are a lot of chemical reactions. As a result, the mixture changes its own structure and properties. Quantitative description of the type of action are based on the empirical laws and its systems.

At the outlet after the transformation we will receive a new mixture  $K'$  with a new structure.

Under these notations we will receive a mathematical model of the composition and the transformation of the complex structured mixture in the form of mapping of sets (Eq. 1):

$$K = \left\{ K_i = \left\{ S_{ij} = \left\{ C_{ijl} \right\} \right\} \right\} \xrightarrow{A = \{A_p\}} K', \quad (1)$$

where  $i = 1 \dots n, j = 1 \dots m_j, l = 1 \dots q_l$ .

As a result we have received the multitude, consists of the tuples, which has a variable length in the 3D space, represented of the Fig. 2.

As the example of the data receiving we can show the using of such mixtures in metallurgy. There is the structure of the information about melt in electric arc furnace on the Fig. 3.

## Results

As a part of the experimental study in the operating conditions while studying the transformation of the charging materials in electric arc furnace [6-8] the empirical information has been received. The structure of this information are showed on the Fig. 3.

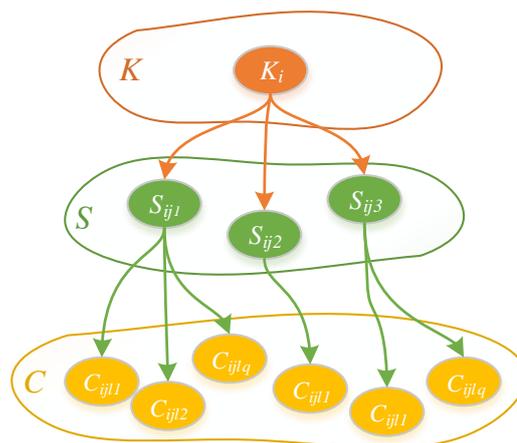


Fig. 2. Graphical presentation of the multitude of the components and their interaction in 3D space

On the Fig. 3 the notations for the following variables has been introduced:  $m_s$  – the weight of the scrap, [t];  $m_{HBI}$  – the weight of hot briquetted iron, [t];  $m_{HI}$  – the weight of the hot iron, [t];  $m_{PI}$  – the weight of the pig iron, [t];  $t_1$  – the periodic melt time, [min];  $t_2$  – the residence time of the arc under the current, [min];  $R$  – specific energy consumption, [kW/t];  $S_{Cr}$  – chrome content in steel, [%];  $S_{Ni}$  – nickel content in steel, [%];  $S_{Cu}$  – cuprum content in steel, [%];  $T_{out}$  – final steel temperature, [degrees Celsius].

In additional on the basis of presented information the following variables can be calculated: total weight of charging materials, [t]; hard phase proportion of charging materials. The values of all these variables are fixing in the real time, sending into the Enterprise Data Warehouse ERP and are extracting by the monitoring and diagnostic services in process of formation the local database for making statistical research of the steelmaking process.

In terms of built model the composition of each multitude will be determined in the following way.

The complex structured mixture – the melt in electric arc furnace is the multitude  $K$ , which consists of 4 main components:  $K_1$  – "Structure of the charging material",  $K_2$  – "Parameters of the electric power",  $K_3$  – "Chemical composition",  $K_4$  – "Temperature mode". These 4 main components builds up the multitude  $K = \{K_i\}$ , where  $i = 1 \dots 4$ .

Each of these 4 main components consists of specify quantity of elements.

Component "Structure of the charging material" consists of 4 elements – the weight of the each part of charging materials:  $S_{11}$  – "The weight of the scrap",  $S_{12}$  – "The weight

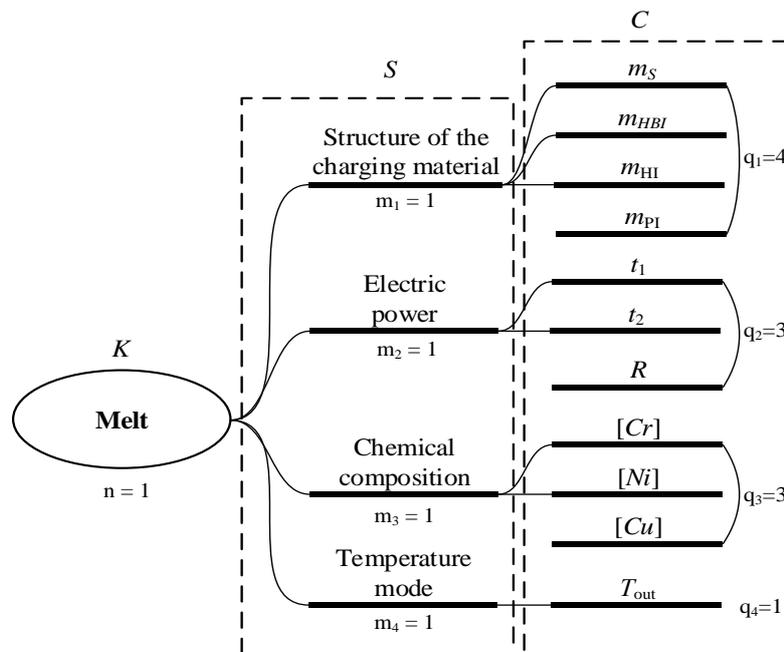


Fig. 3. The structure of the information of the heat of steel in electric arc furnace

of hot briquetted iron",  $S_{13}$  – "The weight of the hot iron",  $S_{14}$  – "The weight of the pig iron". These 4 elements build up the multitude  $K_1 = \{S_{1j}\}$ , where  $j = 1 \dots 4$ .

Component "Parameters of the electric power" consists of 3 elements:  $S_{21}$  – "The periodic melt time",  $S_{22}$  – "The residence time of the arc under the current",  $S_{23}$  – "The specific energy consumption". These 3 elements build up the multitude  $K_2 = \{S_{2j}\}$ , where  $j = 1 \dots 3$ .

Component "Chemical composition" consists of 3 elements:  $S_{31}$  – "Chrome content in steel",  $S_{32}$  – "Nickel content in steel",  $S_{33}$  – "Cuprum content in steel". These 3 elements build up the multitude  $K_3 = \{S_{3j}\}$ , where  $j = 1 \dots 3$ .

Component "Temperature mode" consists of 1 element:  $S_{41}$  – "Final steel temperature". This 1 element builds up the multitude  $K_4 = \{S_{41}\}$ .

### Discussion

The research of the components, which has been described above, allows to build the mathematical model of the forming of residual elements in steel, which consists of two interrelated tasks of multicriteria optimization [8, 9]. The first task consists of determining the weight of the scrap, which will ensure the minimum content of residual elements in steel and which will be determined by the furnace's manufacturing capability. The second task consists of determining the mass structure of the scrap, which weight has been found in the first task. However, the mass structure should allow to get the minimum chrome, nickel and cuprum content in steel in the case of the restrictions to the original and produced chemical compositions of the steel.

### REFERENCES

1. Basili, V. R., Empirical Software Engineering Issues. Critical Assessment and Future Directions / V.R. Basili, D. Rombach, K. Schneider, B. Kitchenham, D. Pfahl, R. W. Selby // Springer-Verlag Berlin Heidelberg. Vol. 4336 (2007), p. 22.
2. Matsko, I.I., Data acquisition and preparation methods for continuously cast billets quality analysis software. / I.I. Matsko, Y.V. Snegirev, O.S. Logunova // Applied Mechanics and Materials. Vol. 110-116(2012), pp. 3557-3562.
3. Park, S.H., Statistical Process Monitoring and Optimization / S. H. Park, G. G. Vining // Marcel Dekker, 2000, pp. 117-139.
4. Lin, J., Microstructure evolution in metal forming processes / J. Lin, D. Balint, M. Pietrzyk // Cambridge: Woodhead Publishing, 2012, pp. 17-35.
5. Tyrsin, A.N., Systems theory and systems analysis / A.N. Tyrsin // UrSEI ATIS, Chelyabinsk, 2002, pp. 28-60.
6. Pritchard, G., The crosslinking of eutectic mixtures of bismaleimides / G. Pritchard, M. Swan // European Polymer Journal, 1993, Vol. 29, pp. 357-363.
7. Ryabov, N.I., Research of structured backfill mixtures with high content of inert filler for isolation intensive absorption bands/ N. I. Ryabov, V.K. Davydov // Oil and Gas Technologies. Proceedings of the VI International Scientific and Practical Conference, October 14-16, 2009 in Samara, Vol. I, pp. 248-249.
8. Logunova, O.S., Stabilizing the residual contents of elements in steel by using alternative materials in the metallic charge of an arc steelmaking furnace / O.S. Logunova, V.V. Pavlov // Metallurgist. Vol. 58(3-4)(2014), pp. 299 – 305.
9. Logunova, O.S., Multicriterial Optimization of the Batch Composition for Steel-Smalt Arc Furnace / O.S. Logunova, E.G. Filippov, I.V. Pavlov, V.V. Pavlov // Steel in Translation. Vol. 43(1)(2013), pp. 34 – 38.

## НОВЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРУЗОК НА ОСНОВЕ ИНТЕРВАЛЬНЫХ АНАЛОГОВ ИНТЕРПОЛЯЦИОННЫХ СПЛАЙНОВ

**А.Г. Саидходжаев**

Ташкентский государственный технический университет им. А.Р.Беруни  
г.Ташкент. Узбекистан

## THE NEW METHOD FOR DETERMINING THE ELECTRICAL LOADS ON THE BASIS OF INTERVAL ANALOGUES INTERPOLATION SPLINES

**A. Saidkhodjaev**

Tashkent State Technical University named after A.R.Beruniy  
Tashkent city, Uzbekistan

anvarsaidkhodjaev@yandex.ru

**Аннотация.** В статье рассматривается новый метод определения расчетной электрической нагрузки электроприемников и электропотребителей жилых и общественных зданий на основе интервальных аналогов интерполяционных сплайнов. Показано, что расчетная электрическая нагрузка есть максимальная нагрузка в 30 минутном интервале, определяемая в виде уравнения функции кривой характерного (типового) суточного графика электрических нагрузок с вероятностью 0,7-0,9 и зная установленную (номинальную) мощность. Получена расчетная электрическая нагрузка без коэффициентов.

**Ключевые слова:** расчетная мощность, нагрузка, суточный график, интервальный метод, кривая функции, сплайн-функция, характерный (типовой), электроснабжение городов.

**Abstract.** The article discusses a new method for determining the estimated electricity demand for power consumers and electro consumers of residential and public buildings on the basis of interval analogues of interpolation splines. As the estimated electrical load is the maximum load in the range of 30 minutes, we find the equation of the curve characteristic function (typical) of the daily schedule of electric loads with a probability of 0.7 to 0.9, and knowing the set (nominal) power can be calculated to determine the electrical load without any coefficients.

**Keywords:** calculated power, load, daily schedule, interval method, the curve function, spline function characteristic (typical), urban power supply.

### Актуальность проблемы

В Республике Узбекистан широким фронтом идет реконструкция и модернизация всего энергетического комплекса, строятся 8 новых электростанций, подстанций и линий электропередач, обновляется вся система учета и контроля электроэнергии, на основе многофункциональных электронных счетчиков (АСКУЭ). Общий объем иностранных инвестиций в энергетику Узбекистана составляет 1,3 миллиарда долларов США. Реконструкция и модернизация существующих и проектируемых новых городских электрических сетей, отвечающих требованиям нового времени, ставит задачу разработки новых подходов, методов и формул определения максимальных (расчетных) электрических нагрузок, рационального использования электроэнергии, надежного и качественного электроснабжения приемников и потребителей электроэнергии в городах, что на данном этапе являются весьма актуальными и жизненно необходимыми. Решение задач электроснабжения городов немислимо без точного и обоснованного определения максимальных (расчетных) электрических нагрузок, так как электрические нагрузки лежат в основе всех расчетов электроснабжения и рационального построения городских электрических сетей.

### Основные проблемы и решения

Существующие методы определения расчетных электрических нагрузок имеют много недостатков:

- низкая точность;
- отличие от реальных нагрузок, особенно суммарных нагрузок;
- не учитывают фактор времени собственного максимума электрических нагрузок каждого типа потребителя;
- не учитывают вероятностный характер электрических нагрузок городской сети.

Суть предложенного нового метода определения расчетных электрических нагрузок заключается в следующем (имеется 2 патента):

Для каждого потребителя на основе многочисленных измерений по теории вероятностей определяется характерный (типовой) свой суточный график, своя формула определения расчетной электрической нагрузки, свой получасовой максимум нагрузки. Задача найти уравнение кривой функции суточного графика электрических нагрузок методом Лагранжа, методом Беселя, методом Ньютона, методом Чебышева, сплайн – функциями 3 порядка или другими методами, чтобы получить как можно ближе расчетный суточный график к типовому суточному графику

электрических нагрузок, с минимальной ошибкой. Нами был принят метод на основе интервальных аналогов интерполяционных сплайнов [2].

Способ приближения сплайнами, интересен прежде всего отношением к нему. Одни считают его универсальным методом решения проблем, стоящих перед численным анализом, и ищут применения ему в самых различных направлениях, другие рассматривают его как очередную дань переменчивой математической моде. Повидимому, истина проходит где-то посередине; в настоящее время область применения этого метода непрерывно растет.

Для определенности будем говорить о приближении функции  $f(x)$  на отрезке  $[0, 1]$ . Отрезок (суточный график) разбивается на части [3]:

$$[x_0, x_1], \dots, [x_{N-1}, x_N], x_0 = 0, x_N = 1.$$

Обозначим это разбиение через  $\Delta$ . Назовем сплайном  $S_{\Delta}^m$  порядка  $m$  функцию, являющуюся многочленом степени  $m$  на каждом из отрезков  $[x_{n-1}, x_n]$

$$S_{\Delta}^m(f, x) = P_{nm}(x) = a_{n0} + \dots + a_{nm}x^m \text{ при } x_{n-1} \leq x \leq x_n$$

и удовлетворяющую условиям непрерывности производных до порядка  $m-1$  в точках  $x_1, \dots, x_{N-1}$ :

$$P_{nm}^{(k)}(x_n) = P_{n+1,m}^{(k)}(x_n) \quad (2)$$

при  $k = 0, \dots, m-1, n = 1, \dots, N-1$ .

Всего имеется в распоряжении  $Q = N(m+1)$  неизвестных  $a_{nm}$ , соотношения (2) образуют систему из

$(N-1)m$  уравнений. Другие уравнения для коэффициентов получаются из условия близости к приближаемой функции и из некоторых дополнительных условий.

На основе реальных характерных суточных графиков электрических нагрузок разработана формула, функция кривой которой близко описывает характерный (типовой) суточный график электрической нагрузки каждого в отдельности потребителя электроэнергии.

Аналитическая формула кривой суточного графика электрических нагрузок определена для каждого типа электропотребителя на основе уравнений Сплайн-функций третьего порядка. На основе предложенного алгоритма разработана программа расчета коэффициентов кубического полинома Сплайн-функции. В результате расчёта на ПК получаем таблицу 1 определения  $M_i$ .

$$\begin{aligned} S_3(x) &= \frac{M_{i-1}}{6h_i} (x_i^3 - 3x_i^2x + 3x_ix^2 - x^3) + \\ &\frac{M_i}{6h_i} (x^3 - 3x^2x_{i-1} + 3xx_{i-1}^2 - x_{i-1}^3) + \\ &+ \frac{f_{i-1}}{h_i} x_i - \frac{M_{i-1} \cdot h_i^2}{6h_i} x_i - \frac{f_{i-1}}{h_i} x + \frac{M_{i-1} \cdot h_i^2}{6h_i} x + \\ &+ \frac{f_i}{h_i} x - \frac{f_i}{h_i} x_{i-1} - \frac{M_i \cdot h_i^2}{6h_i} x + \frac{M_i \cdot h_i^2}{6h_i} x_{i-1} = \\ &= (M_i - M_{i-1}) \cdot \frac{x^3}{6h_i} + \frac{3}{6h_i} \cdot (M_ix_i - M_{i-1}x_{i-1})x^2 + \\ &+ (M_i \cdot x_{i-1}^2 - M_{i-1} \cdot x_i^2 - 2f_{i-1} + M_{i-1} \cdot h_i^2 - \\ &- M_i \cdot h_i^2 + 2f_i)x + (M_{i-1} \cdot x_i^3 - M_i \cdot x_{i-1}^3 + \\ &+ 6f_{i-1} \cdot x_i - 6f_i \cdot x_{i-1} - M_{i-1} \cdot h_i^2 \cdot x_i + \\ &+ M_i \cdot h_i^2 \cdot x_{i-1}) \frac{1}{6h_i} = a_{i0} \cdot x^3 + a_{i1} \cdot x^2 + a_{i2} \cdot x + a_{i3} \end{aligned}$$

Таблица 1

i	X <sub>i</sub>	f <sub>i</sub>	h <sub>i</sub>	l <sub>i</sub>	b <sub>i</sub>	c <sub>i</sub>	d <sub>i</sub>	a <sub>i</sub>	g <sub>i</sub>	e <sub>i</sub>	M <sub>i</sub>
1	0	15,1	1	1/6	2/3	1/6	63,4	2/3	0	0	0
2	1	17,43	1	1/6	2/3	1/6	-5,85	0,667	-0,25	-8,775	-9,8644
3	2	13,91	1	1/6	2/3	1/6	4,33	0,625	-0,2667	9,268	4,3577
4	3	14,72	1	1/6	2/3	1/6	9,74	0,622	-0,2678	13,171	18,4135
5	4	25,27	1	1/6	2/3	1/6	-6,31	0,622	-0,2679	-13,67	19,5717
6	5	29,51	1	1/6	2/3	1/6	2,83	0,622	-0,2679	8,2135	22,0133
7	6	36,58	1	1/6	2/3	1/6	-6,31	0,622	-0,2679	-12,345	-51,5013
8	7	37,34	1	1/6	2/3	1/6	52,35	0,622	-0,2679	87,472	146,1320
9	8	90,45	1	1/6	2/3	1/6	-99,26	0,622	-0,2679	-183,02	-218,9268
10	9	44,30	1	1/6	2/3	1/6	47,97	0,622	-0,2679	126,163	134,0153
11	10	46,12	1	1/6	2/3	1/6	2,53	0,622	-0,2679	-29,738	-29,3145
12	11	50,47	1	1/6	2/3	1/6	-6,09	0,622	-0,2679	-1,8226	-1,5771
13	12	48,73	1	1/6	2/3	1/6	-1,78	0,622	-0,2679	-2,37	-0,9169
14	13	45,21	1	1/6	2/3	1/6	6,11	0,622	-0,2679	10,458	-5,4353
15	14	47,80	1	1/6	2/3	1/6	24,4	0,622	-0,2679	36,426	-59,3181
16	15	74,79	1	1/6	2/3	1/6	-39,14	0,622	-0,2679	-72,686	-85,4369
17	16	62,64	1	1/6	2/3	1/6	19,91	0,622	-0,2679	51,486	47,5897
18	17	70,40	1	1/6	2/3	1/6	10,45	0,622	-0,2679	3,0048	14,5382
19	18	88,61	1	1/6	2/3	1/6	-19,34	0,622	-0,2679	-31,913	-43,0425
20	19	87,48	1	1/6	2/3	1/6	13,65	0,622	-0,2679	30,4965	41,5918
21	20	100	1	1/6	2/3	1/6	-19,4	0,622	-0,2679	-39,36	-41,4246
22	21	93,12	1	1/6	2/3	1/6	-3,59	0,622	-0,2679	4,775	7,7066
23	22	82,65	1	1/6	2/3	1/6	-6,01	0,622	-0,2679	-10,94	-10,9416
24	23	66,17	1	1/6	2/3	1/6	-34,59	0,622	-0,2679	-52,679	0

$$\text{где } a_0 = \frac{M_i - M_{i-1}}{6h_i}; \quad a_1 = \frac{1}{2h_i}(M_{i-1}x_i - M_i \cdot x_{i-1});$$

$$a_2 = \frac{1}{2h_i}(M_i \cdot x_{i-1}^2 - M_{i-1} \cdot x_i^2 +$$

$$+ M_{i-1} \cdot h_i^2 - M_i \cdot h_i^2 - 2f_{i-1} + 2f_i);$$

$$a_3 = \frac{1}{6h_i}(M_{i-1} \cdot x_i^3 - M_i \cdot x_{i-1}^3 + 6f_{i-1} \cdot x_i -$$

$$- 6f_i \cdot x_{i-1} + M_i \cdot h_i^2 \cdot x_{i-1} - M_{i-1} \cdot h_i^2 \cdot x_i).$$

На базе этого алгоритма подставляем из таблицы –  $M_i, f_i, h_i, x_i$  и получим систему 24 уравнений 3-го порядка.

Для кривой суточного графика электрических нагрузок вводим коэффициенты из системы уравнений, имеющие общий вид

$$S_3(x) = a_{i0}x^3 + a_{i1}x^2 + a_{i2}x + a_{i3}$$

где  $a_{i0}, a_{i1}, a_{i2}, a_{i3}$  - коэффициенты каждого уравнения.

В результате получили 24 уравнения 3-го порядка:

$$\begin{aligned} [0:1] 1) S_1 &= -1,644x^3 + 3,974x + 15,1 \\ [1:2] 2) S_2 &= 2,37x^3 - 12,04x^2 + 16,017x + 11,085 \\ [2:3] 3) S_3 &= 2,342x^3 - 11,877x^2 + 15,68x + 11,307 \\ [3:4] 4) S_4 &= -6,331x^3 + 66,187x^2 - 218,49x + 245,49 \\ [4:5] 5) S_5 &= 6,93x^3 - 92,95x^2 + 418,06x - 603,256 \\ [5:6] 6) S_6 &= -12,252x^3 + 194,793x^2 - 1020,682x + 1794,65 \\ [6:7] 7) S_7 &= 32,938x^3 - 618,65x^2 + 3859,98x - 7966,675 \\ [7:8] 8) S_8 &= -60,843x^3 + 1350,77x^2 - 9925,98x + 24200,565 \\ [8:9] 9) S_9 &= 58,82x^3 - 1521,232x^2 + 13050,05x - 37068 \\ [9:10] 10) S_{10} &= -27,225x^3 + 801,99x^2 - 7858,9x + 25658 \\ [10:11] 11) S_{11} &= 4,623x^3 - 153,34x^2 + 1694,4006x - 6186 \\ [11:12] 12) S_{12} &= 0,1104x^3 - 4,42x^2 + 56,2319x - 179 \\ [12:13] 13) S_{13} &= -0,753x^3 + 26,65x^2 - 316,6304x + 1311 \\ [13:14] 14) S_{14} &= 10,792x^3 - 423,61x^2 + 5536,832x - 24053 \\ [14:15] 15) S_{15} &= -24,21x^3 + 1042,9x^2 - 14994,9x + 71991 \\ [15:16] 16) S_{16} &= 22,1711x^3 - 1040,4x^2 + 16254,4x - 84466 \\ [16:17] 17) S_{17} &= -5,50058x^3 + 288,2x^2 - 5002,55x + 28852 \\ [17:18] 18) S_{18} &= -9,5967x^3 + 496,7x^2 - 8547x + 48971 \\ [18:19] 19) S_{19} &= 14,1057x^3 - 783,2x^2 + 14491,80x - 89261 \\ [19:20] 20) S_{20} &= -13,83605x^3 - 809,4x^2 - 15769x + 102390 \\ [20:21] 21) S_{21} &= 8,188x^3 - 512,023x^2 + 10660,36x - 73805 \\ [21:22] 22) S_{22} &= -3,108x^3 + 199,6x^2 - 4284,9x + 30811 \\ [22:23] 23) S_{23} &= 1,8236x^3 - 125,8x^2 + 2875,7x - 21700 \\ [23:24] 24) S_{24} &= -0,0208x^3 + 13,88x \end{aligned}$$

Подставляя данные из суточного графика в эти уравнения, можно получить отрезки кривой суточного графика и, сложив все 24 отрезка, в результате получить расчетную кривую суточного графика, почти полностью совпадающую с характерным суточным графиком электрических нагрузок потребителей [2] (рис. 1).

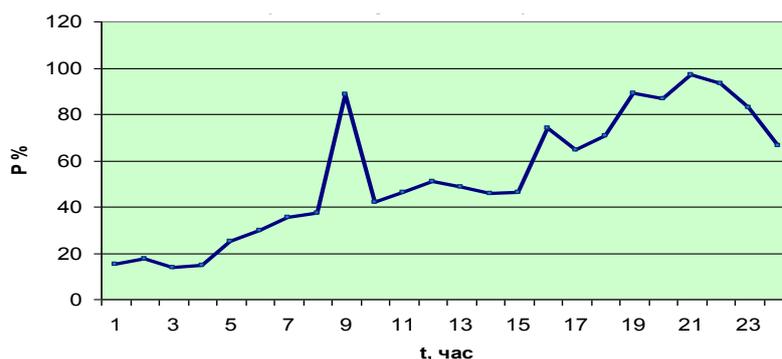


Рис. 1. Суточный график электропотребителя (сплайн расчетный)

Таким образом, предложенным новым методом определено уравнение функции кривой суточного графика электрических нагрузок. Получасовой максимум – результат решения уравнений суммирования интервальных сплайнов позволяет получить расчетную электрическую нагрузку с вероятностью 0,7-0,9. Максимум электрической нагрузки этого уравнения и есть расчетная электрическая нагрузка данного потребителя[4].

Суммарные расчетные электрические нагрузки определяют на основе характерных суточных графиков электрических нагрузок каждого потребителя, входящего в эту сеть, от потребителя до трансформаторного пункта (ТП), (РП) и далее до источника питания (ИП), путем сложения всех графиков по каждому получасу, т.е. 48 вариантов и максимальная из этих сумм и будет суммарной максимальной (расчетной) электрической нагрузкой. Расчет более точен, так как учитывает фактор времени, собственные максимумы нагрузки каждого потребителя, без каких – либо коэффициентов участия в максимуме и коэффициентов совмещения максимумов, которые дают увеличение общей погрешности расчетов [4].

## ЛИТЕРАТУРА

1. И.Г.Карапетян, Д.Л.Файбисович, И.М.Шапиро Справочник по проектированию электрических сетей., www.electrik.org, 2012 .
2. Шаҳарларнинг электр таъминоти муаммолари ва ривожланиш истикболлари. Монография / А.Ғ. Саидходжаев; масъул муҳаррир акад.Р.А.Зоҳидов; УзР Олий ва ўрта махсус таълим вазирлиги, ТошДТУ. – Тошкент: Фан, 2012, -256 б.
3. С.А.Калмыков, Ю.И.Шокин, З.Х.Юлдашев Методы интервального анализа. Новосибирск: Наука, 1986.
4. А.Г. Саидходжаев, Б.М. Тешабаев Способ определения максимальной электрической нагрузки электрической сети и способ определения максимальной электрической нагрузки отдельных электропотребителей. Патент № IAP 04216 (IAP 20060404).
- 5.Завялов Ю.С., Квасов Б.И., Мирошниченко В.Л. Методы Сплайн-функции. М.: Наука, 1980. – 352 с.
6. Кужеков С. Л., Гончаров С. В. Городские электрические сети. Уч.пособие. Ростов-на-Дону: МарТ, 2001. – 256 с.
7. С.Д. Волобринский, Г.М. Каялов, П.Н.Клейн, Б.С. Мешель Электрические нагрузки промышленных предприятий. Л.: «Энергия», 1971 - 264 с.
8. Б.И. Кудрин Электроснабжение промышленных предприятий. М.: «Вышш. шк.», 2002. – 426 с.

## ПОДХОД К УПРАВЛЕНИЮ КИСЛОРОДНО-КОНВЕРТЕРНЫМ ПРОЦЕССОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМПЛЕКСНЫХ МОДЕЛЕЙ

М.Ю. Рябчиков<sup>1</sup>, Т. Г. Сухоносова<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г.Магнитогорск, Россия.

## APPROACH TO CONTROL OF OXYGEN-STEEL MAKING PROCESS BASED ON COMPLEX MATHEMATICAL MODEL

M.Yu. Ryabchikov<sup>1</sup>, T.G. Suhonosova<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

<sup>1</sup>mr\_mgn@mail.ru, <sup>2</sup>tgobuhova@gmail.com

**Аннотация.** Для определения управляющих воздействий предлагается использование комплексной физико-химической модели конвертерной плавки, которая содержит подсистему моделирования выбросов. На базе модели, исходя из начальных параметров процесса, предлагается определять рациональную схему продувки. В статье приведены примеры результатов расчета по комплексной физико-химической модели кислородно-конвертерной плавки для разных режимов продувки.

**Ключевые слова:** управление с использованием модели математической модели, автоматизированная система, кислородный конвертер, выбросы.

**Abstract.** To determine the command variable propose to use a complex physical-chemical model of basic oxygen process, this model contains a subsystem modeling emissions. The initial process parameters based on model is proposed to determine a rational mode oxygen lancing. The article gives examples of the results of calculations, that on complex physico-chemical model of oxygen-steel making process for different modes of lancing.

**Keywords:** control based on mathematical model, the automation system, basic oxygen furnace, BOF, emissions.

Сложность и быстрота физико-химических процессов протекающих в кислородном конвертере, высокие температуры и существенный дрейф рабочих параметров плавки, а также повышение требований к технико-экономической эффективности и надежности систем автоматизации требуют разработки более совершенных способов управления.

Управление кислородно-конвертерным процессом происходит с нехваткой информации об основных параметрах плавки: отсутствует точная информация о начальных параметрах шихтовых материалов, состава лома и температуры чугуна, а также нет возможности проводить непрерывные измерения концентрации углерода и температуры металла.

Целенаправленное изменение протекания технологического процесса в конвертере производится путем изменения параметров дутьевого режима, то есть расхода кислородного дутья и положения фурмы. Для расчета перемещения фурмы и расхода дутья на данный момент применяются типовые усредненные профили, что не позволяет учитывать индивидуальные особенности каждой плавки и приводит не только к перерасходу энергоресурсов и времени рабочего цикла, но и к созданию угроз аварийных ситуаций при выбросах из конвертера шлака и расплавленного металла. Для определения управляющих воздействий была разработана комплексная физико-химическая модель конвертерной плавки, которая учитывает начальные параметры процес-

са и определяет рациональную схему продувки. Для исключения угроз выбросов предусмотрена динамическая модель, позволяющая оперативно вносить корректирующие воздействия в схему продувки.

Модель расчета конвертерной плавки может быть представлена в виде четырех основных подсистем, см. рис. 1.

Первая подсистема – это система расчета подачи кислорода и сыпучих материалов на конвертерную плавку при обеспечении заданного отношения массы загруженного лома к массе заливаемого чугуна и возможности получения одновременно заданного содержания углерода и температуры при окончании продувки. Критериями эффективности работы системы является отсутствие грубых ошибок по конечному содержанию углерода и температуры ванны, стабилизация окисленности шлака, недопустимость выбросов металла и шлака из конвертера.

Вторая подсистема – это динамическая модель для оперативного предотвращения выбросов и обеспечения максимально возможного выхода жидкого металла заданного качества и коэффициентов распределения фосфора и серы между конечным шлаком и металлом. Критериями эффективности работы системы является минимизация выбросов и выносов пыли из конвертера и вероятность получения металла с заданным содержанием примесей.

Третья подсистема рассчитывает коррекцию зак-

лючительного этапа продувки при обеспечении максимальной вероятности попадания в заданные пределы по содержанию углерода и температуры ванны. Критерием эффективности работы системы является число плавов, требующих коррекции после окончания продувки.

Четвертая подсистема адаптации и коррекции алгоритмов и коэффициентов модели при обеспечении эффективного функционирования.

Определяющее значение для эффективной работы алгоритмов имеют источники информации и вспомогательные подсистемы контроля и прогноза состояния конвертерной плавки, рис. 1. Основными являются исходные данные по шихте, лому, чугуну и информация о составе и объеме отходящих газов.

В задачу статической подсистемы входит также предварительное определение изменения расхода кислорода, положения фурмы по ходу продувки, а также режима присадок сыпучих добавок. Существуют два подхода к решению этой задачи.

Согласно первому традиционному подходу в память ЭВМ закладываются несколько вариантов моделей. Например, в АСУ ТП конвертерной плавки одного из японских цехов заложены 15 моделей изменения положения фурмы и расхода кислорода, изменения расхода нейтральных газов, а также режима присадок сыпучих. Модели разрабатываются на основе анализа промышленных плавов. Перед началом плавки статическая подсистема АСУ автоматически выбирает необходимые модели, ориентируясь прежде всего на плавки-эталон для заданной группы марок стали. Выбрать модели может и оператор управления конвертером, исходя из собственных представлений о планируемой плавке, с учетом, например, качества металлолома,

полноты удаления шлака из конвертера на предыдущей плавке и других факторов, которые сложно учесть на ЭВМ.

Согласно второму подходу, дутьевой режим и режим присадок следует рассчитывать на каждую плавку. Поскольку дутьевой режим и режим присадок должны прежде всего обеспечить удовлетворительное шлакообразование, основным критерием при таком расчете является заданное изменение состава шлака по ходу продувки, согласованное с изменением температуры металла, которое, в свою очередь, зависит от состава и температуры чугуна, соотношения чугуна — лом, массы и качества лома, режима присадок сыпучих и т. д.

До последнего времени считалось, что подобные расчеты требуют чрезмерно больших допущений, что снижает точность расчета, и, кроме того, при этом занимается значительный объем памяти ЭВМ. Однако современные достижения в области численных методов позволили создать комплексные модели конвертерного процесса учитывающие индивидуальную скорость нагрева, растворения и плавления каждого добавленного материала; скорость протекания реакций; режимы перемешивания конвертерной ванны и многие другие особенности. Подобная модель, разработанная на кафедре АСУ МГТУ им. Г.И. Носова используется в составе имитационного тренажера для обучения сотрудников металлургических предприятий ОАО «НЛМК» и ОАО «ММК».

Одна из задач управления — исключение выбросов. Интенсивность выбросов зависит от двух основных процессов в кислородном конвертере определяющих режим плавки: шлакообразование (количество, физические и химические свойства шлака) и газовыделение (обезуглероживание).



Рис. 1. Структурная схема алгоритмов контроля и управления конвертерным процессом

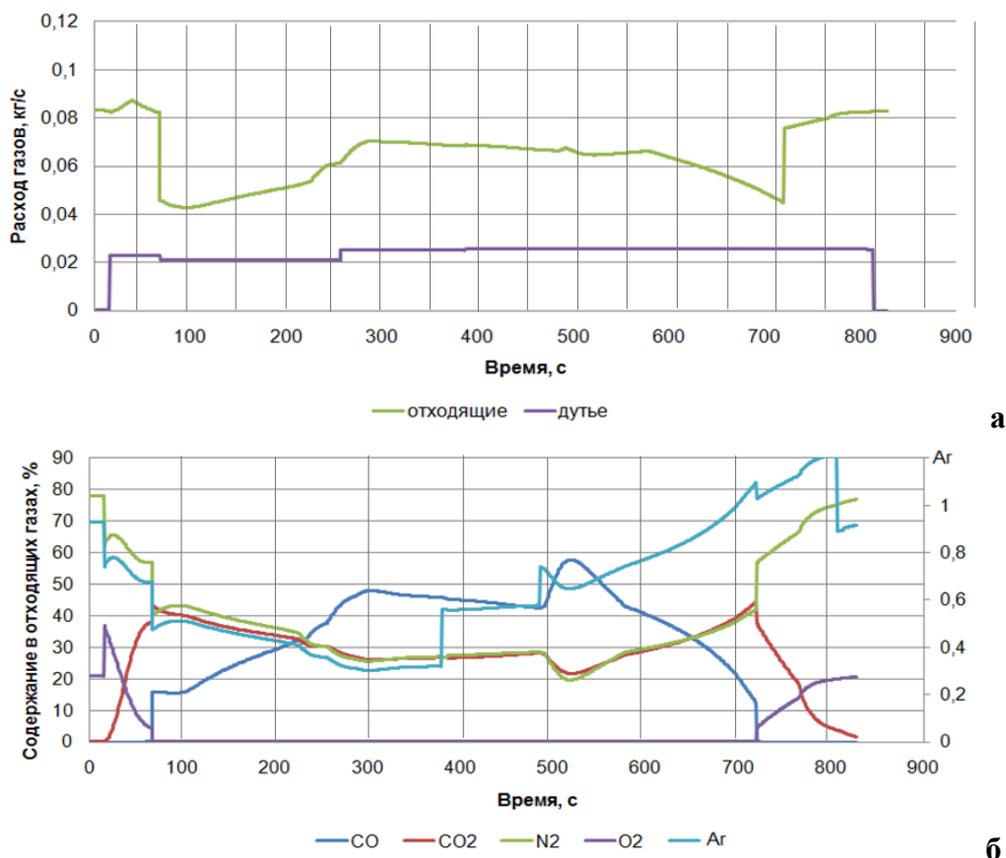


Рис. 2. Изменение расходов отходящих газов и дутья (а) и состава отходящих газов (б) при высокой интенсивности продувки

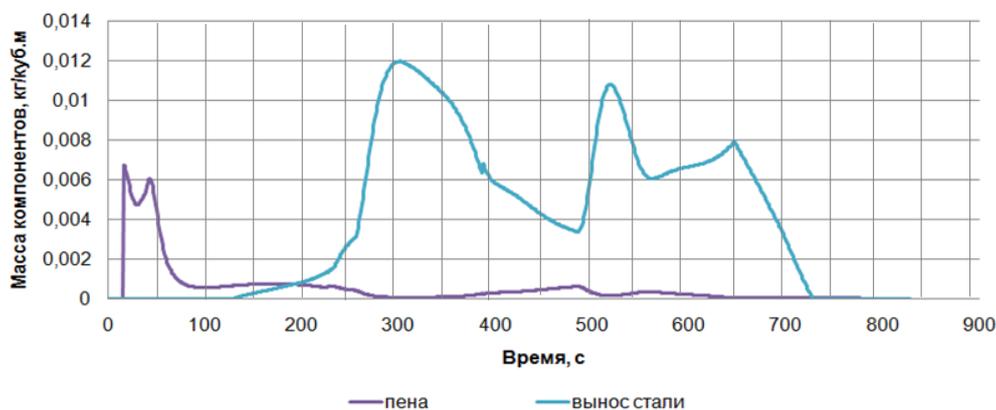


Рис. 3. Изменение массы выносов пыли и пены при высокой интенсивности продувки

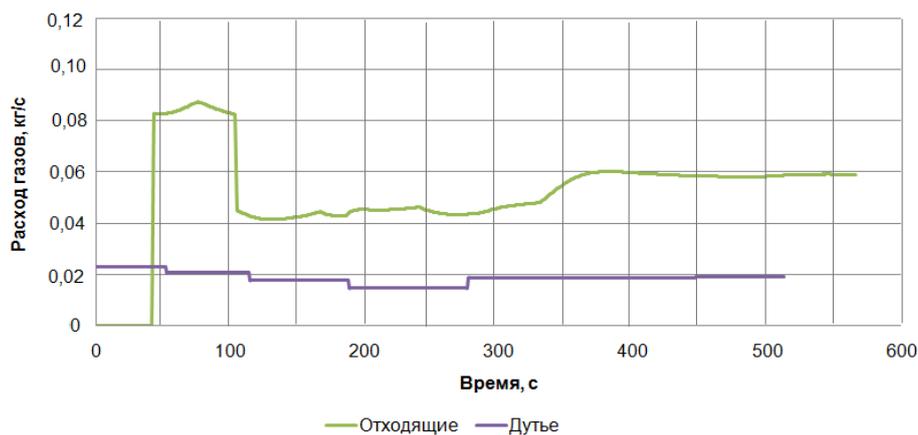
Для максимальной интенсификации процесса при обеспечении приемлемого уровня выбросов необходимы различные управляющие воздействия: выбор рациональных стратегий изменения положения фурмы по ходу процесса и расхода кислорода; интенсивность и газ донной продувки; моменты подачи сыпучих материалов. Разработанная комплексная модель процесса содержит подсистему моделирования выбросов, основанную на расчете критерия Фруда, определяющего волнообразование в конвертерной ванне. В качестве примера рассмотрим результаты расчета двух различных режимов с различной интенсивностью продувки.

Расчет уровня ванны конвертера ведется с учетом вспениваемости и вязкости шлака. Исследования на моделях показали [1], что на вспениваемость конвертено-

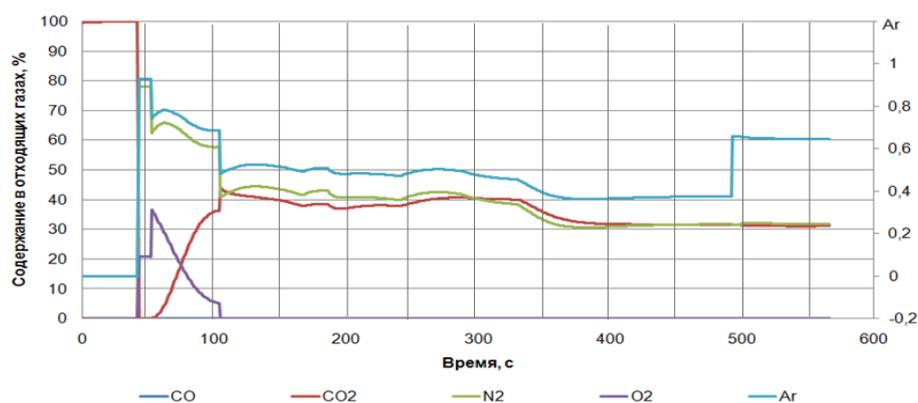
го шлака влияет множество параметров: число Фруда, доля твердых включений в шлаковых пленках [5], концентрация оксидов Ca, Si, Fe в шлаке [4].

Таким образом, при заданных параметрах исходной шихты и требуемых параметрах продукта по рассмотренной модели рассчитывается оптимальный по производительности график продувки и подачи материалов с условием ведения процесса при заданном уровне выбросов.

Результаты расчета по комплексной физико-химической модели конвертерной плавки при чрезмерной интенсивности продувки представлены на рис. 2. Для расчета были выбраны следующие начальные условия: чугун 270 т, лом 70 т, фом 2 т, окатыши 5 т, известь загрузили в два приема по 10 т.

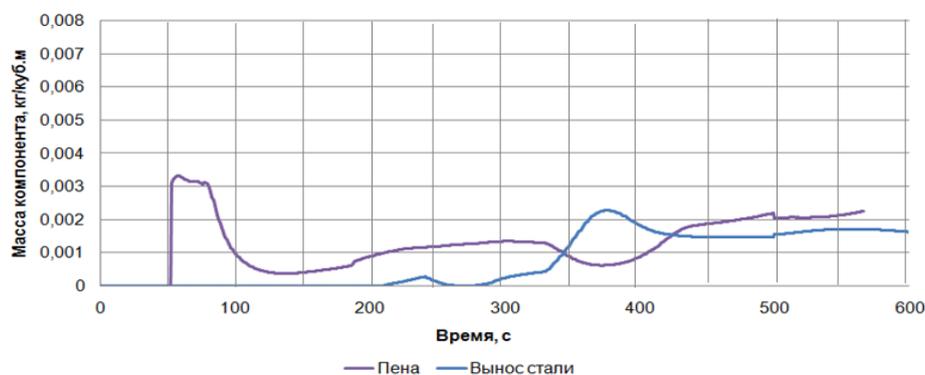


а



б

**Рис. 4. Изменение расходов отходящих газов и дутья (а) и состава отходящих газов (б) при нормальной интенсивности продувки (показаны первые 600с процесса)**



**Рис 5. Изменение массы выносов пыли и пены из конвертера при нормальной интенсивности продувки (показаны первые 600с процесса)**

При интенсивной продувке количество отходящих газов остается на высоком уровне в течение всей плавки. Увеличение количества отходящих газов сверх определенного предела приводит к интенсивному волнообразованию и малому слою пены и, как следствие, большому количеству выносов шлако-металлической эмульсии из конвертера по ходу плавки, см. рис. 3.

Результаты расчета при тех же начальных условиях для нормальной интенсивности продувки представлены на рис. 4. Количество отходящих газов достигает максимального значения в начале продувки, когда опасность выбросов минимальна. Соотношение CO и CO<sub>2</sub> соответствует хорошему режиму продувки без опасности выбросов. При низкой интенсивности продувки наблюдается хорошее образование пены в на-

чальный период плавки, что позволяет быстрее войти в стабильный режим обезуглероживания расплава без резких изменений уровня ванны конвертера, рис. 5.

В результате использования разработанной комплексной физико-химической модели процесса возможно рассчитать такие траектории изменения положений фурмы и расхода кислорода на продувку, при которых угроза выбросов будет минимальна при заданном уровне производительности и выходе параметров стали на заданные значения.

Эффективное управление всеми стадиями кислородно-конвертерного процесса позволит получить жидкий металл соответствующего состава и температуры при отсутствии чрезвычайных ситуаций и вынужденных простоев для ремонта.

---

---

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Бойченко, Б.М.** Конвертерное производство стали: теория, технология, качество стали, конструкции агрегатов, рециркуляция материалов и экология [Текст] / Б.М. Бойченко, В.Б. Охотский, П.С. Харлашин // – Днепропетровск: Днепр-ВАЛ, 2006. – 454 с.
2. **Бигеев, А.М.** Металлургия стали. Теория и технология плавки стали [Текст] : учебник для вузов / А.М. Бигеев, В.А. Бигеев. // – 3-е изд., перераб. и доп. – Магнитогорск: МГТУ, 2000. – 544 с.
3. **Обухова, Т.Г.** Обзор методов математического моделирования процессов в кислородном конвертере при решении задач управления [Текст] / Т.Г.Обухова, М.Ю.Рябчиков // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. 2013. Т. 2. -№ 71. -С. 146 – 148.
4. **Хамхотько, А.Ф.** Прогнозирование свойств рафинировочных шлаков системы  $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO-CaF}_2$  [Текст] / А.Ф. Хамхотько, Э.В. Приходько, Д.Н. Тогобицкая, О.В. Кукса // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: Сб. научн. тр. Днепропетровск: ІСМ НАН України. 2004. – Вып. 9. – С. 170 –177.
5. **Рябчиков, М.Ю.** К вопросу о моделировании выбросов и выносов из кислородного конвертера [Текст] /М.Ю.Рябчиков, Т.Г.Сухоносова// Автоматизированные технологии и производства. 2014. -№ 6. – С. 259–262.
6. **Горохов, М.А.** Использование информации о составе отходящих газов для контроля и управления ходом плавки [Текст] / М.А. Горохов, Т.Г. Обухова, А.И. Блохин, Е.С. Рябчикова// Автоматизированные технологии и производства. 2013.– № 5.– С. 224 – 227.

## ПРИКЛАДНЫЕ МОДЕЛИ ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В АГРЕГАТЕ ПЕЧЬ-КОВШ ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В ЗАДАЧАХ УПРАВЛЕНИЯ И ОБУЧЕНИЯ

М.Ю. Рябчиков<sup>1</sup>, Е.С. Рябчикова<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»,  
г.Магнитогорск, Россия.

## APPLIED MODELS OF CHEMICAL PROCESSES IN LADLE FURNACE USED FOR CONTROL AND TRAINING TASKS

M.Yu. Ryabchikov<sup>1</sup>, E.S.Ryabchikova<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

<sup>1</sup>mr\_mgn@mail.ru

**Аннотация.** В статье рассматривается упрощенная модель химических процессов протекающих при обработке стали в агрегате печь-ковш, основанная на использовании смещенных коэффициентов равновесия химических реакций. Достоинством модели является относительная простота ее настройки и возможность последующего использования в имитационных тренажерах для обучения сотрудников предприятий или при решении задач управления режимами работы агрегата печь-ковш.

**Ключевые слова:** агрегат печь-ковш; химические процессы; раскисление; десульфурация; моделирование.

**Abstract.** The paper overviews a simplified model of steel treatment in ladle furnace based on shifted equilibrium factors of chemical reactions. Relative simplicity of setting and further usage in simulation trainers are the advantage of the model. It is suitable for employers' training or solving issues of modes control for ladle furnace.

**Keywords:** ladle furnace; chemical processes; deoxidation; desulphurization; modeling.

Большинство существующих моделей [1, 2, 3] расчета температуры, перемешивания и протекания химических реакций в агрегате печь-ковш предполагают однородность среды. При этом особенности движения жидкой стали учитываются путем расчета энергии или времени перемешивания [3]. Однако, подобный подход не позволяет объяснить динамику химических процессов в агрегате печь-ковш, так как скорость реакций во многом определяется режимом перемешивания и температурой, которая может значимо отличаться, как для различных областей ковша, так и для разных стадий процесса вследствие изменения физических свойств шлака.

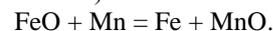
Рассматриваемая далее модель химических процессов ориентирована на представление стали и шлака набором конечных объемов, геометрические характеристики которых могут изменять по ходу процесса (для шлака).

При моделировании протекания химических реакций на границе шлак-металл соприкасающиеся сегменты верхнего слоя стали (5% по высоте) и шлака рассматриваются как единая среда, в которой протекают реакции. Принято, что скорость протекания пропорциональна отклонению реакции от равновесия; массам реагентов; средней скорости движения расплава и обратно пропорциональна вязкости шлака. Принято, что при отсутствии перемешивания скорость реакций значительно снижается (подобранное при настройке модели значение предполагает снижение скорости до 400 раз).

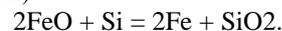
Список моделируемых 15-ти реакций представлен ниже. Некоторые реакции, в зависимости от равновесия, могут протекать в одну или другую сторону. Для отдельных реакций, независимо от равновесия протекание в одну из сторон запрещено, то есть реакция может полностью прекратиться.

Список реакций:

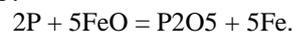
*Реакция 1* - только в обратную сторону (Mn переходит только в сталь):



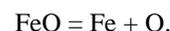
*Реакция 2* - только в обратную сторону (Si переходит только в сталь):



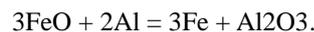
*Реакция 3:*



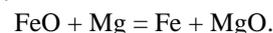
*Реакция 4:*



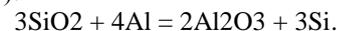
*Реакция 5:*



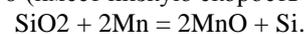
*Реакция 6:*



*Реакция 7* - только в прямую сторону (Si переходит только в сталь):



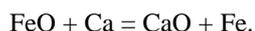
*Реакция 8* (имеет низкую скорость протекания):



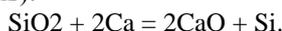
*Реакция 9* - только в прямую сторону (Mn переходит только в сталь):



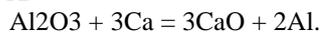
Реакция 10



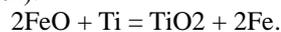
Реакция 11 - только в прямую сторону (Si переходит только в сталь):



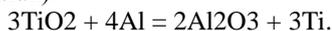
Реакция 12



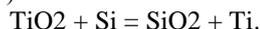
Реакция 13 - только в прямую сторону (TiO<sub>2</sub> не восстанавливается):



Реакция 14 - только в обратную сторону (Ti переходит только в шлак):



Реакция 15 - только в обратную сторону (Ti переходит только в шлак):



Для каждой реакции задается ряд параметров, которые определяют ее равновесие (логарифм константы равновесия –  $\log(K)$ ), тепловой эффект –  $\Delta H$  (kcal/mol), энергия Гиббса –  $\Delta G$  (kcal/mol) и др. Зависимости констант, необходимых для расчета, от температуры определялись в программе моделирования химических реакций - HSC Chemistry 5.11. На рис. 1 показаны примеры зависимостей трех указанных параметров для реакции  $\text{FeO} + \text{Mn} = \text{Fe} + \text{MnO}$ , а в таблице 1 представлены результаты их упрощенной аппроксимации для всех рассматриваемых реакций.

Одним из основных параметров, определяющих скорость протекания реакции, является ее равновесие, определяемое для реакции  $mX_1 + nX_2 = aX_3 + bX_4$  по формуле:

$$K_E = \frac{[X_3]^a [X_4]^b}{[X_1]^m [X_2]^n}. \quad (1)$$

В модели упрощенно приняли, что равновесие по (1) определяется концентрациями веществ, а не их активностями. В действительности на равновесие реакций влияет значительное количество факторов, учесть многие из которых затруднительно. Поэтому использовали (1) совместно с дополнительным смещением равновесий реакций, которое использовалось при настройке комплексной модели. В таблице 1 приведены подобранные смещения равновесий  $\Delta \log(K)$ .

Полученные продукты реакции далее вновь распределяются по элементарным объемам. При этом используется следующий алгоритм. Все оксиды поступают в шлак. А вещества распределяются пропорционально отношению исходного их содержания в элементарном объеме к общей массе в рассматриваемых соприкасающихся объемах слоя шлака и стали.

Переходы серы между металлом и шлаком рассчитываются индивидуально. Известно, что переход серы в шлак можно охарактеризовать двумя параметрами: коэффициент распределения серы и сульфидная емкость шлака.

Коэффициент распределения серы показывает, к какому соотношению содержаний серы в шлаке и стали в настоящий момент стремится система. Сульфидная емкость показывает, сколько серы по массе может сейчас содержаться в шлаке.

В модели скорость перехода серы в шлак определяется тем, насколько текущая сульфидная емкость больше текущего содержания серы в шлаке, а также тем, на сколько текущее отношение содержания серы в шлаке к содержанию ее в металле меньше теоретического для текущих параметров шлака. На коэффициент распределения серы влияет оптическая основность шлака, его температура и другие факторы. Расчет коэффициентов производится в соответствии с методикой в работе [2] Дюдкина Д.А.

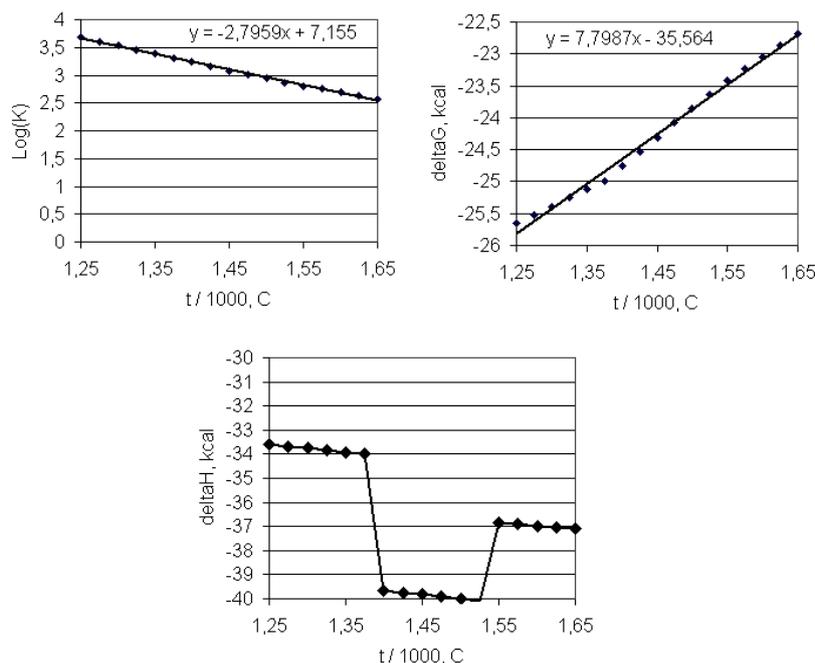


Рис. 1. Зависимости логарифма константы равновесия –  $\log(K)$ , теплового эффекта –  $\Delta H$ , энергии Гиббса для реакции  $\text{FeO} + \text{Mn} = \text{Fe} + \text{MnO}$  от температуры

Параметры аппроксимации зависимостей от нормированной температуры  $t_H = t / 1000$  (°C) для диапазона температур 1250÷1650 °C:  $\text{Log}(K) = a_1 t_H + a_0$ ;  $\Delta H = b_3 t_H^3 + b_2 t_H^2 + b_1 t_H + b_0$ ;  $\Delta G = c_2 t_H^2 + c_1 t_H + c_0$

Log(K)		deltaH (kcal/mol)				deltaG (kcal/mol)			Δ
a <sub>1</sub>	a <sub>0</sub>	b <sub>3</sub>	b <sub>2</sub>	b <sub>1</sub>	b <sub>0</sub>	c <sub>2</sub>	c <sub>1</sub>	c <sub>0</sub>	Log(K)
-2,7959	7,155	300,95	-1196,5	1552	-690,82	0	7,7987	-35,564	-1,5
-7,6586	20,238	1757,1	-7330,7	10070	-4651,2	21,161	-42,859	-54,137	1
-3,4836	4,3157	1506,4	-5991	7790,9	-3344,5	14,769	-11,998	-7,8372	-1
8,92	-21,889	301,28	-1198,2	1556,9	-537,51	0	-29,043	112,1	-7,91
-16,71	44,527	903,41	-3591,7	4666,7	-2197,1	0	38,484	-214,63	0
-6,4086	17,145	301,36	-1198	1555,5	-742,65	0	14,417	-82,372	2
-10,454	28,343	-3464	14807	-20873	9558,3	0	21,447	-134,33	12,5
2,0666	-5,9271	-1155,2	4938	-6966,2	3269,8	0	-2,9115	27,184	-1,5
-8,3265	23,062	0,7293	-2,9756	11,843	-125,15	0	15,091	-107,94	1,5
-7,0436	19,271	301,42	-1198,1	1555,3	-750,75	0	-13,885	-91,062	0
-6,427	18,303	-1154,3	4934,8	-6959,7	3150	0	9,2622	-83,813	0
-4,4125	13,281	0,7595	-2,2466	-1,491	-54,883	0	3,1705	-58,556	0
-7,8591	21,435	602,15	-2396,3	3116	-1423,2	0	15,823	-101,56	0
-9,8538	24,752	0,6192	4,5131	-12,956	-125,27	0	29,497	-124,59	0
0,1985	-1,195	1154,8	-4933,9	6953,1	-3227,7	0	2,6836	3,2466	0

Для выполнения массообмена между металлом и шлаком перебираются элементарные объемы на границе шлака и металла и для каждого выполняется перенос массы. Переход соединений в шлак не по реакции, а вследствие их более низкой плотности зависит от скорости перехода.

В модели принято, что скорость перехода зависит не от длительности плавки, а от концентрации соединения в стали, скорости движения расплава, вязкости шлака. Чем ниже концентрация соединения в стали, тем медленнее остаток переходит в шлак. По литературным данным за 5÷10 мин продувки содержание неметаллических включений уменьшается в два раза. То есть, можно говорить об относительном коэффициенте – во сколько раз снизится содержание включения. Под это и подстраивалась модель.

Элементы в отличие от соединений передаются постепенно однонаправлено из шлака в сталь (кроме серы, азота и водорода, которые считаются индивидуально) со скоростью, пропорциональной их содержанию в шлаке. В отличие от всплывающих соединений, на этот процесс в модели не влияет вязкость шлака и скорость перемешивания.

В модели поглощение азота реализовано в соответствии с документацией SIEMENS, в которой указано, что: “Азот: поступает, главным образом, из атмосферного воздуха. Он поглощается сталью в том случае, если происходит его диссоциация в дуге. Именно поэтому дуги всегда должны быть погружены в шлак, что обеспечивается технологией процесса в печи-ковше фирмы SIEMENS VAI.”. Модель настроена под условия, в которых, при проведении типового процесса, содержание азота должно равняться ~0,0023-0,0027 при условии того, что слой шлака по приходу ковша ~150мм, а начальное содержание N=0,0015.

Для приближенной оценки раскислительной способности элементов-раскислителей допустили образование чистого оксида, что позволяет записать кон-

станту равновесия реакции раскисления  $mE + nO = E_m O_n$  в виде:

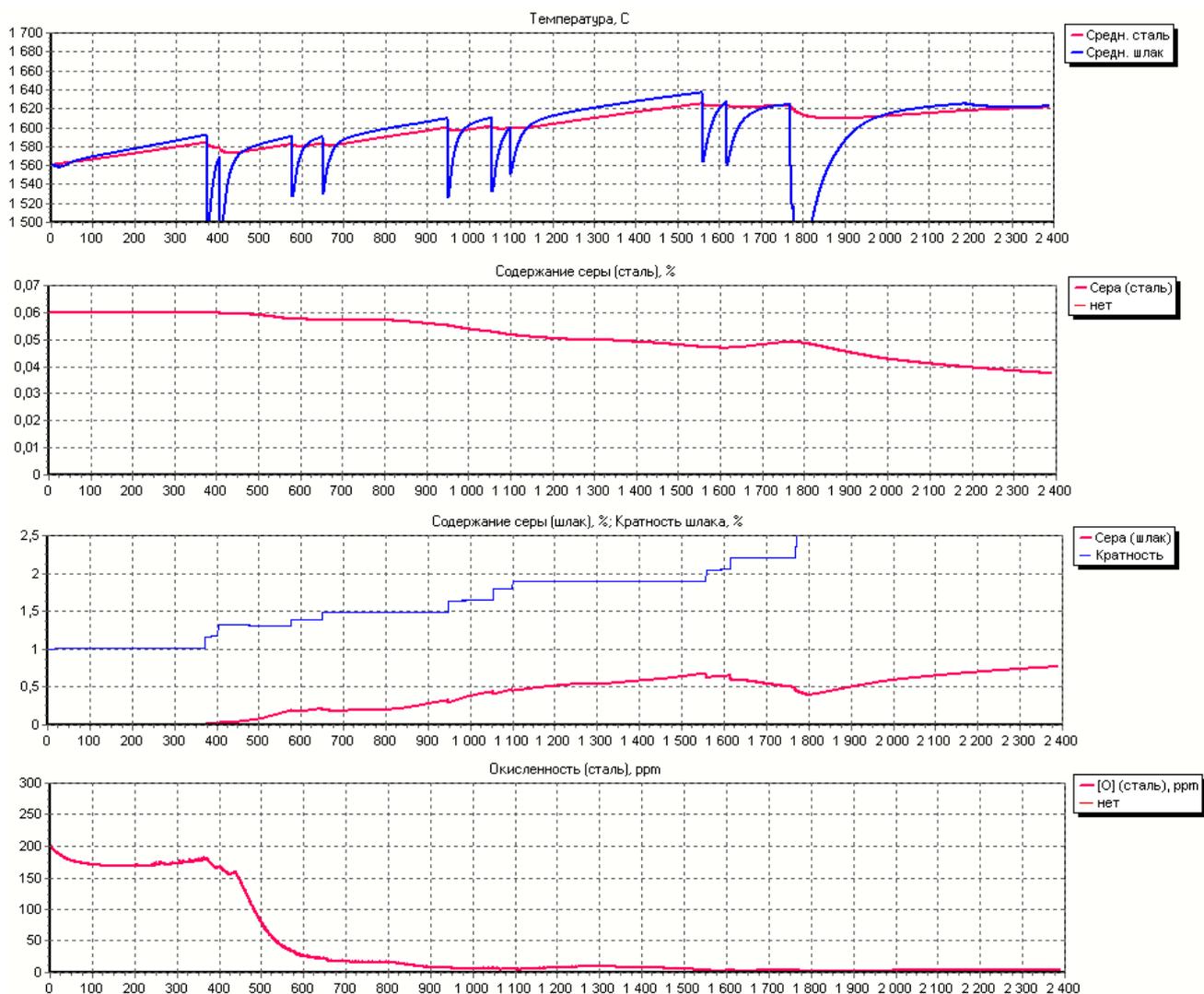
$$K_E = \frac{1}{[O]^n [E]^m}$$

Для каждого возможного раскислителя рассчитывается константа равновесия  $K_E$ , зависящая от температуры по данным, представленным в работах Бигеева В.А. [20]. Например, для алюминия:

$$\lg(K_E) = \left( \frac{-21630}{T} \right) + 6,87.$$

Расчет раскисления в объеме стали ведется для каждого элементарного объема (объем стали разбит на порядка 10 тыс. элементарных объемов). Каждый объем имеет свою температуру и химический состав. Рассчитывается равновесное содержание кислорода, исходя из текущего содержания каждого элемента раскислителя. Если текущее содержание больше равновесного, то выполняется реакция раскисления, в которой принимает участие только часть общего доступного количества элемента – раскислителя. Постепенно в процессе выполнения реакций система приходит к равновесию, при котором текущее содержание кислорода при текущем содержании элемента-раскислителя равно равновесному.

На рис. 2 пример результатов комплексного моделирования процесса в агрегате печь-ковш. На графиках показано изменение отдельных параметров процесса во времени. Резкие снижения средней по объему температуры шлака связаны с подачей материалов, что сопровождается ростом кратности шлака. На первом этапе десульфурация не получает развития и начинается фактически протекать после раскисления стали. Интенсификация десульфурации на заключительном этапе процесса связана с интенсификацией перемешивания и дальнейшим ростом кратности шлака при CaO>58%.



**Рис. 2.** Пример результатов комплексного моделирования процесса в агрегате печь-ковш. На графиках показано изменение отдельных параметров процесса во времени

Разработанная модель химических процессов может использоваться при решении различных задач управления [4-8].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Сафонов, В.М. Особенности нагрева стали в дуговой сталеплавильной печи и агрегате ковш-печь / В.М.Сафонов, А.Н.Смирнов // *Сталь*. - №6. - 2008. - С. 37-40.
2. Дюдкин, Д.А. Производство стали на агрегате ковш-печь / Д.А.Дюдкин, С.Ю.Бать, С.Е.Гринберг, С.Н.Маринцев // Под науч. ред. докт. техн. наук, проф. Дюдкина Д.А. - Донецк: ООО «Юго-Восток, Лтд», 2003. - 300 с.
3. Григорян, В.А. Физико-химические расчеты электросталеупла-вильных процессов: Учеб. пособие для вузов / В.А.Григорян, А.Я.Стомахин, А.Г.Пономаренко и др. // - М.: Металлургия, 1989. - 288 с.
4. Рябчиков, М.Ю. Выбор режимов работы агрегата ковш-печь с использованием обобщенных оценок качества и затрат на процесс [Текст]/ М.Ю.Рябчиков, Б.Н.Парсункин, Е.С.Рябчикова // *Черные металлы*. 2014. № 12 (996). С. 28-34.

5. Рябчикова, Е.С. Применение прогнозной модели для оптимизации управления энергетическим режимом ДСП [Текст] / Е.С. Рябчикова, М.Ю. Рябчиков, Б.Н.Парсункин // *Автоматизированные технологии и производства*. 2012. -№ 4. -С. 179-189.

6. Рябчиков, М.Ю. Оптимизация управления электрическими режимами работы дуговых сталеплавильных печей переменного тока с использованием прогнозирующей системы [Текст]/ М.Ю.Рябчиков, Б.Н. Парсункин, Е.С. Рябчикова // *Автоматизация в промышленности*. 2014. -№11. -С. 52 - 56.

7. Ишметьев, Е.Н. Оптимизация энергетического режима работы электродуговой печи / Е.Н. Ишметьев, С.М.Андреев, Б.Н. Парсункин, З.Г.Салихов, М.В.Усачев, М.Ю.Рябчиков // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. 2007. -№ 5. -С. 23-27.

8. Рябчикова, Е.С. Реализация модели электрического контура трехфазной цепи ДСП в программной среде VisSim / Е.С. Рябчикова, М.Ю.Рябчиков // *Электротехнические системы и комплексы*. 2012. -№ 20. - С. 327-331.

## ВИБРОДЕТЕКТИРОВАНИЕ ШЛАКА ПРИ СЛИВЕ СТАЛИ ИЗ СТАЛЬКОВША В ПРОМЕЖУТОЧНЫЙ КОВШ

М.В. Семенов<sup>1</sup>, С.С. Красильников<sup>2</sup>, Д.В. Швидченко<sup>3</sup>, Р.С. Пишнограев<sup>4</sup>  
<sup>1,2,3,4</sup> ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»,  
г.Магнитогорск, Россия.

## VIBRATORY DETECTION OF SLAG DURING REFLUXING STEEL FROM LADLE TO TUNDISH

M.V. Semenov<sup>1</sup>, S.S. Krasilnikov<sup>2</sup>, D.V. Shvidchenko<sup>3</sup>, R.S. Pishnograev<sup>4</sup>  
<sup>1,2,3,4</sup> Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

<sup>1</sup>mike\_sem@mail.ru

**Аннотация.** В данной статье рассматривается возможность применения для определения наличия шлака в струе металла при сливе из стальной ковша в промежуточный ковш методов вибродиагностики. Приведены результаты опытных измерений, проведенных на МНЛЗ №6 в ККЦ ОАО «ММК».

**Ключевые слова:** вибродетектирование; шлак; разливка металла; диагностика.

**Abstract.** In this article are consider a possibility to use the methods of vibratory diagnostics for detection a slag in metal stream during refluxing steel from ladle to tundish. Given the results of experimental metering, that was made on CCM №6 in Magnitogorsk Iron and Steel Works.

**Keywords:** vibratory detection; slag; metal casting; diagnostics.

### Актуальность работы

Для обеспечения свойств металла, удовлетворяющих современным требованиям, необходимо получать высокую чистоту металла по окисдным неметаллическим включениям, что, в свою очередь, достигается применением глубокого раскисления металла и удержанием необходимого уровня окисленности металла на всех последующих этапах передела и разливки. Однако существует так называемое вторичное (повторное) окисление металла, что может приводить к появлению брака [1].

Одной из причин возникновения вторичного окисления является взаимодействие расплавленного металла с окисленным печным шлаком, и одним из способов предотвращения этого взаимодействия является отсечка шлака, в том числе и при сливе металла из стальной ковша в промежуточный ковш [2].

### Обоснование выбора способа детектирования

Для предотвращения попадания шлака при сливе металла из стальной ковша в промежуточный ковш требуется своевременное детектирование шлака в струе металла. При сливе стали из стальной ковша в промковш жидкий металл протекает через шибер стальной ковша, сталевыпускной коллектор и входное отверстие погружного стакана, что приводит к изменению характера истечения металла

с ламинарного на турбулентное. Турбулентное истечение жидкого металла приводит к появлению вибрации корпуса погружного стакана и промежуточного ковша [3].

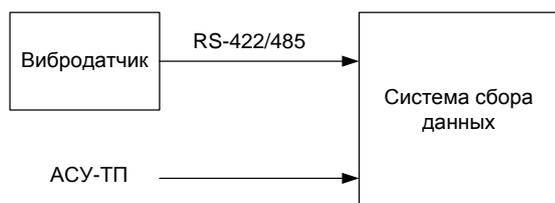
Плотность расплавленного металла составляет в среднем 6,9 т/м.куб, а плотность расплавленного шлака в среднем 2,5т/м.куб [1]. Можно предположить, что уровни вибраций при сливе чистого металла и в случае, когда происходит «подтягивание» шлака, будут различны. Основываясь на данном предположении, измерение вибраций, возникающих при сливе металла из стальной ковша в промковш, может указать на наличие шлака в струе металла и позволит своевременно отсечь его.

### Формирование структурной схемы системы вибродетектирования

Указанные предпосылки позволяют использовать при построении системы детектирования шлака при сливе стали из стальной ковша в промежуточный ковш первичные преобразователи виброускорения измеряющие вибрации в трех ортогональных плоскостях [4].

В результате анализа конструктивных особенностей МНЛЗ, в качестве датчика первичной информации выбран вибродатчик на основе трехосного акселерометра с интерфейсом выхода RS-422/485. Система сбора данных реализована на IBMPC-совместимом компьютере. Структурная схема системы представлена на рис. 1.

Структурная схема системы вибродетектирования шлака при сливе металла из стальной ковша в промковш выглядит следующим образом.



**Рис. 1. Структурная схема системы детектирования шлака при сливе стали из стальной ковша в промежуточный ковш**

Применение интерфейса RS-422/485 для обмена информацией между датчиком и системой сбора данных позволяет увеличить надежность системы, за счет сокращения входящего в ее состав оборудования, повысить помехоустойчивость передаваемой информации.

Также для проведения анализа полученных значений вибрации будут необходимы такие данные, как масса металла в стальной ковше, положение шибера затвора и состояние ключа на закрытие шибера.

## Выбор вибродатчика

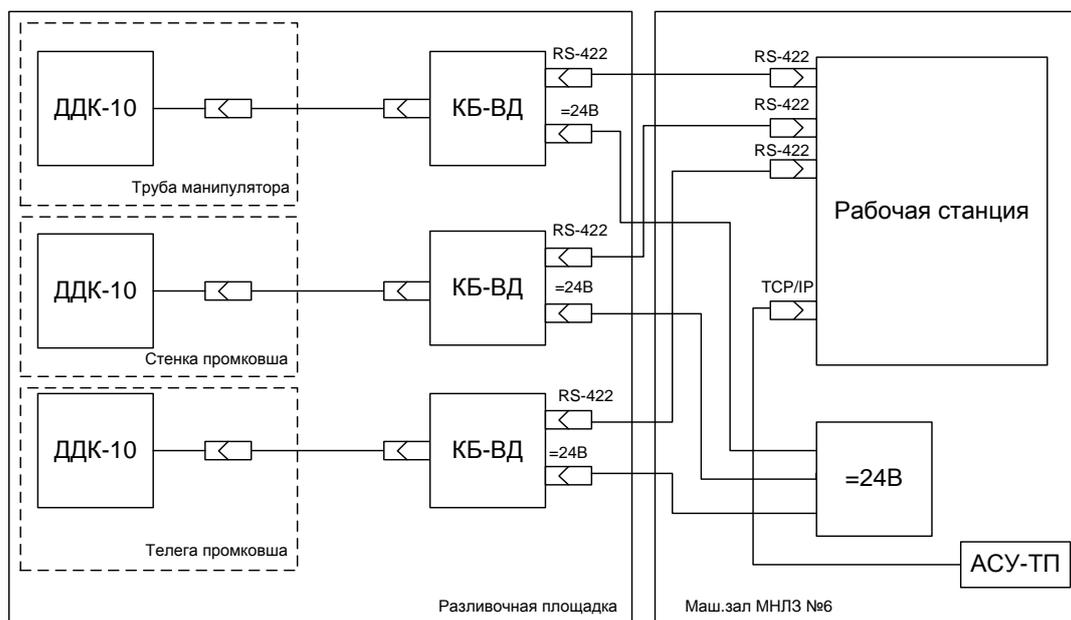
В настоящее время на российском рынке представлены несколько вибродатчиков с цифровым выходом. Для сравнения возьмем такие вибродатчики как: ДДК-10, производства «Техноап», ПИВ, производства «Геолинк», БА-24, производства «Темп-Авиа», и АР-35D, производства «ГлобалТест». В таблице 1 приведены основные характеристики предложенных вибродатчиков.

## Разработка структурной схемы системы вибродетектирования

Для наиболее четкого определения границ перехода металл/шлак при сливе стали из стальной ковша в промковш, необходимо выяснить, на каких конструктивных элементах МНЛЗ этот переход выражен наиболее четко. Предположительно, вибрации, вызванные процессами, происходящими в потоке при сливе из стальной ковша, наибольшее значение будут иметь на таких элементах как: шибера затвора, погружной стакан, труба манипулятора, стенка промежуточного ковша, телега промежуточного ковша. Так как

**Табл. 1. Основные характеристики вибродатчиков с цифровым выходом**

	ДДК-10	ПИВ	БА-24	АР-35D
Количество осей	3	3	3	1
Предел измерения, g	±5	±2..±30	±2 .. ±32	±20
Чувствительность, mg	1	н/д	1	50
Погрешность измерения, %	0,5	0,5	0,1	2
Частота измерения, кГц	1	2	0,1	0,1
Напряжение питания, В	24	10..30	15	5..12
Потребляемый ток, mA	20	30	н/д	20
Интерфейс	RS-422	RS-485	RS-232	RS-485
Скорость передачи данных, бит/сек	500000	9600	115200	19200
Класс защиты	IP67	IP67	н/д	н/д



**Рис. 2. Структурная схема системы вибродетектирования шлака**

технически сложно произвести измерения на погружном стакане и шибере стальной ковша, то было решено провести измерения на трубе манипулятора, на стенке промковша и на телеге промковша.

Структурная схема системы вибродетектирования шлака представлена на рис. 2.

### Предварительные результаты измерений

Для установки датчиков ДДК-10 в ранее определенные места были изготовлены крепления: в виде хомутов для установки датчика на трубу манипулятора, приварена переходная пластина на телеге промковша и магнитное крепление на стенку промежуточного ковша. Измерения производились на МНЛЗ №6 в кислородно-конвертерном цехе.

Для оценки и анализа измерений из АСУ-ТП МНЛЗ №6 приходили данные о весе металла в стальковше, команда на изменение положения шибера стальной ковша, команда на закрытие шибера стальной ковша.

Три датчика были установлены и опрашивались одновременно для выявления оптимального места установки.

В ходе проведения измерений были получены следующие данные

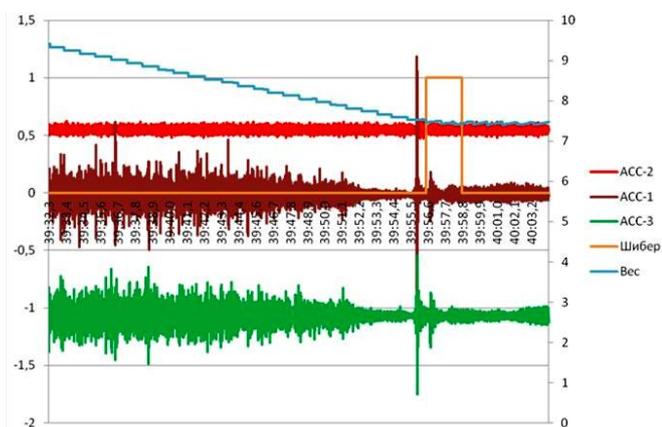


Рис. 3. Графики измерения уровня вибрации в местах установки датчиков и данные с АСУ-ТП

Из приведенных на рис. 3 графиков видно, что измеренные значения вибрации на трубе манипулятора (ACC-1) и на стенке промежуточного ковша (ACC-3) за 5 секунд до закрытия шибера стальной ковша оператором начинают снижаться, в то время как значения вибрации на телеге промежуточного ковша (ACC-2) остаются неизменными.

Так как измерения уровня вибрации производились с помощью трехосного датчика ДДК-10, это позволило зафиксировать значения вибрации в трех ортогональных плоскостях. На рис. 4 приведены графики изменения уровня вибрации на трубе манипулятора с трех акселерометров.

### Выводы

Исходя из полученных результатов измерений и сопоставив сигналы с АСУ-ТП о весе металла в стальковше и команды на закрытие шибера от оператора, мы можем сделать вывод, что использование метода вибро-

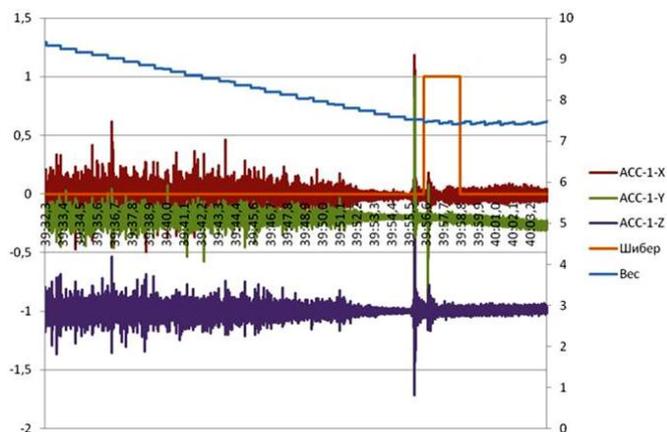


Рис. 4. Графики изменения уровня вибрации на трубе манипулятора в трех осях измерения

детектирования шлака при сливе металла из стальной ковша в промковш возможно. Снижение уровня вибрации наблюдается на графике за 5 секунд до закрытия шибера стальной ковша.

На основе данных, полученных во время измерений, можно сделать вывод, что зависимость уровня вибрации на трубе манипулятора и на стенке промежуточного ковша при попадании шлака в струю металла имеет схожий характер. Однако установка датчика на трубу манипулятора является предпочтительней с точки зрения удобства монтажа, прокладки кабеля и обслуживания датчика. Установка датчика на телегу промежуточного ковша позволит выяснить «фоновый» уровень вибрации конструкций МНЛЗ, который может быть использован для сравнения с показаниями датчика, установленного на трубу манипулятора.

Так как измеренные значения вибрации на трубе манипулятора во всех трех плоскостях имеют схожий характер, оценку наличия шлака в струе металла можно производить по любой из осей вибродатчика, но для увеличения достоверности отсечки шлака целесообразно вести оценку всех акселерометров.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Поволоцкий Д.Я., Рощин В.Е., Рысс М.А. и др. Электрометаллургия стали и ферросплавов. - М.: Metallurgy, 1974.- 551с.
2. Metallurgy. Цветная и черная металлургия на emchezgia.ru [Электронный ресурс]/Предотвращение вторичного окисления металла. – Электрон.дан. – Режим доступа: [http://emchezgia.ru/vakuumnaya/13\\_predotvrashchenie\\_okisleniya\\_metalla.php](http://emchezgia.ru/vakuumnaya/13_predotvrashchenie_okisleniya_metalla.php), свободный. – Загл. с экрана.
3. Ширман А.Р., Соловьев А.Б. Практическая вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования.-М., 1996.-276с.
4. Вибродиагностика для начинающих и специалистов [Электронный ресурс]/ Основы измерения вибрации. – Электрон.дан. – Режим доступа: [http://www.vibration.ru/osn\\_vibracii.shtml](http://www.vibration.ru/osn_vibracii.shtml), свободный. – Загл. с экрана.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕГРЕССИИ КОЭФФИЦИЕНТА УПЛОТНЕНИЯ ТВЕРДЫХ БЫТОВЫХ ОТХОДОВ ОТ ВЫСОТЫ ПОЛИГОНА НА ОСНОВЕ КОМПЬЮТЕРНОЙ ПРОГРАММЫ "REGANALIZ"

**О.В. Березюк**

Винницкий национальный технический университет, г. Винница, Украина

## DETERMINATION REGRESSION OF COMPRESSION COEFFICIENT OF HARD DOMESTIC WASTES FROM THE GROUND HEIGHT ON THE BASIS OF THE COMPUTER PROGRAM "REGANALIZ"

**O.V. Berezjuk**

Vinnitsa National Technical University, Vinnitsa, Ukraine

berezjukoleg@yandex.ru

**Аннотация.** Разработана и зарегистрирована компьютерная программа "RegAnaliz" для регрессионного анализа парных зависимостей. Получена необходимая при разработке стратегии, комплекса машин и оборудования для обращения с твердыми бытовыми отходами регрессионная зависимость коэффициента уплотнения твердых бытовых отходов от высоты полигона.

**Ключевые слова:** твердые бытовые отходы, коэффициент уплотнения, полигон, регрессионная зависимость, регрессионный анализ.

**Abstract.** It develops and registered the computer program of "RegAnaliz" for the regressive analysis of dual dependence's. Necessary gets in case of strategy development, complex of machines and equipment for the appeal with the hard domestic wastes regressive dependence of compression coefficient of hard domestic wastes on the ground height.

**Keywords:** hard domestic wastes, compression coefficient, ground, regressive dependence, regressive analysis.

### Вступление

Годовой объем твердых бытовых отходов (ТБО), образующихся в населенных пунктах Украины составляет, более 46 млн. м<sup>3</sup> [1], основная часть которых захоронивается на 4530 полигонах и свалках площадью почти 7,7 тыс. гектаров и лишь частично перерабатываются или утилизируются на мусоросжигательных заводах. Только в течении 1999-2007 гг. общая площадь полигонов и свалок в Украине увеличилась в 2,5 раза. Также больше чем в 2,5 раза возросла площадь перегруженных, а также полигонов и свалок, не отвечающих нормам экологической безопасности. Поэтому для уменьшения темпов роста площадей полигонов периодически выполняется технологическая операция уплотнения ТБО. Чем более высокий коэффициент уплотнения ТБО, тем эффективнее используется площадь полигона. Постановление Кабмина Украины № 265 [2] заложило основу для разработки Национальной стратегии обращения с ТБО в Украине. В отличие от высокоразвитых стран, где широко распространены современные технологии утилизации и переработки ТБО, в Украине 96,5% отходов захорониваются на полигонах и свалках, и, учитывая теперешнее состояние украинской экономики, в краткосрочной перспективе кардинальное изменение этого положения выглядит маловероятным. Поэтому рациональная организация таких полигонов ТБО, обеспечивающих защиту атмосферного воздуха и водных объектов от загрязнения, вместо перегруженных полигонов и свалок, не отвечающих нормам экологической

экологической безопасности, параллельно с постепенным внедрением прогрессивных методов обращения с отходами не будет терять актуальность, на наш взгляд, еще определенное время. Поэтому определение регрессионной зависимости коэффициента уплотнения твердых бытовых отходов от высоты полигона с целью разработки стратегии, комплекса машин и оборудования для обращения с ТБО, является актуальной научно-технической задачей.

В работе [4] приведена табличная зависимость коэффициента уплотнения ТБО от высоты полигона. Автор [3] приводит данные относительно необходимой площади участка полигона ТБО и хозяйственной зоны в зависимости от высоты полигона и численности обслуживаемых жителей. В работе [5] приведена формула для определения потребности в бульдозерах для выполнения технологических операций уплотнения ТБО на карте полигона. Однако конкретных математических зависимостей коэффициента уплотнения ТБО от высоты полигона, в результате анализа известных публикаций, нами не выявлено.

Целью исследования является определение регрессионной зависимости коэффициента уплотнения твердых бытовых отходов от высоты полигона для разработки стратегии, комплекса машин и оборудования для обращения с ТБО.

### Основная часть

В табл. 1 показанная зависимость коэффициента уплотнения ТБО от высоты полигона. На основе данных табл. 1 планировалось получить парную регрессионную

Табл. 1. Зависимость коэффициента уплотнения ТБО от высоты полигона [3]

Полная проектная высота полигона h, м	до 10	от 11 до 20	от 21 до 50	от 51 и больше
Коэффициент уплотнения ТБО, $k_v$	3	3,7	4	4,5

зависимость коэффициента уплотнения ТБО от высоты полигона.

Регрессия проводилась на основе линеаризующих преобразований, позволяющих свести нелинейную зависимость к линейной. Определение коэффициентов уравнений регрессии осуществлялась методом наименьших квадратов посредством разработанной компьютерной программы "RegAnaliz", защищенной свидетельством о регистрации авторского права на произведение [6]. Вид диалогового окна программы приведен на рис. 1.

Программа "RegAnaliz" позволяет проводить регрессионный анализ результатов однофакторных экспериментов и других парных зависимостей с выбором лучшего вида функции из 16 наиболее распространенных вариантов за критерием максимального коэффициента корреляции с сохранением результатов в формате MS Excel (рис. 2) и Bitmap.

Результаты регрессионного анализа приведены в табл. 2, где серым цветом обозначена ячейка с максимальным значением коэффициента корреляции R.

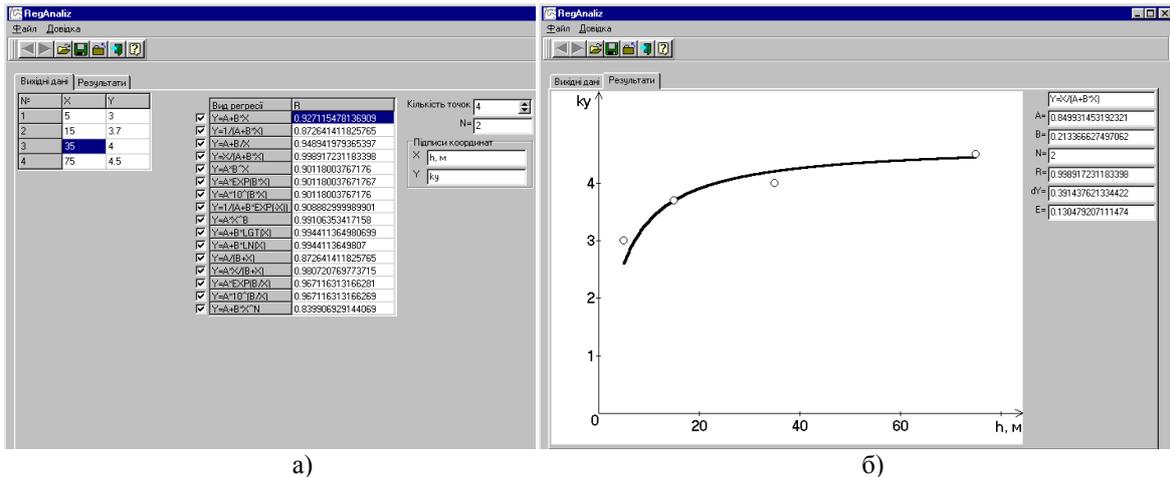


Рис. 1. Общий вид диалогового окна программы "RegAnaliz": а) исходные данные; б) результаты

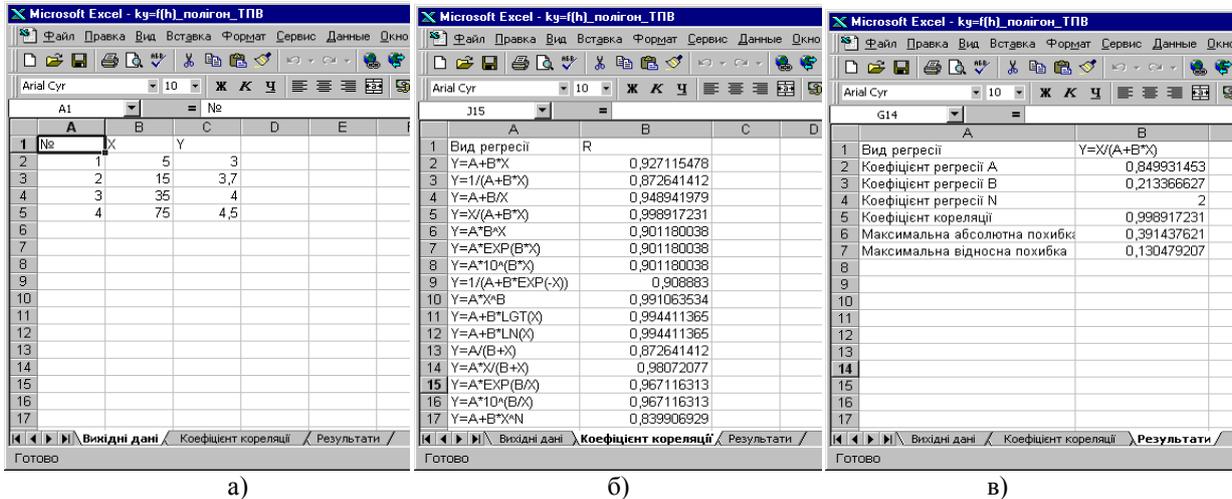


Рис. 2. Сохранение результатов работы программы "RegAnaliz" в книге MS Excel: а) исходные данные; б) коэффициенты корреляции; в) результаты

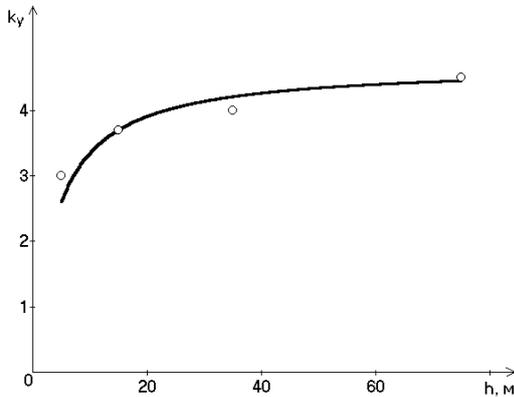
Табл. 2. Результаты регрессионного анализа

№	Вид регрессии	Коэффициент корреляции R	№	Вид регрессии	Коэффициент корреляции R
1	$y = a + bx$	0,92712	9	$y = ax^b$	0,99106
2	$y = 1 / (a + bx)$	0,87264	10	$y = a + b \cdot \lg x$	0,99441
3	$y = a + b / x$	0,94894	11	$y = a + b \cdot \ln x$	0,99441
4	$y = x / (a + bx)$	0,99892	12	$y = a / (b + x)$	0,87264
5	$y = ab^x$	0,90118	13	$y = ax / (b + x)$	0,98072
6	$y = ae^{bx}$	0,90118	14	$y = ae^{b/x}$	0,96712
7	$y = a \cdot 10^{bx}$	0,90118	15	$y = a \cdot 10^{b/x}$	0,96712
8	$y = 1 / (a + be^{-x})$	0,90888	16	$y = a + bx^n$	0,83991

Итак, согласно результатам регрессионного анализа на основе данных табл. 1, в качестве наиболее адекватной окончательно принята такая регрессионная зависимость:

$$k_y = \frac{h}{0,85 + 0,2134h} \quad (1)$$

На рис. 3 показано фактическая и теоретическая графическая зависимость коэффициента уплотнения ТБО от высоты полигона.



**Рис. 3. Зависимость коэффициента уплотнения твердых бытовых отходов  $k_y$  от высоты полигона  $h$ : фактическая  $\circ$ , теоретическая —**

Сравнение фактических и теоретических данных показало, что теоретический коэффициент уплотнения ТБО, рассчитанный посредством регрессии (1), несущественно отличается от фактических данных, что подтверждает определенную ранее высокую точность полученной зависимости.

Как видно из рис. 3, при увеличении высоты полигона коэффициент уплотнения ТБО возрастает по гиперболической зависимости.

1. Разработана и зарегистрирована компьютерная программа "RegAnaliz", позволяющая проводить регрессионный анализ результатов однофакторных экспериментов и других парных зависимостей с выбором лучшего вида функции из 16 наиболее распространенных вариантов за критерием максимального коэффициента корреляции с сохранением результатов в формате MS Excel и Bitmap.

2. Определена регрессионная зависимость коэффициента уплотнения твердых бытовых отходов от высоты полигона, которая может быть использована во время разработки стратегии, комплекса машин и оборудования для обращения с ТБО.

3. Установлено, что при увеличении высоты полигона коэффициент уплотнения твердых бытовых отходов возрастает по гиперболической зависимости.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Портал України з поводження з твердими побутовими відходами [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://www.ukrwaste.com.ua>.

2. Постанова Кабінету Міністрів України від 4 березня 2004 року № 265 "Про затвердження Програми поводження з твердими побутовими відходами" [Електронний ресурс] / Кабінет Міністрів України : <http://zakon1.rada.gov.ua/laws/show/265-2004-%D0%BF>.

3. Новосёлов, А. С. Управление отходами [Текст] / А. С. Новосёлов. – Вологда : ВоГТУ, 2013. – 48 с. – Библиогр.: с. 43.

4. Карлова, О. А. Технології виробництва в міському господарстві: Навч. Посібник [Текст] / О. А. Карлова. – Харків: ХНАМГ, 2005. – 156 с.

5. Полігони твердих побутових відходів. Основи проектування : ДБН В.2.4-2-2005. – [Чинний від 2006–01–01]. – К. : Держбуд України, Мінприроди України, 2005. – 35 с. – (Національні стандарти України).

6. Березюк, О. В. Комп'ютерна програма "Регресійний аналіз" ("RegAnaliz") / О. В. Березюк // Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 49486. – К. : Державна служба інтелектуальної власності України. – Дата реєстрації : 03.06.2013.

## ПОВЫШЕНИЕ СРОКА СЛУЖБЫ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПОДЪЕМА ТЕЛЕЖКИПРОМКОВША НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ ВОЗДЕЙСТВУЮЩИХ ФАКТОРОВ

Е.Н. Марченко<sup>1</sup>, Е.А. Завьялов<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»,  
г.Магнитогорск, Россия.

## INCREASE OF SERVICE LIFE OF ELECTRIC MOTORS OF LIFTING OF THE CART OF THE INTERMEDIATE LADLE ON THE BASIS OF THE COMPLEX ESTIMATION OF INFLUENCING FACTORS

E.N. Marchenko<sup>1</sup>, E.A. Zavyalov<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

<sup>1</sup>Evgen241180@mail.ru

**Аннотация.** В статье рассмотрены проблемы эксплуатации асинхронных электродвигателей агрегата подъема промежуточного ковша машины непрерывного литья заготовок кислородно-конвертерного цеха Магнитогорского металлургического комбината. Проанализированы комплексные факторы, воздействующие на двигатели механизма. Представлена система мониторинга, контроля и поддержания обмоток электродвигателя в рабочем состоянии.

**Ключевые слова:** металлургия, электродвигатель, промежуточный ковш, машина непрерывного литья заготовок, электроосмос, изоляция обмотки электродвигателя.

**Abstract.** This article describes the problems of operation of induction motors lifting unit tundish of continuous casting machine oxygen-converter shop of the Magnitogorsk Metallurgical Combine. Analyzed the complex factors influencing the mechanism engines. Introduced a system of monitoring, control and maintenance of the motor windings in working condition. On the basis of information received from the monitoring system is made activate the device for drying the motor insulation.

**Keywords:** metallurgy, electric motor, tundish, continuous casting machine, electro, motor winding insulation.

### Актуальность работы

В настоящий момент для управления системой подъема телеги промежуточного ковша (ТПК) используются двигатели типа 4МТКН 225-6 55кВт, 930 об/мин. Электродвигатели работают в критических условиях, а именно: высокая температура, близость жидкого металла, сильная запыленность, повышенная влажность. Данные факторы оказывают отрицательное воздействие на надежность технологического процесса. В случае отказа механизма подъема ТПК возникает аварийная ситуация, приводящая к незапланированной остановке машины непрерывного литья заготовок, что способствует увеличению брака литого слитка и требует внеплановой замены промежуточного ковша.

### Основные проблемы и решения

Во время эксплуатации механизма подъема ТПК приводной электродвигатель подвергается различным неблагоприятным воздействиям, под влиянием которых происходит быстрое старение изоляции статорной обмотки, т.е. необратимое ухудшение её свойств. Характерным явлением для изоляции статорной обмотки электродвигателя является образование местных дефектов - трещин, т.е. существенное ухудшение ее электрических свойств на отдельных небольших участках.

Воздействия, вызывающие повреждения изоляционных материалов, подразделяются на следующие группы: электрические, тепловые, механические и воздействия окружающей среды. Во время работы электродвигателя его изоляция испытывает эти воздействия одновременно, при этом возможно их взаимодействие, т.е. одновременно приложенные воздействия могут вызывать старение изоляции с иной скоростью, нежели приложенные поочередно [1].

Основными факторами воздействия окружающей среды на изоляцию электрических машин являются: действие окружающего изоляцию газа (например, воздуха); действие влаги, содержащейся в воздухе, газе или попадающей на изоляцию в виде жидкости.

При наличии дефектов изоляции обмотки электродвигателя, увлажнение может существенно сказаться на пробивном напряжении изоляции. Такими дефектами могут быть трещины, образовавшиеся при электромеханическом воздействии (растяжении, сжатии, изгибе, смятии, кручении)[2].

В электродвигателях, установленных на механизме подъема ТПК, свободная влага отсутствует, так как нет непосредственного соприкосновения изоляции с водой. Связанная влага присутствует в гигроскопичных изоляционных материалах обмотки (влага макро- и микрокапилляров, влага в крупных порах и пустотах, влага смачивания).

Электродвигатели 4МТКН 225-6 не являются гер-

метичными, и влажный воздух из окружающей среды контактирует с изоляцией электродвигателя. При этом может происходить как увлажнение изоляции, так и ее осушение в зависимости от режима работы электродвигателя.

Изменение влагосодержания изоляции обмотки в процессе эксплуатации электродвигателя можно проследить по изменению сопротивления изоляции. Для изменения сопротивления изоляции в сторону повышения необходимо организовать сушку изоляции статорной обмотки электродвигателя механизма подъема ТПК[4]. Сушка может осуществляться с использованием следующих методов: конвекционного, токового, терморadiационного, индукционного, вакуумного, электроосмоса[1].

1. При конвекционном методе сушку обмоток статоров, роторов и якорей электрических машин производят в специальных печах при температуре 105 – 200 °С подогретым воздухом.

2. При токовом способе сушки через обмотку ротора, статора или якоря пропускается электрический ток, который служит причиной нагрева изделий. При этом к статору подводится трехфазный ток такого напряжения, чтобы в обмотке статора получить ток, равный (0,5 – 0,7) номинального тока. Большой ток недопустим, так как из-за отсутствия вентиляции может произойти перегрев обмотки.

3. Терморadiационный способ сушки заключается в нагреве изделий инфракрасными лучами. Генераторами лучей служат специальные электрические лампы, представляющие собой несколько видоизмененные обычные лампы накаливания, а также трубчатые электронагревательные элементы и специальные металлические панели, нагретые до температуры 300 – 450 °С, излучающие инфракрасные лучи. В первую очередь под воздействием инфракрасных лучей нагреваются металлические части, и за счет этого начинается интенсивное удаление влаги из пор обмотки.

4. При индукционном способе сушки для нагрева изделий используют явление магнитной индукции. Изделия помещают в специальный индуктор, питаемый токами высокой частоты или токами промышленной частоты.

5. Сушка по вакуумному методу (технология АВБ) заключается в вакуумировании обмоток статора в течение 20 – 40 с.

6. Сушка по методу электроосмоса состоит в приложении постоянного напряжения между проводниками обмоток и корпусом машины. Положительный полюс источника постоянного напряжения подключается к проводникам обмоток, а отрицательный - к корпусу, а последовательно с источником постоянного напряжения включают источник пульсирующего напряжения.

Анализ существующих методов увеличения срока службы изоляции обмоток асинхронного электродвигателя позволил предложить для использования в роли приоритетного способа извлечения влаги из обмоток электродвигателя - электроосмотический. Этот метод обладает рядом преимуществ, таких как:

1) возможность применения в действующей установке без демонтажа электрооборудования;

2) минимальное количество установленного дополнительного оборудования;

3) широкий выбор алгоритмов работы для совмещений рабочих режимов с технологическими паузами.

Проведены исследования способа реализации данного метода и алгоритмов работы устройства для действующего электрооборудования, а также смонтирована экспериментальная установка, состоящая из испытуемого асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором, генератора частоты, усилителя мощности, мегаомметра, осциллографа, преобразователя частоты и контроллера.

На основе экспериментальной установки разработана принципиальная схема электрооборудования для осмотической сушки изоляции обмоток электродвигателя с действующим электрооборудованием установки подъема ТПК.

Алгоритм переключения с «рабочего» режима на режим «включение устройства осмотической сушки изоляции обмоток» реализован на контроллере с выходными дискретными модулями. Информация о технологической паузе поступает от технологического контроллера верхнего уровня, информация о состоянии внешних параметров среды (температура, влажность) поступает с датчиков, установленных в непосредственной близости от приводного механизма установки подъема ТПК.

На основании комплексной оценки полученных данных о характере временных интервалов производственного процесса, электрических параметров состояния изоляции электродвигателя и внешних воздействующих факторов, происходит включение определенного режима сушки изоляции, т.е. в зависимости от предполагаемого времени технологической паузы определяется возможность включения заданного режима работы устройства осмотической сушки изоляции для оптимального цикла. Оптимальный режим сушки изоляции обмоток электродвигателя основан на создании постоянного напряжения и пульсирующего напряжения с прямоугольной формой импульсов и той же полярностью, что и постоянное напряжение с дополнительно подключенной индуктивностью последовательно источникам напряжения [3].

Учитывая, что изоляция электродвигателей характеризуется сложной структурой, которая обеспечивает возникновение объемных зарядов при электроосмосе, необходимо через некоторое время, когда наблюдается замедление процесса электроосмотической сушки, интенсифицировать процесс сушки.

Изменение значений индуктивности позволяет изменять величину индуктивного сопротивления и добиваться его равенства с емкостным сопротивлением, которым является изоляция электродвигателя. Контролировать изменение сопротивления изоляции электродвигателя удобнее по изменению осциллограммы тока в цепи. В момент включения устройства сушки изоляции, осциллограмма тока показывает наличие гармоник с большой амплитудой. По мере обезвоживания, выбросы тока становятся все слабее и величина тока электроосмоса уменьшается. Это свидетельствует о росте сопротивления изоляции.

Применение устройства сушки изоляции статорной обмотки асинхронного электродвигателя механизма подъема тележки промежуточного ковша, основанного на электроосмотическом методе извлечения влаги, позволило увеличить межремонтный ресурс двигателя примерно в 2,5 раза, а так же производить диагностику состояния изоляции статорной обмотки электродвигателя. Учитывая данные о состоянии изоляции, полученные мегаомметром, и, сравнивая с эталонными значениями, становится возможным спрогнозировать дату планового ремонта электродвигателя. Это, в свою очередь, позволяет соблюдать регламент по замене неисправного электрооборудования и предотвращать аварийный режим по причине преждевременного выхода из строя приводного электродвигателя механизма подъема тележки промежуточного ковша машины непрерывного литья заготовок.

1. **Гук, Ю.Б.** Анализ надежности электро-энергетических установок [Текст] / Ю.Б. Гук. – Л.: Энерго-атомиздат. Ленингр. отд-ние, 1988. – 224 с.

2. **Жерве, Г.К.** Промышленные испытания электрических машин. [Текст] /Г.К.Жерве.–Л.: Энергоатомиздат, 1984. –408 с.

3. **Мороз, Н.К., Немировский, А.Е., Симаков, К.П.**Способ электроосмотической сушки изоляции обмоток электрических машин: патент РФ № 2174280[Текст] /Н.К. Мороз, А.Е. Немировский, К.П.Симаков,2001.

4. <http://leg.co.ua/>: Сайт об электрических сетях, высоковольтном оборудовании и электрических машинах. [Электронный ресурс].– Режим доступа: <http://leg.co.ua/info/elektricheskie-mashiny/ekspluatsiya-elektrodvigatelay-v-selskom-hozyaystve-3.html>, свободный. – Загл. с экрана.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННУЮ НАДЕЖНОСТЬ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Т. Г. Сухоносова<sup>1</sup>, А.И. Сунаргулова<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»,  
г. Магнитогорск, Россия.

## INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF MAINTENANCE ON THE OBSERVED RELIABILITY OF THE CONTROL SYSTEM

T.G. Suhonosova<sup>1</sup>, A.I. Sunargulova<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

<sup>1</sup>tgobuhova@gmail.com, <sup>2</sup>sunairik@mail.ru

**Аннотация.** Среди мероприятий по повышению надежности при эксплуатации систем управления важное место отводится стратегии технического обслуживания. Авторами предлагается использовать метод назначения сроков проведения профилактических работ по оценке надежности системы. В статье приведены результаты исследования влияния дисциплины обслуживания при восстановлении отказавших элементов на стационарные показатели надежности системы.

**Ключевые слова:** эксплуатационная надежность, техническое обслуживание, коэффициент готовности, средняя наработка на отказ, время восстановления.

**Abstract.** Maintenance strategy in operation - this is one of the most important works to improve the reliability of control systems. The authors propose to use the method of calculate the time between maintenance, depending on the predicted reliability measure. The results of studies of the effect discipline recovery service to reliability measure.

**Keywords:** observed reliability, maintenance, availability function, mean operating time between failures, restoration time.

Поддержание требуемого уровня надежности элементов и систем управления – это одна из основных задач по обеспечению высокой безопасности и живучести сложных систем. Эксплуатационная надежность систем управления определяется не только исходными показателями надежности и режимами работы системы, но и организацией технического обслуживания (ТО) аппаратного комплекса и сопровождения программного обеспечения САУ. Большинство элементов САУ являются восстанавливаемыми.

Основу ТО составляют профилактические работы (планово-предупредительных ремонтов) и регламентные проверки. Профилактики проводятся периодически с целью выявления ненадежных, отказавших или неисправных элементов, а также для установления причин, способствующих возникновению отказов.

Рассмотрим способ выбора сроков между профилактическими работами по техническому состоянию системы, а именно по показателю вероятности безотказной работы системы (ВБР) –  $P(t)$ . Как правило, периодичность проведения ТО обычно совпадает с плановыми остановками технологического оборудования. Сущность влияния ТО на надежность оборудования объясним с помощью графика изменения ВБР системы  $P(t)$  в предположении отсутствия ТО (рис. 1, кривая 1). Так как реально на оборудовании проводятся профилактические работы, при которых выявленные неисправности устраняются, то кривая  $P(t)$  получает характерный, так называемый, «пилообразный» вид (см. рис. 1, кривая 2). В моменты  $t_{пр}^i$  на оборудовании выполняются  $i$ -профилактические работы, и в дальней-

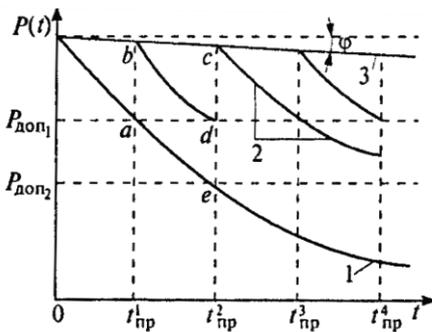
шем кривая  $P(t)$  имеет начало на линии, близкой к максимальному значению  $P(t) \approx 1$ .

Из-за воздействия на оборудование при эксплуатации факторов внешней среды надежность их постепенно ухудшается. Кроме того, после выполнения ТО могут остаться неисправные элементы, которые не были обнаружены обслуживающим персоналом в ходе проверки работоспособности объектов [1].

Следовательно, и количественно это должно отражаться наклоном линии относительно прямой, соответствующей максимуму вероятности  $P(t)$  в момент времени  $t = 0$  (угол  $\varphi$ ). Назовем эту линию линией ухудшения (см. рис. 1, прямая 3). Принципиально линия ухудшения может быть не прямой и иметь начало на оси ординат не обязательно в точке, соответствующей  $P(0)=1$ . Участок  $ab$  показывает, насколько восстанавливается надежность системы при проведении профилактики. Невосстановление надежности до начальной величины с течением времени эксплуатации, как правило, растет, а следовательно, может наступить такой момент, когда надежность оборудования не будет восстанавливаться за счет профилактики. Этот момент времени указывает на то, что необходимо проводить более эффективные работы (средний или капитальный ремонт) [1].

Снижение надежности в недопустимых пределах (на рисунке 1 ниже значений  $P_{доп1}$  и  $P_{доп2}$ ) может привести к частым отказам в работе систем. Значение допустимой вероятности  $P_{доп}$  выбирается на основании анализа эффективности данного оборудования. Из рис. 1 видно, что периодичность выполнения ТО существенным образом влияет на значение ВБР системы. Таким

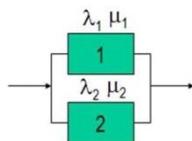
образом, при назначении периодичности профилактики необходимо промежутки времени между циклами работ выбирать так, чтобы обеспечить требуемое значение ВБР.



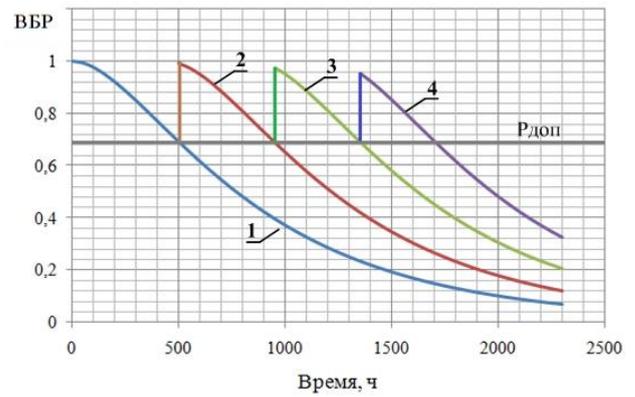
**Рис. 1.** Влияние периодичности ТО на надежность восстанавливаемой системы: 1 – ВБР системы  $P(t)$  в предположении отсутствия профилактики; 2 – ВБР системы при проведении профилактик в моменты времени  $t^1_{пр}$ ,  $t^2_{пр}$ ,  $t^3_{пр}$ ,  $t^4_{пр}$ ; 3 – линия ухудшения ВБР

Планирование профилактики [5, 6] зависит от того, насколько вероятны ожидаемые отказы различной природы. Если отказы – редкие события и носят характер внезапных отказов, то не имеет смысла проводить частые плановые замены элементов системы, поскольку заменяемый элемент не будет менее надежен, чем новый, и замена его может привести не к повышению, а к снижению надежности. При постепенных отказах плановая замена элементов может существенно повысить надежность системы, если замена своевременна (преждевременная замена экономически невыгодна). Таким образом, разработка стратегии профилактических работ (выбор сроков, объема, последовательности, глубины и стратегии восстановления) зависит от характера потока отказов и восстановления, вида отказов, требований к надежности и экономической целесообразности.

Для примера рассчитаем периодичность ТО для дублированной системы с постоянно включенным резервом, схема надежности которой предоставлена на рис. 2 при допустимом уровне снижения ВБР до  $R_{доп}=0,7$ . Интенсивности отказов элементов 1 и 2 равны соответственно:  $\lambda_1=2,3 \cdot 10^{-3} \text{ ч}^{-1}$  и  $\lambda_2=1,2 \cdot 10^{-3} \text{ ч}^{-1}$ . С учетом ухудшения надежности во время эксплуатации с углом  $\text{tg}\phi = 1,26 \cdot 10^{-4}$ , получим следующие моменты проведения профилактических работ:  $t^1_{пр}=500$ ,  $t^2_{пр}=950$ ,  $t^3_{пр}=1400$  ч. Т.е. промежутки между профилактиками уменьшаются на 50 ч, и проведение 10-й профилактики не приведет к повышению ВБР системы. Следовательно, каждая 10-я профилактика должна заменяться на капитальный ремонт для обеспечения заданного уровня  $\text{ВБР} \geq R_{доп}$ .



**Рис. 2.** Дублированная система с постоянно включенным резервом:  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  – интенсивности отказов элементов 1 и 2;  $\mu_1$  и  $\mu_2$  – интенсивности восстановлений элементов 1 и 2



**Рис. 3.** Влияние периодичности ТО на надежность системы при  $R_{доп}=0,70$  (1 – ВБР при отсутствии профилактики; 2 – ВБР после проведения 1-й профилактики; 3 – ВБР после проведения 2-й профилактики; 4 – ВБР после 3-й профилактики)

При организации эксплуатации по состоянию возникают следующие задачи [2]:

- выбор минимального необходимого числа контролируемых параметров, несущих достаточную информацию о состоянии системы в любой момент времени;
- обоснование допустимых областей изменения выбранных для контроля параметров;
- разработка алгоритмов математического обеспечения для обоснования программ эксплуатации по состоянию;
- создание технических средств контроля и диагностирования, регистрации и оперативной обработки измеряемой информации.

Для оценки влияния стратегии ТО на надежность системы используем следующие показатели: среднее время наработки системы до отказа  $T_c$ , среднее время восстановления системы  $T_v$  и коэффициент готовности системы  $K_r$ . Необходимо оценить влияние дисциплины обслуживания на надежность системы.

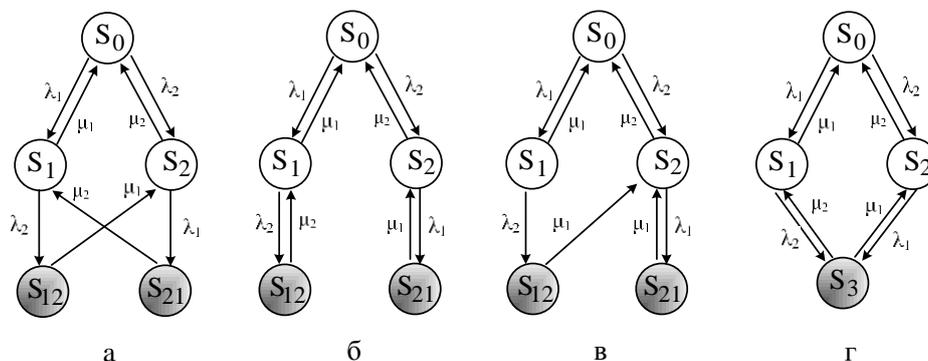
В системе ТО будем предполагать, что известна стратегия восстановления отказавших элементов и количество ремонтных бригад, занятых обслуживанием системы.

При ограниченном восстановлении (если число бригад меньше, чем возможное число отказавших элементов), необходимо задать порядок восстановления отказавших элементов.

Исследуем влияние количества ремонтных бригад и порядок восстановления отказавших элементов на показатели надежности дублированной системы с постоянно включенным резервом (см. рис. 2).

При расчете показателей надежности системы примем следующие положения:

- элемент может находиться в одном из состояний работоспособности, восстановления или простоя;
- переход элементов из одного состояния в другое происходит мгновенно;
- отказ или восстановление одного элемента не влияет на состояния других элементов;
- в один момент времени может произойти только одно событие (отказ или восстановление);



**Рис. 4. Дублированная система с постоянно включенным резервом: а – прямой приоритет; б – обратный приоритет; в – назначенный приоритет; г – неограниченное восстановление ( $S_0$  – оба элемента работоспособны;  $S_1$  – 1-й элемент отказал и восстанавливается, 2-й элемент работоспособен;  $S_2$  – 2-й элемент отказал и восстанавливается, 1-й элемент работоспособен;  $S_{12}$  – отказал сначала 1-й, а затем 2-й элемент;  $S_{21}$  – отказал сначала 2-й, а затем 1-й элемент;  $S_3$  – оба элемента восстанавливаются)**

– восстановление элемента начинается сразу же после его отказа при наличии свободной бригады или по очереди, согласно принятому приоритету обслуживания.

Для ограниченного восстановления рассмотрим случаи восстановления элементов с прямым, обратным и назначенным приоритетом [3].

При восстановлении с прямым приоритетом обслуживания при отказе двух элементов первым восстанавливается первый отказавший элемент, граф состояний системы представлен на рис. 4, а. Например, в состоянии  $S_{12}$  (два отказа) восстанавливается элемент 1, а в состоянии  $S_{21}$  восстанавливается элемент 2.

Обратный приоритет – первым восстанавливается элемент, отказавший последним, (см. рис. 4, б). Например, в состоянии  $S_{12}$  восстанавливается элемент 2, а в состоянии  $S_{21}$  восстанавливается элемент 1.

Назначенный приоритет – при отказе двух элементов первым восстанавливается элемент 1 (выбран для примера) вне зависимости от порядка номеров отказавших элементов (см. рис. 4, в). Например, в состоянии  $S_{12}$  восстанавливается элемент 1 и в состоянии  $S_{21}$  тоже восстанавливается элемент 1.

В случае неограниченного восстановления количество ремонтных бригад больше или равно количеству элементов. Для рассматриваемой системы две бригады, поэтому вне зависимости от порядка отказавших элементов при отказе обоих элементов идет независимое восстановление каждого элемента в состоянии  $S_3$  (см. рис. 4, г).

Так как решение систем интегральных уравнений даже для простой дублированной системы довольно затруднительно, воспользуемся приближенными решениями [3]. Например, для случая назначенного приоритета (см. рис. 4, в) среднее время наработки системы до отказа  $T_C$  и среднее время восстановления системы  $T_B$  определяются:

$$T_C = \frac{(1 + \lambda_1 G(\lambda_2))(1 + \lambda_2 T_{B2})}{\lambda_1 \lambda_2 (T_{B2} + (1 + \lambda_1 T_{B2}) G(\lambda_2))};$$

$$T_B = \frac{T_{B1} - G(\lambda_2) + \lambda_2 T_{B1} T_{B2} (1 + \lambda_1 G(\lambda_2))}{\lambda_2 (T_{B2} + (1 + \lambda_1 T_{B2}) G(\lambda_2))},$$

где  $T_{B1}$ ,  $T_{B2}$  – среднее время восстановления элементов 1 и 2 соответственно;  $G(\lambda_2)$  – функция для равномерного

закона распределения времени восстановления на интервале  $[a, b]$  вычисляется по формуле [3, 4]:

$$G(\lambda) = \frac{1}{\lambda} - \frac{e^{-a\lambda} + e^{-b\lambda}}{(b-a)\lambda^2}.$$

Для рассматриваемой в статье дублированной системы с постоянно включенным резервом с интенсивностями отказов  $\lambda_1=2,3 \cdot 10^{-3} \text{ ч}^{-1}$ ,  $\lambda_2=1,2 \cdot 10^{-3} \text{ ч}^{-1}$  и восстановлений  $\mu_1=\mu_2=0,05 \text{ ч}^{-1}$  применим указанные формулы с приближенными решениями. Среднее время восстановления элементов  $T_{B1} = T_{B2} = 1/0,05 = 20 \text{ ч}$ . Предположим, что среднеквадратическое отклонение от  $T_B$  составляет 2 ч, и на интервале времени  $[18, 22]$  вероятность восстановления элементов распределена равномерно. Результаты расчетов представлены в табл. 1.

**Табл. 1. Стационарные показатели надежности для различных дисциплин обслуживания**

Стратегия ТО	$T, \text{ ч}$	$T_B, \text{ ч}$	$K_T$
Без восстановления ( $T_{БВ}$ )	982	—	0,0000
Прямой приоритет	9535	10,1	0,9989
Обратный приоритет	9692	20,0	0,9979
Назначенный приоритет	9537	15,2	0,9984
Неограниченное восстановление	9692	10,0	0,9990

Коэффициент готовности системы  $K_T$  определим по формуле:

$$K_T = \frac{T_C}{T_C + T_B}.$$

Среднее время наработки системы до отказа при различных стратегиях восстановления элементов составляет  $T_{ТО} = 9614 \text{ ч}$  с отклонением от среднего не более 1 %. Можно сделать вывод, что на среднее время наработки системы  $T_C$  стратегия ТО практически не влияет.

Однако, без какого-либо ТО (без восстановления элементов) наработка до отказа системы снижается почти в 10 раз. Выигрыш надежности по среднему времени безотказной работы для различных стратегий восстанов-

ления по отношению к системе без ТО составляет  $G_T = T_{ТО}/T_{БВ} \approx 9,8$  при  $T_{БВ} = 982$  ч.

При анализе результатов в табл.1 видно, что время восстановления системы  $T_B$  сильно зависит от дисциплины обслуживания. Стационарные показатели надежности системы, обслуживаемой одной ремонтной бригадой с прямым приоритетом, близки к показателям надежности системы с неограниченным восстановлением.

Доля времени, когда система находится в состоянии готовности, выше всего для системы с неограниченным восстановлением элементов.

Полученные в данной работе выводы нельзя распространять на любые дублированные системы. В зависимости от вида законов распределения случайных величин  $T_C$  и  $T_B$ , значений интенсивностей отказов и восстановлений элементов могут получиться различные выводы. Предлагаемый в статье приближенный расчет показателей эксплуатационной надежности позволит в каждом конкретном случае выбрать рациональную стратегию технического обслуживания.

1. **Острейковский, В.А.** Теория надежности [Текст]: Учебник для вузов / В.А. Острейковский // – М.: Высшая школа, 2003.– 463 с.

2. **Сухоносова, Т.Г.** Диагностика и надежность технических средств автоматизации [Электронный ресурс]: Учебное пособие / Т.Г. Сухоносова, М.Ю. Рябчиков // – Электрон. текстовые дан. (6 Мб). Магнитогорск: ФГБОУ ВПО МГТУ, 2015. – 94 с.

3. **Половко, А.М.** Основы теории надежности [Текст] / А.М. Половко, С.В. Гуров. // – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: БВХ-Петербург, 2006. – 704 с.

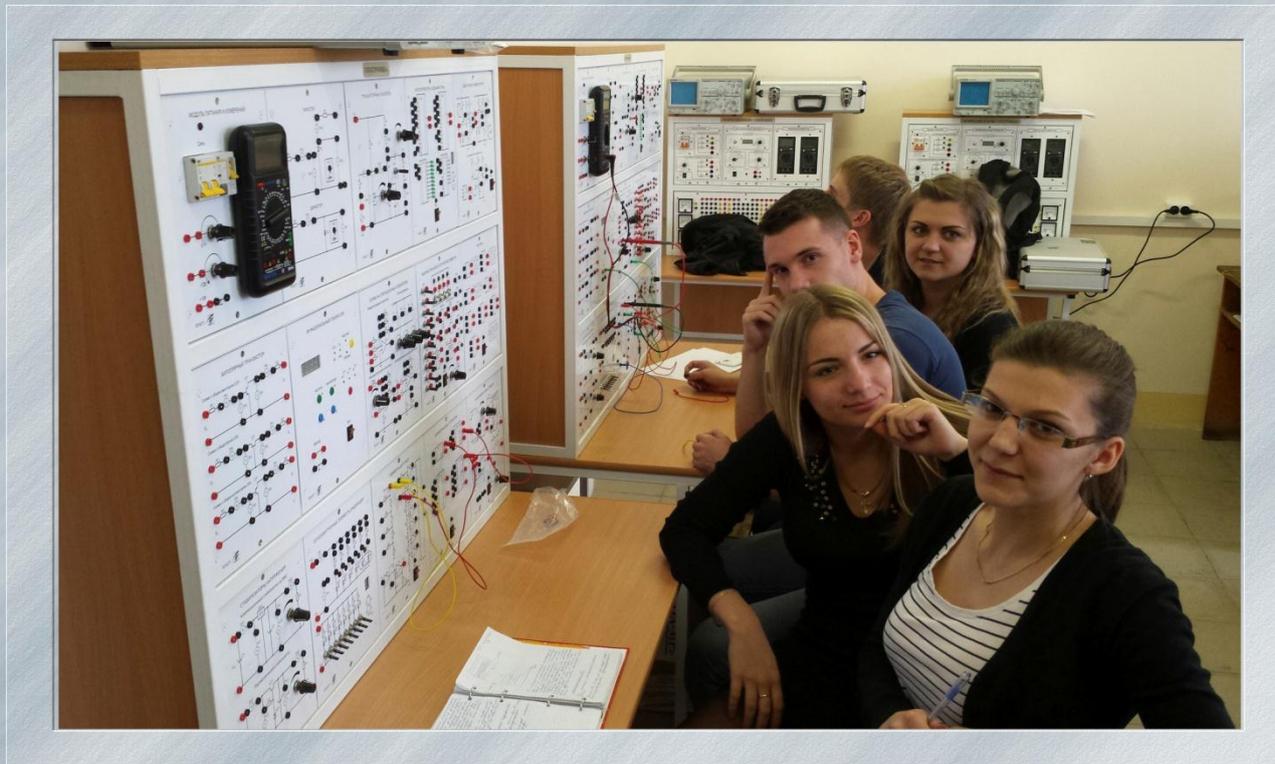
4. **Половко, А.М.** Основы теории надежности. Практикум [Текст] / А.М. Половко, С.В. Гуров // – СПб.: БВХ-Петербург, 2006. – 560 с.

5. **Белоусов, М.Д.** Метод самодиагностики термопреобразователя сопротивлений в процессе работы [Текст] / М.Д. Белоусов, А.Л. Шестаков // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2009. № 3 (136). С. 17-19.

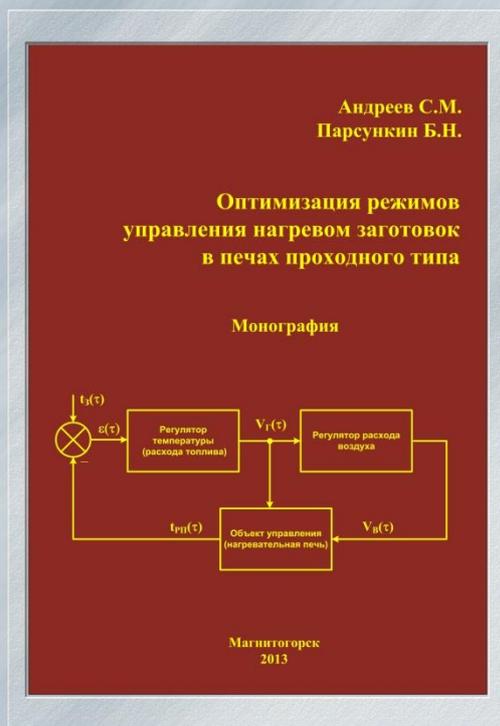
6. **Шестаков, А.Л.** Оценка собственного состояния средств измерения [Текст] / А.Л. Шестаков, М.Д. Белоусов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2011. №2(219). С. 19-23.

Кафедра «Автоматизированные системы управления» (АСУ) готовит студентов по направлению 220400 - Управление в технических системах, профиль - Системы и средства автоматизации технологических процессов. Уровень подготовки - бакалавриат и магистратура.

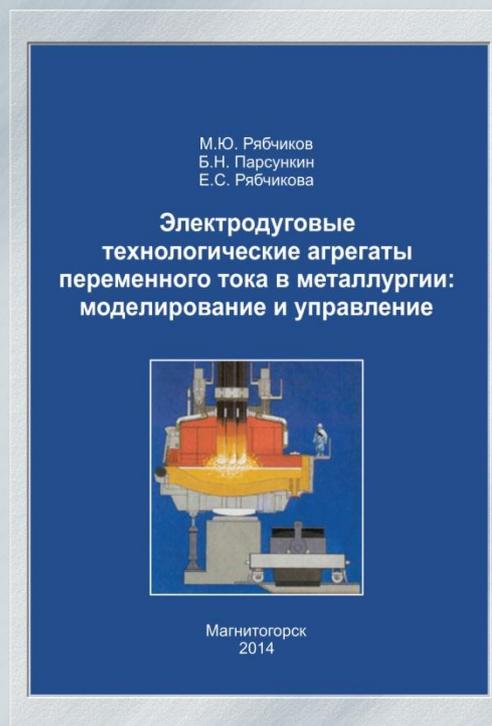
На базе кафедры созданы современные лаборатории для обучения особенностям программирования современной микропроцессорной техники (контроллеры Simatic S7-300/400, S7-1200, OВЕН, OMRON, DELTA и др.), изучения технических средств автоматизации и электроники.



### РЕКОМЕНДУЕМЫЕ ПЕЧАТНЫЕ РАБОТЫ СОТРУДНИКОВ КАФЕДРЫ АСУ



В работе представлены научные основы построения САУ нагревом заготовок в методических печах широкополосных станков для реализации оптимальных режимов нагрева



В работе представлены результаты исследования существующих режимов работы электродуговых агрегатов переменного тока, к которым относятся ДСП и АПК

