

ISSN (Print) 2306-3173

ISSN (Online) 2413-1601

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



№ 3(9), 2015

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПРОИЗВОДСТВА

№3 (9) октябрь 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 - д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой обработки металлов давлением ФГБОУ ВПО Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия;

Вдовин Константин Николаевич - д-р техн. 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 - д-р техн. наук, заведующий кафедрой кафедры 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 и верстка: Рябчикова Елена Сергеевна

Адрес редакции: 455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38. Тел.: (3519) 29-85-58.

Отпечатан на полиграфическом участке МГТУ им. Г.И. Носова, 455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38.

Выход в свет 12.2015. Тираж 100 экз. Цена свободная.

СОДЕРЖАНИЕ

Математическое моделирование и программное обеспечение производственных процессов

- Т.В. Казакова.* Разработка и исследование работы системы автоматической оптимизации на физической модели процесса..... 4
- О.С. Логунова, Ю.А. Калугин, В.Е. Торчинский.* К вопросу об эволюции математической модели описания теплового состояния тел при изменении граничных условий третьего рода..... 9
- В.Б. Кузнецова, А.И. Сергеев, Д.В. Кондусов.* Модель мониторинга эксплуатации изделий машиностроения..... 15

Системы контроля и управления качеством и экологичностью продукции

- М.Ю. Рябчиков, Р.Э. Бурнашев, Е.С. Рябчикова, Н.В. Богданов, А.И. Сунаргулова.* Исследование влияния угла освещения на качество определения контуров зерен щебня, расположенных в несколько слоев..... 18

Автоматизированные системы управления

- Б.Н. Парсункин, С.М. Андреев, А.У. Ахметова.* Адаптивная система локального уровня управления в АСУТП промышленного производства..... 21
- К.В. Лицин, А.Н. Шаповалов.* Повышение эффективности аглопроцесса в результате автоматизации режима увлажнения аглошихты при окомковании..... 27
- М.Ю. Рябчиков, В.В. Гребенникова, Е.С. Рябчикова., Н.В. Богданов, А.И. Сунаргулова* Обзор существующих систем оперативного управления агломерационным процессом..... 31
- И.Б. Прохоров, П.А. Гребенищikov, А.Р. Мубаракшин, Д.А. Ахметдинов, В.С. Моисеев.* Система автоматического управления угловой стабилизацией квадрокоптера..... 36
- А.Ю. Заковоротный.* Интеллектуальная система поддержки принятия решений машинистом с возможностью автоведения поезда..... 40

Технические средства автоматизации

- И.Г. Самарина, В.Э. Каюмова.* Обзор приборов магнитной структуроскопии стали в прокатном производстве..... 46
- И.Б. Прохоров, П.А. Гребенищikov.* Синтез показаний двух датчиков на примере высотомера..... 50

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ

Оформление

Количество авторов – не более 5.

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

Стили: УДК: TimesNewRoman, обычный, размер 12 пт, выравнивание по левому краю. **Заголовок статьи:** TimesNewRoman, полужирный, размер 12 пт, межстрочный интервал одинарный, выравнивание по центру. **Фамилия, инициалы авторов:** TimesNewRoman, полужирный курсив, размер 12 пт, межстрочный интервал одинарный, выравнивание по центру. **Сведения об организации и электронный адрес:** TimesNewRoman, курсив, размер 11 пт, межстрочный интервал одинарный, выравнивание по центру. Наличие эл. адреса хотя бы одного из авторов является обязательным. **Основной текст:** TimesNewRoman, 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.): TimesNewRoman, 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 TimesNewRoman, 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. Рябчиков¹, В.В. Гребенникова², Е.С. Рябчикова³
^{1,2,3} 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. Ryabchikov¹, V.V. Grebennikova², E.S. Ryabchikova³
^{1,2,3} Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia
¹mail@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. Abstract, italic. Abstract, italic. Abstract, italic. Abstract, italic. Abstract, italic. Abstract, italic.

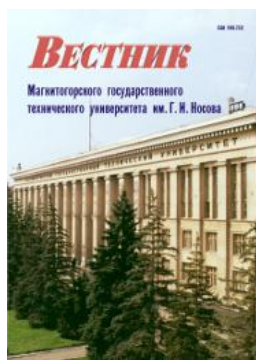
Keywords: *keywords; keywords; keywords; keywords; keywords.*

пустая строка

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

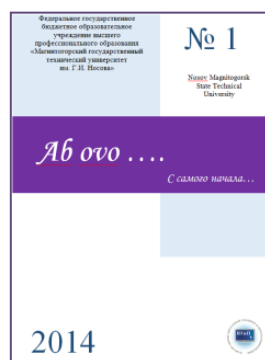
Другие рекомендуемые периодические издания



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

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ НА ФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА

Казакова Т.В.

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

DEVELOPMENT AND RESEARCH OF SYSTEM OF AUTOMATIC OPTIMIZATION OF THE PHYSICAL MODEL OF THE PROCESS

T.V. Kazakova

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

¹tatianakazakova@mail.ru

Аннотация. В работе приведено исследование реализации системы автоматической оптимизации, в основе физической модели которой лежит аппаратно-реализованная схема, формирующая унимодальную экстремальную статическую характеристику и заданные динамические свойства. Использование физической модели процессов для разработки, исследования и совершенствования систем управления является удобным средством для исследования работы управляющих алгоритмов в условиях, приближенных к реальным. Работа физической модели не зависит от вида и реализации системы управления. Также реализация модели объекта управления как отдельного физически реализуемого устройства позволяет производить исследование по настройке программного обеспечения системы управления с учетом скорости передачи данных, динамических свойств объекта управления, влияние помех и т.д.

Ключевые слова: физическая модель, система автоматической оптимизации, экстремальное регулирование, SCADA-система, алгоритм автоматической оптимизации.

Abstract. The paper focuses on the implementation of the automatic optimization, based on a physical model which is hardware-implemented scheme forming unimodal extreme static characteristic and dynamic properties specified. Using a physical model of the process to develop, research and improvement of the system control is a useful tool for the study of control algorithms work in conditions close to reality. Work of the physical model is not dependent on the type and implementation of the control system. Also, implementation of the model of the control process as a separate physically realizable device allows research software configuration control system, taking into account the speed of data transmission, the dynamic properties of the control object, the effect of noise, etc.

Keywords: physical model, automatic optimization system, extreme regulation, SCADA-system, algorithm for automatic optimization.

Использование систем автоматической оптимизации (САО) возможно в условиях наличия унимодальных статических характеристик оптимизируемого технологического процесса. В этом случае задачей САО в отличие от систем стабилизации [16] является нахождение и поддержание минимума или максимума величины процесса [1]. Для большинства производственных процессов могут быть определены такие экстремальные зависимости и, соответственно, использованы САО для поддержания характеристик процесса на оптимальном значении. Так, в работе [2] рассматриваются использование САО для процессов сжигания топлива, в работах [3-5, 13-15] – процессы оптимизации электрических и энергетических режимов в дуговых сталеплавильных печах и агрегатах доводки стали, в работах [6,7] – процессы внепечной обработки стали.

Особенностью реального технологического процесса, имеющего экстремальную статическую характе-

ристику, является наличие низко- и высокочастотных возмущений, а также значительной инерционности, что в свою очередь приводит к необходимости создания таких САО, которые, в таких условиях, гарантировано поддерживали оптимальный режим работы агрегата, осуществляя слежение за положением экстремума статической характеристики [8]. Также представляет определённый интерес и физическая реализация САО, включая построение систем передачи информации, её обработку и сохранение.

Основной задачей исследования является построение САО, в которой используются типовые технические средства для построения систем управления. Данная система реализована в виде лабораторного стенда. В качестве объекта управления положена физическая модель процесса, имеющая экстремальную статическую характеристику и настраиваемые динамические параметры. В отличие от исследований работы систем

управления на математических моделях процесса, использование физических моделей делает возможным изучение процессов обмена информацией между отдельными частями системы, реализацию регуляторов, элементов отображения процесса в условиях близким к реальным [9].

В основу автоматизированной системы положены принципы обмена информацией между исследователем и экспериментальной установкой в реальном масштабе времени [10]. Структурная схема технической реализации САО приведена на рис.1. Структурная схема содержит два основных блока:

- физическую модель с устройствами ввода вывода – физическое окружение;
- систему управления экспериментальной установкой, в которой реализуется алгоритм автоматической оптимизации.

В основе блока «Физическое окружение» лежит физически реализованный объект управления, сформированный посредством электрической схемы. Электрическая схема лабораторного макета объекта управления представлена на рис. 2 Структура объекта управления разделена на три части:

- блок согласования предназначен для согласования сигнала с ЦАП;
- функциональный элемент реализует функциональную зависимость экстремального вида. Экстремальная статическая характеристика формируется из-за нелинейности начального участка характеристики транзистора VT4;
- RC-фильтр, для формирования динамических свойств объекта.

В качестве устройства организации ввода – вывода используется модуль E14 - 140 фирмы «L – Card »,

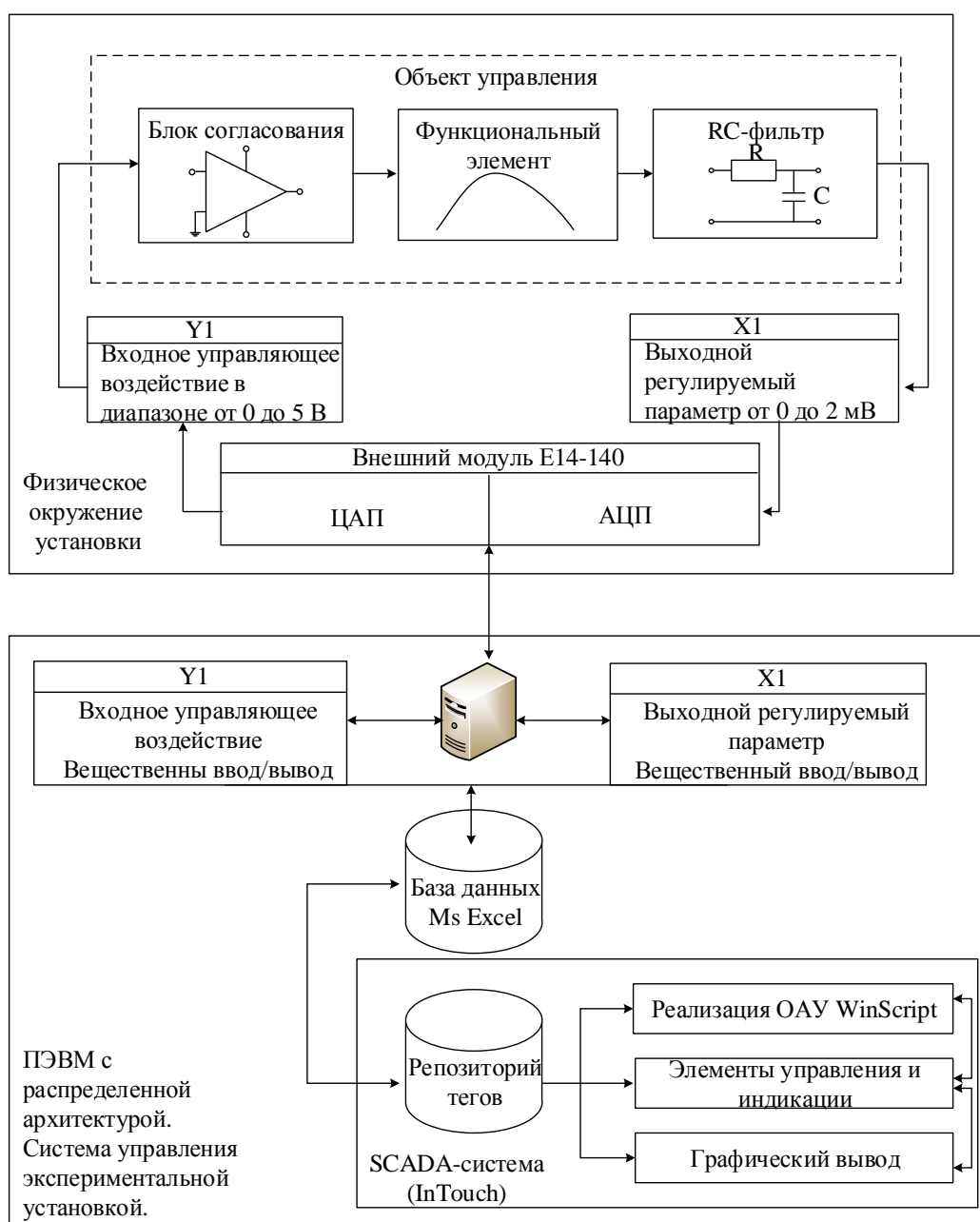


Рис.1. Структурная схема системы автоматической оптимизации с физической моделью

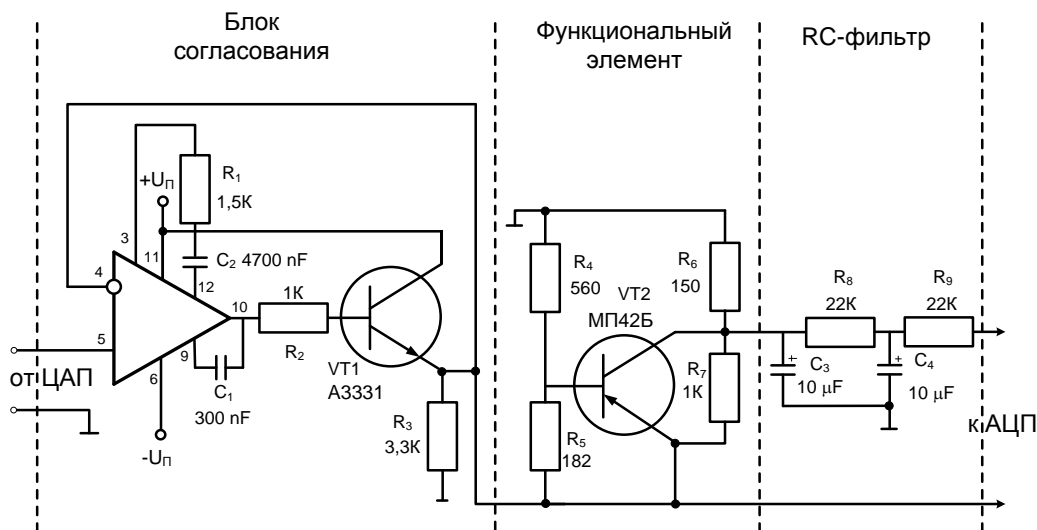


Рис. 2. Электрическая схема объекта управления физической модели

подсоединяемым к ПЭВМ через USB-интерфейс. Модуль E14-140 предназначен для построения многоканальных измерительных систем сбора аналоговых данных, а также цифрового управления и контроля состояния внешних устройств. Широко используется в технике проведения эксперимента [11].

Модули блока «ПЭВМ с распределенной архитектурой». Система управления экспериментальной установкой» включает в себя сервер связи в режиме реального времени, SCADA-систему, базу данных, реализованную в Ms Excel.

В качестве сервера связи в режиме реального времени используется программа «Stend», организующая обмен данными между модулем ввода – вывода и программной частью экспериментальной установки. Программа представляет собой DDE сервер и позволяет организовать интерфейс связи периферийных устройств (модулей ввода – вывода) стенда с программной частью системы управления, SCADA-системы и Ms Excel по протоколу

DDE (Dynamic Data Exchange - механизм взаимодействия приложений в операционных системах Microsoft Windows). Использование данного программного обеспечения позволяет контролировать параметры входных и выходных сигналов, а также корректировать их значения.

Для реализации основных задач: визуализация процесса, хранение данных, взаимодействие с другими системами сбора и передачи данных, реализация алгоритмов управления спроектирована SCADA-система на базе пакета InTouch фирмы Wonderware. Wonderware InTouch - наиболее быстрое и удобное средство для создания приложений интерфейса человека с машиной (HMI/MMI-Human/Man Machine Interface) в операционной системе Microsoft Windows, представленный на рис. 3, с помощью которого осуществляется наглядность представляемой информации и управления процессом.

В качестве примера исследования работы САО был реализован алгоритм автоматической оптимизации с за-

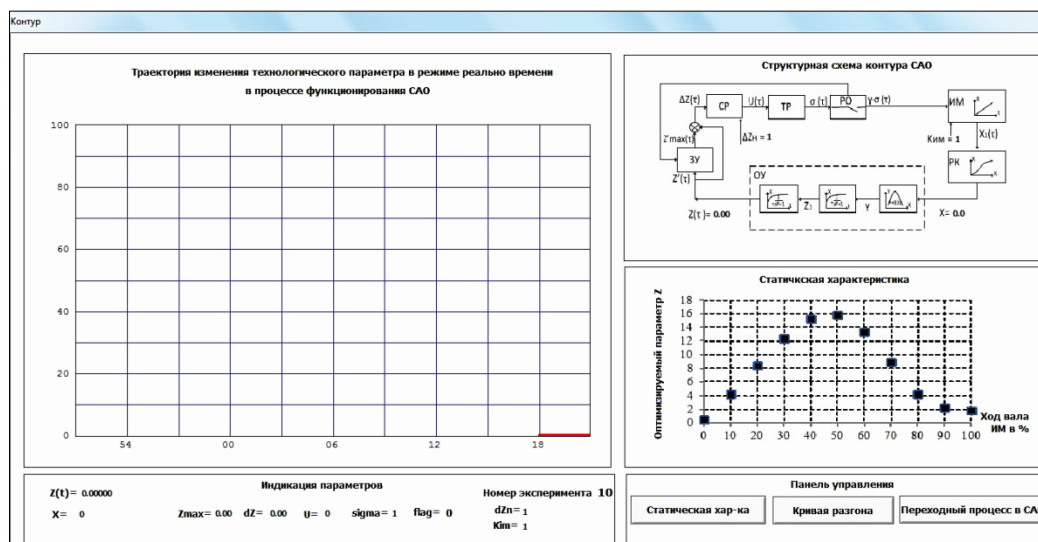


Рис. 3. Человеко-машинный интерфейс (HMI/MMI-Human/Man Machine Interface), с помощью которого осуществляется наглядность представляемой информации и управления процессом

поминанием максимума входной величины [8] по варианту, предложенному в [2].

Алгоритм управления системой реализован как макрос на языке WinScript, работающий в заданном цикле, что позволяет полностью автоматизировать процесс работы, рис. 4.

Полученные параметры системы управления отображаются в диалоговых окнах. Переходный процесс в САО отображается в виде динамического тренда в реальном времени. Во время выполнения приложения они постоянно обновляются, позволяя вычерчивать изменения входного управляющего воздействия и выходной регулируемой величины.

Каждый элемент системы работает независимо от других элементов, обмен данными при этом происходит асинхронно, не зависимо от цикла работы элемента. При такой структуре ПЭВМ «приспосабливается» к реальному физическому процессу, так как внутри цикла моделирования работает динамический процесс, не зависящий от работы программного обеспечения.

Основным элементом системы управления является объект управления со статической характеристикой $Y(X)$ (рис.5). В качестве входной величины X (аргумента) принята величина входного напряжения в процентах первого канала цифроаналогового преобразователя модуля. Задается напряжение в процентах 0%-0 В, 100% - 5 В.

В процессе сбора экспериментальных данных в ходе пассивного эксперимента возможны некоторые отличия случайных выходных переменных исследуемой модели, обусловленные различием условий работы модели в различные периоды времени сбора экспериментальных данных. Динамические параметры объекта были

найжены из экспериментально полученной кривой разгона объекта, которые количественно оцениваются следующими показателями: время запаздывания $\tau_3 = 1$ с; постоянная времени $T_0 = 26$ с.

Результатом алгоритма автоматической оптимизации является переходный процесс в САО, графическое изображение которого вычерчивается в ходе работы программы в области «Траектория изменения технологического параметра».

Все данные системы управления, используя механизм DDE (Data Dinamic Exchanch) передаются и сохраняются в электронных таблицах MS Excel и являются доступными для последующей обработки и анализа используя все средства электронных таблиц [12].

В итоге в системе с запоминанием экстремума установлен периодический процесс, по которому можно определить показатели качества работы САО. Траектория переходного поискового процесса САО в координатах «величина выходного сигнала ОУ» - «величина входного сигнала ОУ» приведена на рис.5.

Такой способ проектирования установки с экстремальным регулятором позволяет создать законченный алгоритм экстремального регулирования, который в дальнейшем может быть реализован в промышленном контроллере.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Парсункин, Б.Н.** Оптимизация управления технологическими процессами в металлургии: Монография / Б.Н. Парсункин, С.М. Андреев, У.Б. Ахметов. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2006. 198 с.

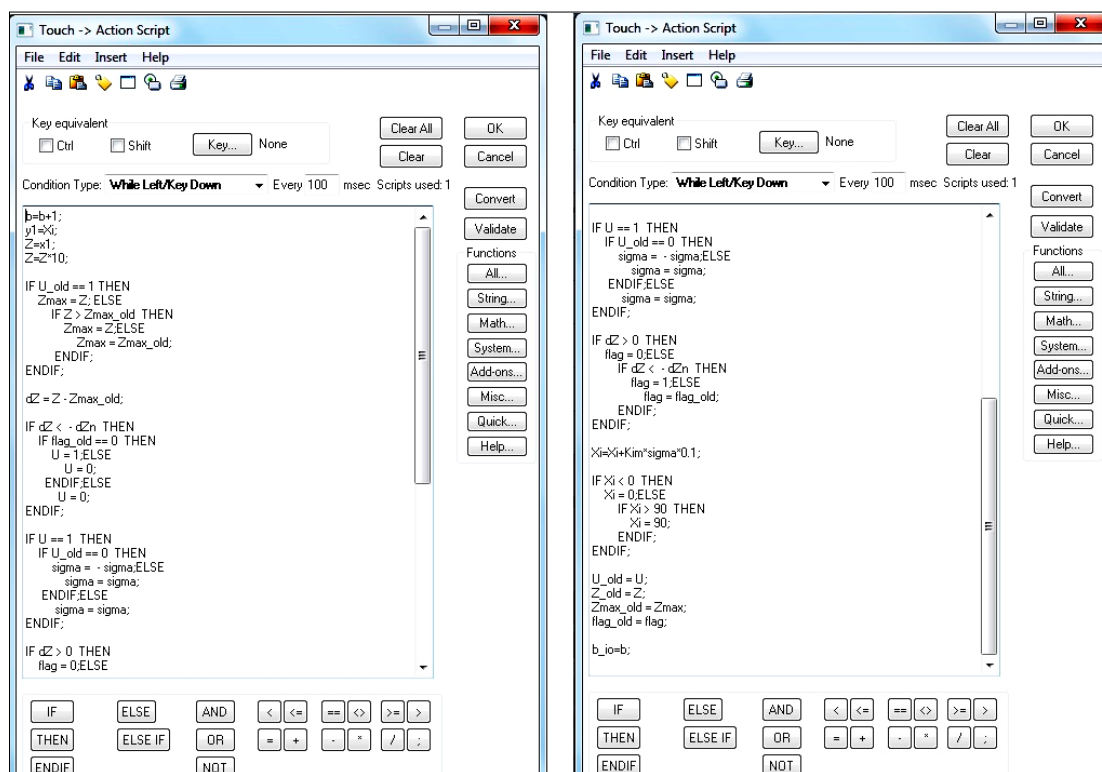
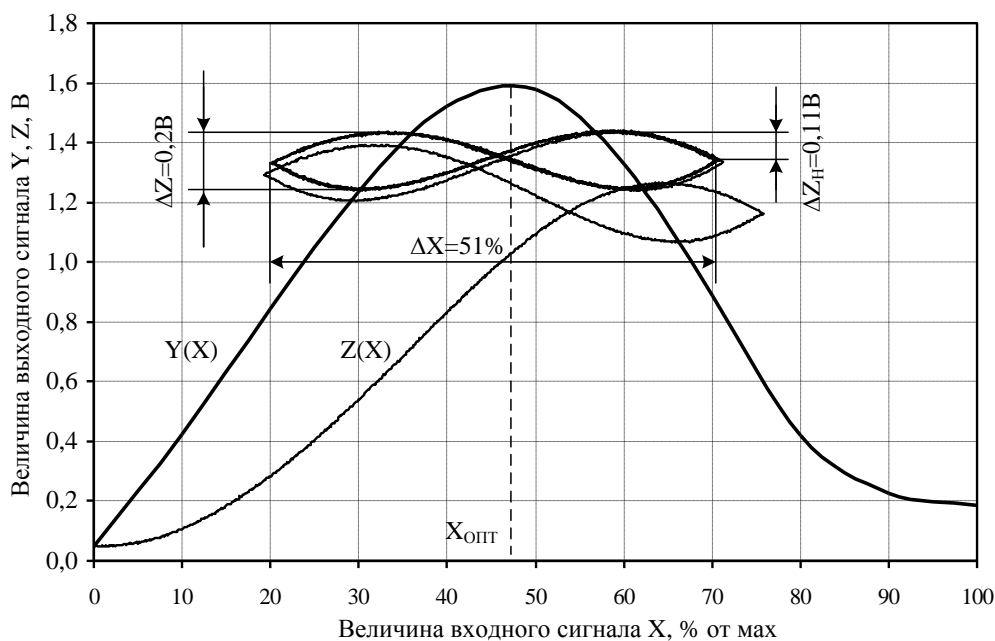


Рис.4. Окно с текстом макроса, реализующим алгоритм автоматической оптимизации



ΔZ_n - потери на поиск по выходу; ΔX - размах колебаний входного параметра;
 ΔZ - размах колебаний выходного параметра

Рис. 5. Фазовая траектория изменения выходного регулируемого параметра при работе системы автоматической оптимизации

2. **Андреев, С.М.** Оптимизация режимов управления нагревом заготовок в печах проходного типа: монография / С.М. Андреев, Б.Н. Парсункин. - Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. тех. ун-та им. Г.И. Носова, 2013. 376 с.
3. **Парсункин, Б. Н.** Синтез системы оптимального управления электрическим режимом сверхмощной дуговой сталеплавильной печи ДСП-180 / Б.Н. Парсункин, С.М. Андреев, Е.Н. Ишметьев, М.В. Усачев, Е.С. Михальченко, А.К. Наливкин // Мехатроника, автоматизация, управление. 2010. №8. С. 11-18.
4. **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.
5. **Парсункин, Б. Н.** Автоматизация и оптимизация управления выплавкой стали в электродуговых печах / Б.Н. Парсункин, С.М. Андреев, О.С. Логунова. - Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2012. 304 с.
6. **Ишметьев, Е.Н.** Автоматизация и оптимизация управления технологическими процессами внепечной доводки стали / Е.Н. Ишметьев, С.М. Андреев, Б.Н. Парсункин, З.Г. Салихов, У.Б. Ахметов. - Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2008. 311 с.
7. **Парсункин, Б.Н.** Оптимизация работы установки циркуляционного вакуумирования стали / Б.Н. Парсункин, С.М. Андреев // Вестник Магнитогорского гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова. 2010. №1. С.23-28.
8. **Парсункин, Б.Н.** Способы повышения эффективности и помехоустойчивости систем автоматической оптимизации управления технологическим процессом / Б.Н. Парсункин, С.М. Андреев // Автоматизированные технологии и производства. 2013. №5. С.277-290.
9. **Alexik, M.** Process models using hardware in simulation loop // Central European Journal of Computer Science. 2012. 2(3). P. 354-366. DOI: 10.2478/s13537-012-0025-5.
10. **Казакова, Т.В.** Физическая модель процесса для исследования работы систем экстремального регулирования / Т.В. Казакова // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. 2015. Т.2. №1. С.91-94.
11. **Бойко, В.В.** Мобильная измерительная лаборатория / В.В. Бойко, В.А. Лемешко // Промышленные измерения, контроль, автоматизация, диагностика. 2010. №1. 30-31.
12. **Рябчиков, М.Ю.** Системы диспетчерского управления в промышленности: учеб. пособие / М.Ю. Рябчиков, С.М. Андреев, Е.С. Рябчикова. - Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова. 2014. 281 с.
13. **Рябчиков, М.Ю.** Системы экстремального регулирования на основе комбинации поисковых оптимизационных алгоритмов / М.Ю. Рябчиков, Е.С. Рябчикова // Мехатроника, автоматизация, управление. 2015. Т.16. №5. С. 300-306.
14. **Рябчиков, М.Ю.** Оптимизация управления электрическими режимами работы дуговых сталеплавильных печей переменного тока с использованием прогнозирующей системы / М.Ю. Рябчиков, Б.Н. Парсункин, Е.С. Рябчикова // Автоматизация в промышленности. №11. 2014. №6. С. 46 - 50.
15. **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.
16. **Полько, П.Г.** Алгоритм нечеткого управления для синтеза цифровых контуров автоматической стабилизации технологических параметров / П.Г. Полько, О.С. Логунова, Е.С. Рябчикова, М.Ю. Рябчиков, С.М. Андреев, Б.Н. Парсункин // Автоматизация в промышленности. 2010. № 11. С. 32-37.

К ВОПРОСУ ОБ ЭВОЛЮЦИИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОПИСАНИЯ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ ТЕЛ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ ТРЕТЬЕГО РОДА

О.С. Логунова¹, Ю.А. Калугин², В.Е. Торчинский³

^{1,2,3}ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»,
г. Магнитогорск, Россия

EVOLUTION OF THE MATHEMATICAL MODEL TO DESCRIBE THE THERMAL STATE BODIES WHEN CHANGING THE BOUNDARY CONDITIONS OF THE THIRD KIND

O.S. Logunova¹, YU.A. Kalugin², V.E. Torchinskij³

^{1,2,3}Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

¹ logunova66@mail.ru

Аннотация. В работе изложены эволюционные шаги развития математической модели для описания теплового состояния бесконечно протяженного тела прямоугольного сечения. Указываются достоинства и недостатки псевдодинамических математических моделей, учитывающих передачу тепла в одном или двух направлениях в объеме трехмерного тела. Предложена 3D квазидинамическая модель для описания теплового состояния тела, устраняющая недостатки псевдо динамических моделей и учитывающая особенности технологических процессов, при которых происходит охлаждение/нагрев тела.

Ключевые слова: математическое моделирование, бесконечно протяженное тело, псевдодинамическая математическая модель, 3D квазидинамическая модель, нагрев и охлаждение тела.

Abstract. The paper considers the evolutionary steps of the mathematical model development to describe the thermal state of the infinitely extended body of rectangular cross section. The advantages and disadvantages of pseudo-dynamic models that take into account the transfer of heat in one or two directions in a three-dimensional volume of the body are specified. The quasi-dynamic 3D model is offered to describe the thermal state of the body, eliminate the disadvantages of pseudo dynamic models, and take into account the peculiarities of technological processes at which the cooling / heating of the body.

Keywords: mathematical modeling, infinitely extended body, pseudo-dynamic mathematical model, 3D quasi-dynamic model, heating and cooling of the body.

Теория теплопроводности в настоящее время находит широкое применение в решении технологических проблем, таких как идентификация теплового состояния тел, находящихся в рабочем пространстве агрегатов, работающих при нестационарном тепловом режиме, оценка на теплоустойчивости ограждающих конструкций в условиях переменных тепловых воздействий, температурные напряжения в мостах и многих других задачах, связанных с условиями нестационарной теплопроводности.

Развитие и применение теории теплопроводности в металлургической промышленности привело к появлению и развитию научных направлений, ключевыми особенностями которых является применение уравнения теплопроводности и граничных условий третьего рода для описания протекания тепловых процессов в многослойных бесконечно протяжённых телах произвольного сечения [1, 2]. В работах А.В. Лыкова [3, 4] положены основы применения и решения уравнения нестационарной теплопроводности с применением теории подобия для тел различной формы (неограниченное тело, полуограниченное тело, шар, неограниченный цилиндр, неограниченная пластина, параллелепипед, тела сложной конфигурации) такими методами, как: метод разделения переменных, операционные и интегральные преобразования Фурье и

Ханкеля. По мере развития теории теплопроводности исследователи отошли от предположения о плоской границе фаз, сводившего проблему к решению различных вариантов классической задачи Стефана аналитическими методами. Введение феномена двухфазной зоны сплава (работы В.Т. Борисова, Журавлёва В.А.) [5, 6] позволило построить более точные математические модели физико-химических процессов, сопутствующих затвердеванию сплава и формирующих его основные характеристики.

Важно принять во внимание то, что в обозначенных работах коэффициент теплоотдачи задаётся постоянным, что не позволяет построить адекватную математическую модель теплового состояния объектов (заготовок) в условиях перемещения по технологическим зонам (нагрев заготовок в методических печах, охлаждение заготовок в машинах непрерывной разливки и т.п.) с изменением граничных условий во времени и пространстве. Вместе с этим, наличие закрытого пространства, высоких температур окружающей среды в совокупности с конструкционной сложностью производственных агрегатов не позволяют применить методики динамического измерения теплопроводности, приведенных в работах М.Д. Белоусова и А.Л. Шестакова [7, 8].

Математическая модель для описания теплового состояния тел, находящихся в условиях нагрева или охлаждения, является основой при проектировании новых агрегатов [9, 10, 11], совершенствования режимов работы и технологий функционирующих систем [12] и построении интеллектуальных систем управления технологическими линиями [13]. Таким образом, до настоящего времени сохраняется актуальность проблемы построения адекватных математических моделей, описывающих тепловое состояние тела при динамическом изменении граничных условий третьего рода.

1. Эволюция псеводинамических математических моделей описания теплового состояния бесконечно протяженного тела прямоугольного сечения

В настоящее время исследователями используется два вида математических моделей для описания теплового состояния бесконечно протяженного тела с динамически изменяющимися граничными условиями третьего рода: одномерная математическая модель и двухмерная математическая модель. Неопределенность одного из геометрических размеров тела не позволяет использовать модели большей размерности в явном виде, которые бы позволили учесть перемещение тела по зонам охлаждения или нагрева, а также непрерывное добавление или уменьшение размеров этого тела.

1.1. Псеводинамическая одномерная математическая модель теплового состояния бесконечно протяженного тела

Согласно работе Самойловича Ю.А. [14], с увеличением соотношения сторон прямоугольного бесконечно протяженного тела влияние теплообмена через узкую грань на процесс затвердевания уменьшается, и при достаточно большом значении соотношения (для листовых непрерывных слитков) представляется возможным проводить расчеты процессов затвердевания и соответственно нагрева с использованием более простой, одномерной математической модели. Схема размещения расчетной области приведена на рис. 1.

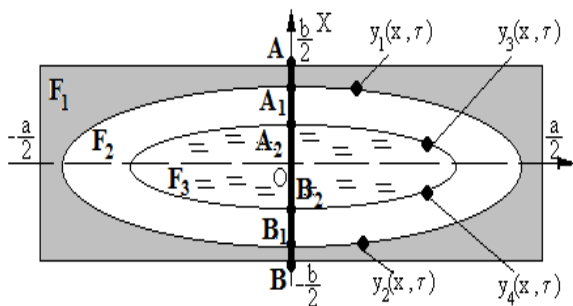


Рис. 1. Схема размещения расчетной области при использовании одномерно математической модели для описания теплового состояния тела

На рис. 1 введены обозначения: АВ – отрезок расчетной области при моделировании теплового состояния бесконечно протяженного тела; F₁, F₂, F₃ – области фазового состояния тела: твердого, двухфазного и жидкого (количество фаз определяется тепловым состоя-

нием тела и при охлаждении может составлять от 1 до 3, при нагреве чаще всего одна область F₁); A₁, A₂, B₁, B₂ – точки раздела фаз внутри расчетной области; a, b – геометрические размеры сечения тела, третье измерение считается неопределенным; функции y_i(x, τ) описывают во времени положение границ между фазами, фактически траекторию движения точек A₁, A₂, B₁, B₂.

Для указанной расчетной области отрезка АВ достаточно записать уравнение теплопроводности для одной пространственной и одной временной координаты в предположении, что перенос тепла осуществляется только теплопроводностью:

$$c(T)\rho(T)\frac{\partial T(x,\tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda(T)\frac{\partial T(x,\tau)}{\partial x}\right) \quad (1)$$

при $x \in \left(-\frac{b}{2}; \frac{b}{2}\right)$ с начальными условиями

$$T(x;0) = f(x) \text{ при } x \in \left(-\frac{b}{2}; \frac{b}{2}\right) \quad (2)$$

и граничными условиями первого рода в точках A₁, A₂, B₁, B₂ и третьего рода в точках А и В:

$$\begin{aligned} -\lambda_1 \frac{\partial T(x;\tau)}{\partial x} \Big|_{x=\frac{b}{2}} &= \alpha_1 \left(T_s(x;\tau) - T\left(\frac{b}{2};\tau\right) \right) \text{ и} \\ -\lambda_2 \frac{\partial T(x;\tau)}{\partial x} \Big|_{x=-\frac{b}{2}} &= \alpha_2 \left(T_s(x;\tau) - T\left(-\frac{b}{2};\tau\right) \right). \end{aligned} \quad (3)$$

При использовании одномерной математической модели фактически происходит идеализация процессов теплообмена и бесконечно протяженное тело заменяется бесконечно протяженной пластиной C₁C₂C₃C₄, которая располагается внутри тела (рис. 2). При этом учитывается перенос тепла только в одном направлении оси Х.

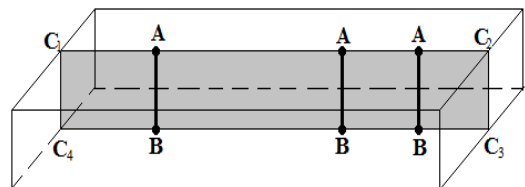


Рис. 2. Псеводинамическая модель бесконечно протяженного тела

Использование упрощенной псеводинамической модели для описания теплового состояния бесконечно протяженного тела позволяет сократить вычислительные ресурсы и использовать простые вычислительные методы и алгоритмы при реализации математической модели средствами ЭВМ, а также известные алгоритмы автоматического управления процессом охлаждения и нагрева телом [2, 12].

1.2. Псеводинамическая двухмерная математическая модель теплового состояния бесконечно протяженного тела

При рассмотрении технологических процессов, таких как нагрев заготовок в зональных методических

печах, охлаждение заготовок на машинах непрерывной разливки (т.е. тех процессов, в которых объекты перемещаются по технологическим зонам) невозможно построить адекватную математическую модель теплового состояния объектов, приняв значение коэффициента теплоотдачи постоянным и ограничившись псевдодинамической одномерной моделью. Поэтому в работе [1] предлагается расширить размерность математической модели. Предлагаемое расширение позволяет учитывать теплоперенос в двух направлениях по сечению тела, пренебрегая теплопереносом по его длине.

При построении псевдодинамической двухмерной математической модели теплового состояния бесконечно протяженного тела вводятся допущения:

- геометрические размеры тела таковы, что его длина во много раз превышает размеры поперечного сечения, поэтому она может быть представлена как бесконечный прямой параллелепипед с размерами поперечное сечение a и b (рис. 3);
- изменение температурных полей внутри тела происходит только за счет теплопроводности;
- скорость перемещения зафиксированного поперечного сечения достаточна для того, чтобы вдоль длины тела можно было бы пренебречь теплопереносом путем теплопроводности;
- охлаждение (нагрев) тела является несимметричным (рис. 3);
- начало отсчета для системы координат располагаем в геометрическом центре поперечного сечения тела в каждый рассматриваемый момент времени;
- скорость перемещения фиксированного сечения не является постоянно заданной величиной (рис. 3).

На рис. 3 введены обозначения: x, y – пространственные координаты для фиксированного сечения бесконечного тела, m ; τ – временная координата, c ; V – скорость движения фиксированного сечения тела, m/c ; a и b – геометрические размеры фиксированного сечения поперечного сечения тела, m ; $\alpha(x, y, \tau)$ – значение коэффициента теплоотдачи с поверхности тела, $Вт/(м^2 \cdot ^\circ C)$; индексы M, B, Y – обозначение граней тела.

Вид функции $\alpha(x, y, \tau)$ для граничных условий третьего рода определяется конструктивными особенностями агрегата.

Учитывая введенные допущения, можно выполнить формализацию задачи для описания теплового состояния тела как бесконечного прямоугольного параллелепипеда с динамически изменяющимися граничными условиями третьего рода.

Для описание теплового состояния тела используем уравнение [2]:

$$c(T)\rho(T)\frac{\partial T(x, y, \tau)}{\partial \tau} - \frac{L}{c(T)} \cdot \frac{\partial S(x, y, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(T) \frac{\partial T(x, y, \tau)}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda(T) \frac{\partial T(x, y, \tau)}{\partial y} \right), \quad (4)$$

где

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(T(x, y, \tau)) \frac{\partial T}{\partial x} \right) &= \frac{\partial \lambda(T(x, y, \tau))}{\partial x} \cdot \frac{\partial T(x, y, \tau)}{\partial x} + \\ &+ \lambda(T(x, y, \tau)) \frac{\partial^2 T(x, y, \tau)}{\partial x^2} = \\ &= \frac{\partial \lambda}{\partial T} \cdot \left(\frac{\partial T(x, y, \tau)}{\partial x} \right)^2 + \lambda(T(x, y, \tau)) \frac{\partial^2 T(x, y, \tau)}{\partial x^2}; \\ \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda(T(x, y, \tau)) \frac{\partial T(x, y, \tau)}{\partial y} \right) &= \frac{\partial \lambda(T(x, y, \tau))}{\partial y} \cdot \frac{\partial T(x, y, \tau)}{\partial y} + \\ &+ \lambda(T) \frac{\partial^2 T(x, y, \tau)}{\partial y^2} = \frac{\partial \lambda}{\partial T} \cdot \left(\frac{\partial T(x, y, \tau)}{\partial y} \right)^2 + \lambda(T) \frac{\partial^2 T(x, y, \tau)}{\partial y^2} \end{aligned}$$

при $y \in \left(-\frac{b}{2}, \frac{b}{2} \right), x \in \left(-\frac{a}{2}, \frac{a}{2} \right)$ и при выполнении начальных условий в виде известной функции для описания температурного поля по фиксированному поперечному сечению тела $T(x, y, 0) = f(x, y)$, получаемой, как правило, эмпирическим способом, и граничных условий третьего рода для каждой грани тела,

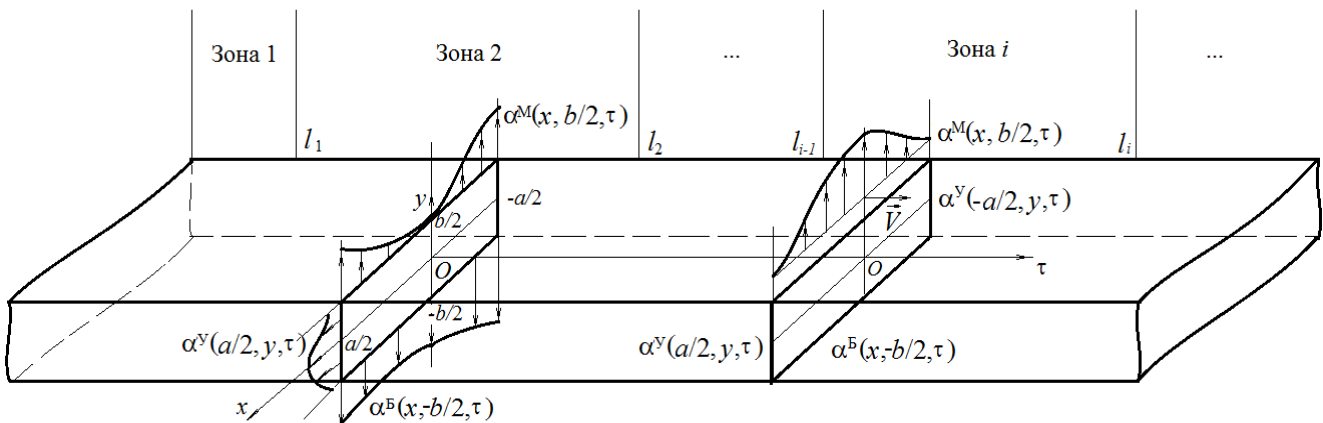


Рис. 3. Схема перемещения фиксированного сечения бесконечно протяженного тела во времени

обеспечивающих несимметричность ее охлаждения или нагрева:

$$\begin{aligned}
 -\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=\frac{b}{2}} &= \alpha^M \left(x, \frac{b}{2}, \tau \right) \left[T \left(x, \frac{b}{2}, \tau \right) - U_1(\tau) \right] + \\
 &+ \sigma \left[\frac{T^4 \left(x, \frac{b}{2}, \tau \right)}{100} - \frac{U_1^4(\tau)}{100} \right]; \\
 -\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=-\frac{b}{2}} &= \alpha^B \left(x, -\frac{b}{2}, \tau \right) \left[T \left(x, -\frac{b}{2}, \tau \right) - U_2(\tau) \right] + \\
 &+ \sigma \left[\frac{T^4 \left(x, -\frac{b}{2}, \tau \right)}{100} - \frac{U_2^4(\tau)}{100} \right]; \\
 -\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=\pm\frac{a}{2}} &= \alpha^Y \left(\pm \frac{a}{2}, y, \tau \right) \left[T \left(\pm \frac{a}{2}, y, \tau \right) - U_3(\tau) \right] + \\
 &+ \sigma \left[\frac{T^4 \left(\pm \frac{a}{2}, y, \tau \right)}{100} - \frac{U_3^4(\tau)}{100} \right].
 \end{aligned} \tag{5}$$

Для описания теплового состояния тела введены обозначения: $T(x, y, \tau)$ – температура тела в точке с координатами (x, y) в заданный момент времени τ , °C; $\rho(T)$ – плотность рассматриваемой материала, из которого изготавливается заготовка, как функция от температуры в данной точке, м³/кг; L – скрытая теплота кристаллизации, Дж/кг; S – сечение жидкой фазы; $\lambda(T)$ – функция изменения коэффициента теплопроводности, Вт/(м·°C); $c(T)$ – функция изменения коэффициента теплоемкости, Дж/(кг·°C); $U_i(\tau)$ – температура окружающей среды в текущий момент времени, °C; $\sigma = \varepsilon_{\text{пр}} \sigma_0$ – приведенный коэффициент излучения, соответствующий поверхности слитка, Вт/(м²·°C⁴); $\varepsilon_{\text{пр}}$ – степень черноты поверхности слитка; σ_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела. Зависимости $\rho(T)$, $\lambda(T)$ и $c(T)$ имеют эмпирическую природу и приведены в работах Маковского В.А.

Для определения функции для коэффициента теплоотдачи с поверхности тела примем функции в виде временного ряда со структурными изменениями, учитывающих переход зафиксированного сечения тела в заданную зону. Такие функции записываются соответственно для каждой поверхности тела.

Достоинства и недостатки каждой из приведенных псевдодинамических математических моделей приведены в табл. 1.

Таким образом, добавление размерности в псевдодинамической математической модели теплового состояния бесконечно протяженного тела позволила приблизить модельное решение к исследуемым процессам нагрева / охлаждения тел, в частности, наибольшие отличия, получены для периферийных угловых участков [1, 2]. Однако, остается нерешенной проблема учета теплопереноса по длине бесконечно протяженного тела при изменении его объема.

2. Эволюционный шаг математической модели теплового состояния бесконечно протяженного тела прямоугольного сечения

Для устранения псевдодинамики движения и изменения объема тела на третьем шаге эволюции математической модели теплового состояния бесконечно протяженного тела предлагается его дискретное представление в виде системы тел конечного объема, которые перемещаются вдоль оси Z . При этом образуются три консолидированных области Z_0, Z_{+1}, Z_{-1} (рис. 4). Область Z_0 определена для сегмента бесконечно протяженного тела, находящегося на технологической линии (охлаждения / нагрева) в момент времени τ_0 , причем протяженность этой области динамически изменяется в период нестационарного протекания основного производственного процесса (наращивания или сокращения длины тела). Область Z_{+1} определена для сегментов, поступающих в область нагрева / охлаждения с дискретным шагом. При поступлении сегмента объем тела наращивается. Область Z_{-1} определена для сегментов, выходящих из области нагрева / охлаждения с дискретным шагом.

Каждый дискретизированный элемент бесконечно протяженного тела представляет собой параллелепипед (или в общем случае любой произвольный цилиндр), из которых формируется полный объем тела.

Таблица 1

Результаты сравнительного анализа псевдодинамических математических моделей для описания теплового состояния бесконечно протяженного тела

Название математической модели	Достоинства математической модели	Недостатки математической модели
Псевдодинамическая одномерная математическая модель	1. Возможность учета несимметричности нагрева / охлаждения. 2. Простота методов реализации математической модели в виде программного продукта и визуализации результатов.	1. Замена объемного тела плоской областью по его геометрическому центру. 2. Учет теплопереноса в одном направлении.
Псевдодинамическая двухмерная математическая модель	1. Возможность учета несимметричности нагрева / охлаждения по четырем граням тела. 2. Протяженность тела ограничивается временем расчета.	1. Не учитывается теплоперенос по длине тела. 2. Не рассматривается процесс добавления и удаления объема для тела.

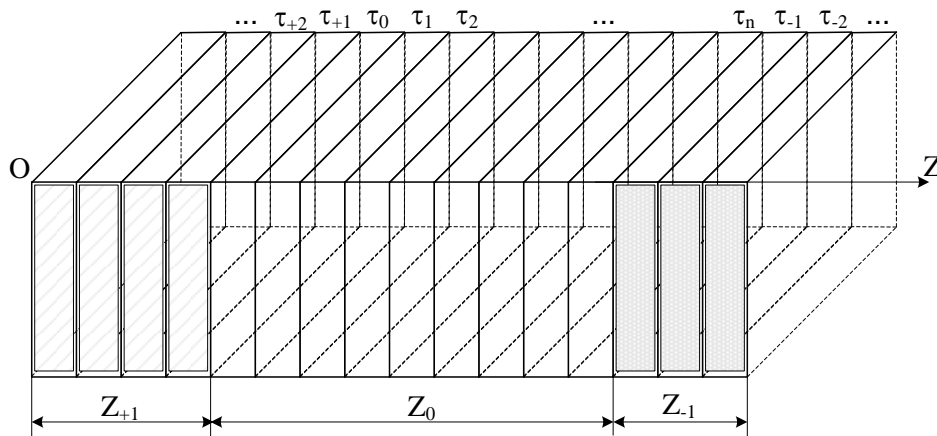


Рис. 4. Структура и схема перемещения фиксированного 3D сечения бесконечно протяженного тела во времени

Для описания теплового состояния каждого объемного элемента используется уравнение теплопроводности для трех пространственных координат:

$$\begin{aligned}
 c(T)\rho(T) \frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} - \frac{L}{c(T)} \cdot \frac{\partial \mathcal{D}(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} = \\
 = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(T) \frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial x} \right) + \\
 + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda(T) \frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda(T) \frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial z} \right).
 \end{aligned} \quad (6)$$

Граничные условия задаются для каждого i -ого сегмента, составляющего объем всего тела (рис. 5).

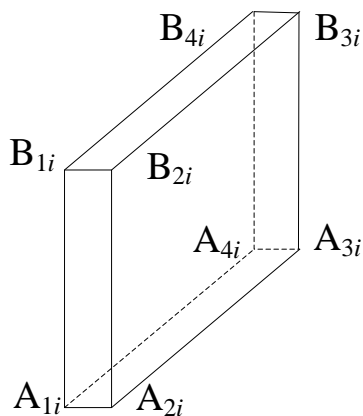


Рис. 5. Сегмент i -ого слоя бесконечно протяженного тела

Для граней $A_{1i}A_{2i}A_{3i}A_{4i}$, $B_{1i}B_{2i}B_{3i}B_{4i}$, $A_{1i}A_{2i}B_{2i}B_{1i}$ и $A_{3i}A_{4i}B_{4i}B_{3i}$ задаются граничные условия третьего рода, определяющие теплоотдачу с основной поверхности бесконечно протяженного тела. Для поверхности $A_{1i}A_{4i}B_{4i}B_{1i}$ задается граничное условие третьего рода для каждой точки. Для начального момента времени поле распределения температур задается на основе эмпирических данных, для каждого последующего момента времени по результатам расчета на предыдущем сегменте. Граница поверхности $A_{2i}A_{3i}B_{3i}B_{4i}$ является открытой.

Заключение

Развитие математической модели бесконечно протяженного тела происходит в реальном времени и каждый шаг эволюции преследует цель наибольшего охвата особенностей реальных процессов охлаждения или нагрева. При моделировании тепловых процессов для тел, изменяющих в пространстве и времени объем, существует проблема учета теплопередачи во всех трех пространственных направлениях. В работе предлагается третий эволюционный шаг, позволяющий учесть движение тела, изменение объема тела и теплопередачу в трех пространственных направлениях – 3D квазидинамическая математическая модель.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Логунова, О.С.** Моделирование теплового состояния бесконечно протяженного тела с учетом динамически изменяющихся граничных условий третьего рода [Текст] / О.С. Логунова, И.И. Мацко, Д.С. Сафонов // Вестник Южно-Уральского гос. ун-та. Серия: Математ. моделирование и программирование. – 2012. – № 27. – С. 74-85.
2. **Логунова, О.С.** Математическое моделирование макроскопических параметров затвердевания непрерывных слитков / О.С. Логунова, Д.Х. Девятов, И.М. Ячиков // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 1997. – №2. – С. 49-51.
3. **Лыков, А.В.** Теория теплопроводности: Учебн. пособие для вузов / А.В. Лыков. – М.: Высшая школа, 1952. – 600 с.
4. **Лыков, А.В.** Тепло- и массообмен при фазовых и химических превращениях / А.В. Лыков // Тепло- и массообмен в процессах испарения / Отв. ред. А. В. Лыков. – М.: Изд-во АН СССР, 1958. – С. 7-14.
5. **Борисов, В.Т.** Теория двухфазной зоны металлического слитка / В.Т. Борисов. – М.: Металлургия, 1987. – 224 с.
6. **Журавлёв, В.А.** Динамика двухфазной зоны металлических сплавов с химическими реакциями / В.А. Журавлёв, В.М. Колодкин, В.В. Васькин // Изв. АН СССР. Серия: Металлы. 1983. Т.4. №4. С. 64-68.

7. **Шестаков, А.Л.** Новый подход к измерению динамически искаженных сигналов / А.Л. Шестаков, Г.А. Свиридюк // Вестн. Юж.-Урал. гос. ун-та. Серия: Математическое моделирование и программирование. – 2010. – №16 (192), вып. 5. – С. 116–120.
8. **Белоусов, М.Д.** Метод самодиагностики термопреобразователя сопротивления в процессе работы / М.Д. Белоусов, А.Л. Шестаков // Вестн. Юж.-Урал. гос. ун-та. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2009. – №3. – С. 17–19.
9. **Сафонов, Д.С.** Автоматизация проектирования конструкции секций вторичного охлаждения машины непрерывного литья заготовок / Д.С. Сафонов, О.С. Логунова // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2015. – № 1. – С. 110 – 125.
10. **Сафонов, Д.С.** Структура интерактивной системы автоматизированного проектирования конструкции секций вторичного охлаждения машины непрерывного литья заготовок / Д.С. Сафонов, О.С. Логунова // Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах. – 2014. – №2(5). – С. 75-81.
11. **Тутарова, В.Д.** Выбор рациональной схемы расстановки форсунок в зоне вторичного охлаждения МНЛЗ / В.Д. Тутарова, Д.С. Сафонов // Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах. – 2013. – №1(3). – С. 76-81.
12. **Parsunkin, V.N.** Energy-saving optimal control overheating of continuous cast billets / V.N.Parsunkin, S.M.Andreev, O.S.Logunova, T.U. Akhmetov // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2015. – V. 79. – Iss.9-12. – Pp. 1797-1803. DOI:10.1007/s00170-015-6934-4.
13. **Logunova, O.S.** Automatic system for intelligent support of continuous cast billet production control processes [Текст] / O.S.Logunova, I.I.Matsko, I.A.Posohov, S.I.Luk'ynov // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2014. – V. 74.– Issue 9. – P. 1407 – 1418. DOI:10.1007/s00170-014-6056-4.
14. **Самойлович, Ю.А.** Применение математических моделей для исследования процессов затвердевания и охлаждения непрерывных стальных слитков прямоугольного поперечного сечения / Ю.А. Самойлович и др. // Непрерывная разливка стали: сб. науч. тр.– М.: Металлургия, 1974. – 314 с.

МОДЕЛЬ МОНИТОРИНГА ЭКСПЛУАТАЦИИ ИЗДЕЛИЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ

В.Б. Кузнецова¹, А.И. Сергеев², Д.В. Кондусов³

^{1,2}ФГБОУ ВПО «Оренбургский государственный университет», г. Оренбург, Россия

³АО «ПО «Стрела», г. Оренбург, Россия

THE MODEL OF MONITORING OPERATION ENGINEERING PRODUCTS

V.B. Kuznetsova¹, A.I. Sergeev², D.V. Kondusov³

^{1,2}Orenburg State University, Orenburg, Russia

³Joint-Stock Company Association «Strela», Orenburg, Russia

¹valyosha@list.ru

Аннотация. Предложена модель мониторинга изделия в процессе эксплуатации по технологии анализа логистической поддержки. Актуальность построения данной модели обусловлена необходимостью разработки и использования технологии обеспечивающей создание и внедрение эффективных автоматизированных систем мониторинга, позволяющих своевременно обнаруживать и оперативно передавать разработчику и производителю изменение состояния изделий, которое может привести к их поломке/отказу и повлечь материальные потери.

Ключевые слова: интегрированная логистическая поддержка (ИЛП), единое информационное пространство, мониторинг эксплуатации изделия, PDM-система, PLM-система.

Abstract. A model of monitoring the product in the operation of technology logistics support analysis is offered. The urgency of the construction of this model is due to the need for development and use of technology providing the creation and implementation of effective automated monitoring systems to enable timely detection and promptly transmit the developer and manufacturer of state change of products, which can lead to damage / failure and entail the material losses.

Keywords: Integrated Logistics Support (ILS), a unified information space, monitoring of the product operation, PDM-system, PLM-system, electronic document flow.

Роль мониторинга эксплуатации заключается в получении фактических данных об изделии и процессе технической эксплуатации. Обеспечение данной информацией происходит посредством статистической обработки, анализа данных о наработке изделия, о надежности (безотказности, долговечности), эксплуатационной и ремонтной технологичности, трудоемкости и продолжительности работ технического обслуживания, о суммарных затратах на данные мероприятия и т.д. Сложившаяся геополитическая ситуация является немаловажным аспектом в создании отечественной разработки в данном сегменте [4, 6].

Объектами мониторинга являются:

- изделие и его составные части;
- технологические процессы технического обслуживания и элементы системы технической эксплуатации (СТЭ).

Полученные сведения должны обеспечить обоснование решений по изменению конструкции изделия, организации системы технической эксплуатации и планов ИЛП.

Мониторинг обеспечивает обратную связь в системе интегрированной логистической поддержки, что позволяет корректировать параметры системы технической эксплуатации на основе решения задач АЛП с уточненными исходными данными (на основе актуализированной базы данных АЛП) [7, 8, 9].

Комплексный сбор корректных и достоверных данных возможен только при согласованной работе разработчика, производителя, эксплуататора и организа-

ции, осуществляющей техническое обслуживание.

Данные аккумулируются в PLM-системе. Важное значение имеет стандартизация документов технических электронных и способов информационного взаимодействия систем поддержки жизненного цикла изделия.

Современные требования к процессу мониторинга эксплуатации изделий машиностроения становятся более жесткими и обязательными. Результаты и информация, полученные в ходе мониторинга, учитываются в совокупности при принятии решений по вопросам конкурентоспособности изделия (повышения качества изделия, снижения затрат на эксплуатацию). Одним из основополагающих аспектов является мониторинг текущего состояния изделия на этапе эксплуатации. Практика контроля текущего состояния на этапе эксплуатации активно развивается, но четко разработанной и отработанной методологии мониторинга нет.

Целью разработки методологии мониторинга эксплуатации является сокращение затрат на техническое обслуживание и ремонт изделий и его составных частей посредством повышения качества изделия на этапах проектирования [2, 3].

Система мониторинга эксплуатации обеспечивает поддержку решения следующих задач:

- оценка в режиме реального времени вероятностных показателей поломок/отказов изделия или его составных частей в различных состояниях и для различных типов исходных событий;
- определение наиболее критичных эксплуатационных

процедур с точки зрения их затрат и подготовка рекомендаций по их совершенствованию;

- анализ и ранжирование по значимости событий – «предшественников поломок/отказов» с целью принятия дополнительных мер к наиболее критичным событиям;
- обоснование перед проектировщиком и изготовителем изменений в технических решениях и регламенте эксплуатации изделия и его составных частей;
- ранжирование по значимости эксплуатационных процедур и используемого в ТО оборудования с целью совершенствования ТОиР;
- обеспечение хранения баз данных.

Для проведения мониторинга эксплуатации необходимо соответствующее программное обеспечение – система мониторинга эксплуатации (СМЭ). СМЭ представляет собой компьютерную программу, которая аккумулирует сведения о режимах эксплуатации и конфигураций изделий, существующие в текущий момент времени, с целью оперативного определения состояния изделия. Состояние изделия обычно характеризуется значением вероятности выхода из строя изделия или его составных частей. Конфигурация изделия подразумевает вариант исполнения изделия, а также состояние всех составных частей важных в том числе и для безопасности (работа по назначению, режим ожидания, испытания, ремонт или техническое обслуживание).

Программное обеспечение СМЭ имеет следующие характерные особенности:

- автоматическая передача данных в СМЭ от сервисных центров;
- наличие встроенной базы данных по истории эксплуатации, технологическим схемам и другой информации, которая позволяет использовать СМЭ в справочных целях.

СМЭ предназначена для непрерывного контроля изменения при эксплуатации такого интегрального показателя как коэффициент готовности, связанного с поломками и отказами изделия или нарушениями нормальной эксплуатации.

Рассмотрим предлагаемый состав модели мониторинга эксплуатации изделий (рисунок 1), в которую входят следующие модули:

- а) основной модуль, в котором происходит подготовка изделия к мониторингу, мониторинг в режиме реального времени, планирование графиков ТОиР, информирование;
- б) модуль расчета эксплуатационных затрат и затрат на ТОиР;
- в) программа управления правами доступа – позволяет разграничить права пользователей ПК;
- г) генератор отчетов – предназначен для формирования отчетов по данным и логическим моделям, хранящимся в базе данных СМЭ;
- д) сервер приложений, осуществляющий связь системы мониторинга эксплуатации и обмен информацией с информационно-поисковой системой и системой планирования технического обслуживания и ремонта[1].

Система мониторинга эксплуатации построена на базе архитектуры «клиент-сервер» с использованием единой администрируемой базы данных с разграничени-

ем прав пользователей на внесение изменений. В качестве СУБД используется SQL Server 2014, упрощенная схема модели мониторинга эксплуатации показана на рисунке 1.

Система мониторинга эксплуатации взаимосвязана с системой планирования технического обслуживания и ремонта, информационно-поисковой системой и системой учета затрат на эксплуатацию и ТОиР. Связь между СМЭ и данными системами осуществляется с помощью специальной программы – сервера приложений.

Таким образом, разработка модели мониторинга эксплуатации изделий машиностроения, отвечающей вышеуказанным требованиям, позволяет:

- выполнять оценку вероятностных показателей эксплуатации для различных исходных событий;
- определять допустимое время существования определенных состояний изделия, обусловленных выводом оборудования в ремонт или на техническое обслуживание;
- разрабатывать графики технического обслуживания и ремонта оборудования на базе информации от ТОиР;
- выполнять прогнозные оценки для случаев отказа оборудования и нарушений нормальной эксплуатации;
- получать из системы технического обслуживания и ремонта информацию о текущем состоянии изделия и передавать разработчику и производителю сведения о предстоящей замене комплектующих изделия;
- накапливать в базе данных эксплуатационную документацию по изделию для оперативного использования;
- разрабатывать отчетную документацию, содержащую информацию об изделии в процессе эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Бахметьев, А.М.** Развитие риск-информированных технологий для поддержки эксплуатации атомных станций / А.М. Бахметьев, И.А. Былов, Л.В. Абрамов // Научно-технический вестник Поволжья. – Казань. – 2014. – № 3. – С. 63-65.
2. **Кузнецова, В.Б.** Методика внедрения электронного документооборота при производстве сложной авиационной техники / Кузнецова В.Б., Сергеев А.И. // Электронный журнал «Труды МАИ». – 2014 – № 74. – <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=49379>.
3. **Кузнецова, В.Б.** Особенности применения информационных технологий в управлении персоналом машиностроительных предприятий / Кузнецова В.Б. // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2014. – № 8. – С. 29-32.
4. **Кузнецова, В.Б.** Теоретическое обоснование обеспечения технико-экономической готовности изделий сложной авиационной техники / Кузнецова В.Б. // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2014. – № 14. – С. 32-36.
5. **Кондусов, Д.В.** Технология безбумажного выпуска документов материально-технического обеспечения машиностроительного предприятия / Кондусов Д.В., Кузнецова В.Б., Сердюк А.И., Сергеев А.И. // Автоматизированные технологии и производства. – 2015. – № 1 (7). – С. 50-54.

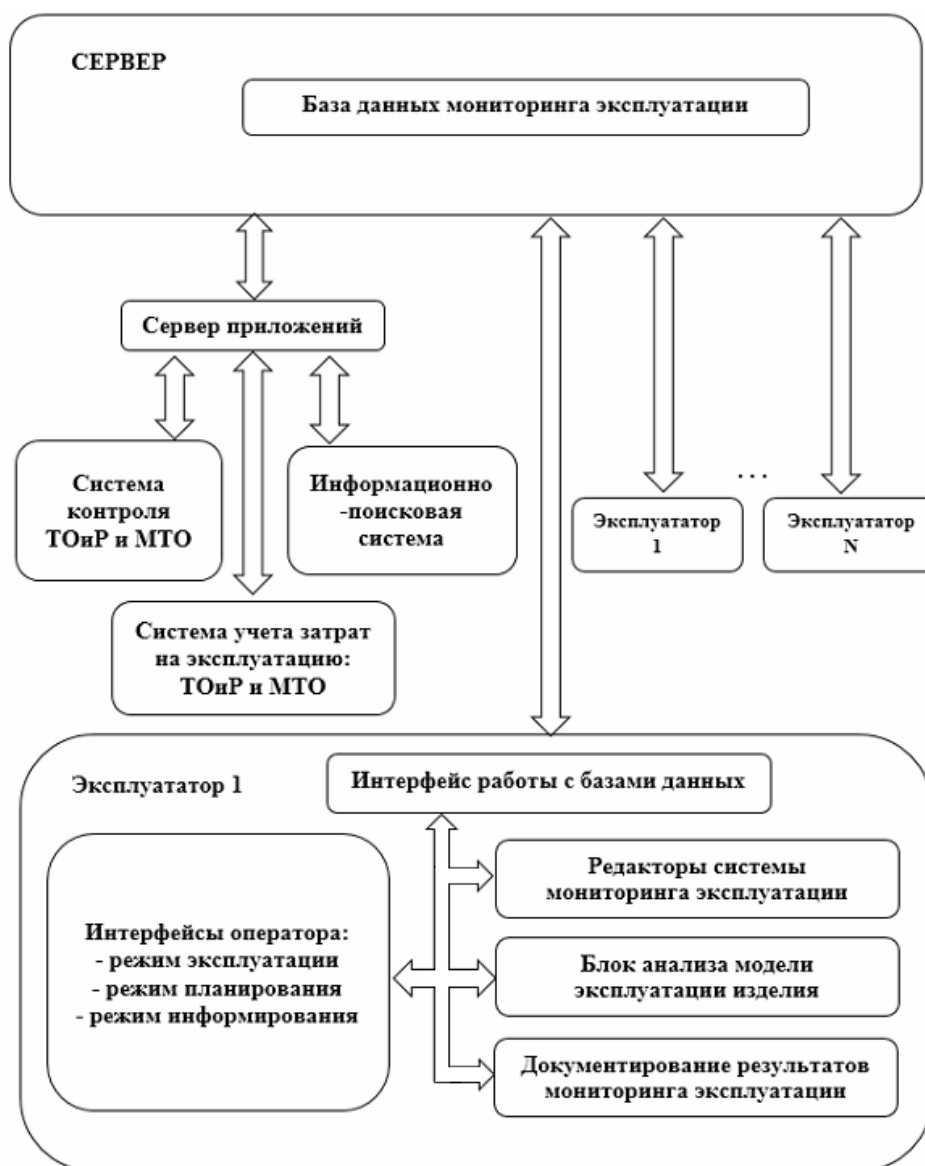


Рис. 1. Схема модели мониторинга эксплуатации [1, 5]

6. Сердюк, А.И. Совершенствование процесса изготовления сложных изделий с использованием PDM-систем на ОАО «ПО «Стрела» / А. И. Сердюк, В. Б. Кузнецова, А. И. Сергеев, А. В. Попов // Научно-технический журнал «Информационные технологии» – 2013. – № 4 (152). – С. 54-61.
7. Судов, Е.В. Интегрированная информационная поддержка жизненного цикла машиностроительной продукции. Принципы. Технологии. Методы. Модели. / Е.В. Судов // М.: ООО Издательский дом «МВМ», 2003. – 264 с.
8. Судов, Е.В. Анализ логистической поддержки: теория и практика / Е.В. Судов, А.И. Левин, А.Н. Петров, А.В. Петров, Д.Н. Борозин – М.: ООО Издательство «Инфом-бюро», 2014. – 260 с.
9. Судов, Е. В. Концепция развития CALS-технологий в промышленности России / Е. В. Судов, А. И. Левин. – М. : НИЦ CALS- технологий «Прикладная логистика», 2002. – 131 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УГЛА ОСВЕЩЕНИЯ НА КАЧЕСТВО ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОНТУРОВ ЗЕРЕН ЩЕБНЯ, РАСПОЛОЖЕННЫХ В НЕСКОЛЬКО СЛОЕВ

М.Ю. Рябчиков¹, Р.Э. Бурнашев², Е.С. Рябчикова³, Н.В. Богданов⁴, А.И. Сунаргулова⁵
^{1,2,3,4,5} ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет
им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия

RESEARCH OF ENTRANCE ANGLE INFLUENCE ON QUALITY OF CRUSHED STONE'S CONTOURS ESTIMATION, WHICH FALL INTO RANDOM ORDER

M.Yu. Ryabchikov¹, R.Je. Burnashev², E.S. Ryabchikova³, N.V. Bogdanov⁴, A.I. Sunargulova⁵
^{1,2,3,4,5} Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

¹mr_mgn@mail.ru

Аннотация. В данной статье рассматривается влияние угла падения света на качество определения контуров зерен щебня, лежащих в несколько слоев. В ходе проделанной работы был поставлен эксперимент, позволяющий качественно оценить изменения изображения камней при разных углах освещения, и влияние этих изменений на определение контуров зерен.

Ключевые слова: лещадность; анализ изображения; определение контуров; центробежные дробилки; анализ свойств материалов в потоке.

Abstract. In this paper researches influence of entrance angle on quality of crushed stone's contours estimation, which fall into random order. In this work had been realized the experiment, which allows to make qualitative evaluation of crushed stone's image variances for different entrance angles and influence of this variances on crushed stone's contours estimation.

Keywords: flakiness; image processing; contours estimation; centrifugal crushers; in-flow analysis of material parameters.

В связи с появлением дробилок центробежно-ударного типа действия при производстве строительного щебня возникла потребность управлять основным качественным показателем формы щебня по ГОСТ – лещадностью [1]. Лещадность – это содержание зерен, у которых соотношение наибольшего линейного размера к наименьшему более, чем 3:1. В зависимости от значения лещадности щебень делится на четыре группы. Чем меньше лещадность, тем выше качество щебня и, соответственно, его стоимость.

Однако, чтобы управлять лещадностью, необходимо оперативно ее измерять, а это является серьезной проблемой, потому что на данный момент лещадность измеряется только вручную с помощью штангенциркуля или специального шаблона. Одним из способов автоматизации контроля лещадности является определение геометрических параметров зерен щебня по их цифровому изображению.

Обработка изображения щебня, лежащего в несколько слоев, осложняется тем, что на границах зерен нет больших значений градиента яркости. Это существенно осложняет работу алгоритмов поиска контуров, а также алгоритма водораздела. Настройка алгоритма поиска контуров на низкие пороговые значения зачастую приводит к тому, что неоднородности поверхности камней распознаются как границы. При этом качество

определения реальных границ все равно остается невысоким. Алгоритм водораздела также подвержен влиянию отсутствия ярко выраженного градиента яркости: многие области сливаются в одну, что приводит к потере зерен. Также в виду небольшого изменения яркости на границах, алгоритм нередко устанавливает границу неверно.

Данный факт приводит к ошибке в определении геометрических параметров зерен. В качестве одного из вариантов увеличения градиента яркости на границах камней можно использовать изменение угла освещения. В данной работе описывается эксперимент, суть которого заключается в изменении угла падения света на зерна щебня, лежащие в несколько слоев, при получении изображения, и анализа влияния угла освещения на результат обработки изображения.

Идея эксперимента заключается в том, чтобы затенить нижние слои камней и тем самым выделить поверхностный слой. Это позволит с помощью освещения увеличить градиент яркости на границах камней верхнего слоя и, соответственно, повысить качество определения контуров этих камней.

Для проведения эксперимента использовались четыре лампы, которые устанавливались на различной высоте. Схема расположения ламп представлена на рис. 1.

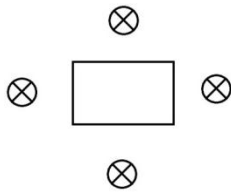


Рис. 1. Расположение ламп

При изменении высоты угол наклона лампы устанавливался таким образом, чтобы она была направлена в центр фотографируемого материала.

Паспорт эксперимента приведен в табл.1.

Таблица 1

Паспорт эксперимента

№ опыта	L, м	H, м	Угол, град
1	0,5	0,05	5,72
2	0,5	0,10	11,32
3	0,5	0,15	16,70
4	0,5	0,20	21,81
5	0,5	0,25	26,58
6	0,5	0,30	30,97
7	0,5	0,35	35,00
8	0,5	0,40	38,66
9	0,5	0,45	41,99
10	0,5	0,50	45,00
11	0,5	0,55	47,74
12	0,5	0,60	50,20

Из полученных изображений были отобраны три изображения: с минимальным углом падения света, с максимальным, и углом 42 градуса (рис.2).

В результате визуального анализа были выделены наиболее отчетливые контуры камней. Критериями отбора были выбраны: отсутствие теней на контуре камня; отчетливо видимая граница, отсутствие явного перекрытия другими камнями.

В результате на первом изображении было выделено три контура, на втором – восемь, а на третьем – девять. В результате обработки найдены параметры указанных контуров. Результаты обработки изображения со средним углом освещения представлены на рис.3.

По результатам эксперимента можно сделать следующие выводы: изменение угла падения света сильно влияет на изображение, что может быть использовано для затенения нижних слоев камней и создания большего градиента яркости на границах камней верхнего слоя. В ходе работы возникли идеи для создания алгоритмов автоматической фильтрации контуров с помощью анализа затененных изображений. Данные идеи находятся в стадии реализации.

Также в ходе анализа представленных и других изображений было выявлено, что при значении угла падения света в диапазоне от 35 до 45 градусов наблюдается положительный эффект затенения, который способствует улучшению определения контуров.

Таким образом, в результате данной работы было определено направление для дальнейшего совершенствования алгоритма оценки формы контуров зерен щебня по их изображению.

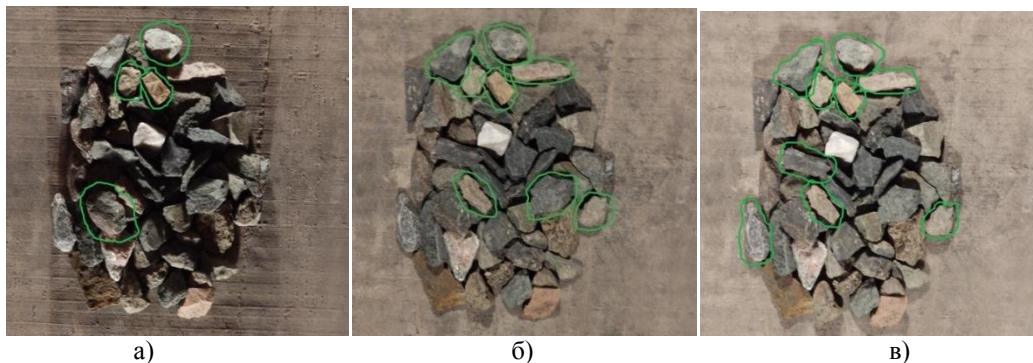


Рис.2. Изображения, полученные при углах освещения 5,72 (а), 50,2 (б) и 41,99 (в) градусов

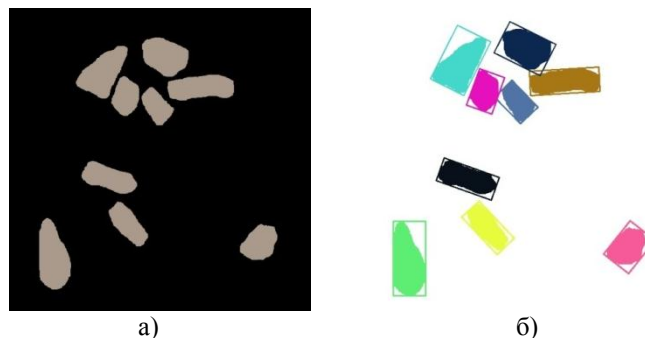


Рис.3. Маска маркеров контуров (а) и найденные контуры (б) для изображения с углом освещения 41,99 градусов. Среднее значение отношения большей стороны к меньшей для найденных контуров составило 1,914

ЛИТЕРАТУРА

1. **Шапиро, Л.** Компьютерное зрение [Текст] / Л. Шапиро, Дж. Стокман. // пер. с англ. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. – 752с.
2. **Руководство OpenCVRefman** (Release 2.4.9.0) – OpenCV, 2014г. – 913с.
3. **OpenCV шаг за шагом.** – Режим доступа: gocraft.ru/blog/computervision.
4. **Бурнашев, Р.Э.** Изучение возможных подходов к управлению дробилками центробежного типа производства ЗАО «УРАЛ-ОМЕГА» с учетом качества получаемого продукта / Р.Э. Бурнашев, М.Ю. Рябчиков, В.В. Гребенникова, Е.С. Рябчикова // Вестник магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2015. № 1. С. 82-89.
5. **Евстигнеев, В.Л.** Постановка задачи оптимизации многостадийного дробления / В.Л. Евстигнеев // Автоматизированные технологии и производства. 2013. №5. С. 263-270.
6. **Бурнашев, Р.Э.** Алгоритмическое обеспечение системы контроля и управления лещадностью продуктов дробления / Р.Э. Бурнашев, М.Ю. Рябчиков, Автоматизированные технологии и производства. №1(7). 2015. С. 4-8.

АДАПТИВНАЯ СИСТЕМА ЛОКАЛЬНОГО УРОВНЯ УПРАВЛЕНИЯ В АСУТП ПРОМЫШЛЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА

Парсункин Б.Н.¹, Андреев С.М.², Ахметова А.У.³

^{1,2,3}ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»,
г. Магнитогорск, Россия.

ADAPTIVE SYSTEM OF LOCAL LEVEL OF MANAGEMENT IN THE AUTOMATION OF CONTROL SYSTEMS OF TECHNICAL PROCESSES OF INDUSTRIAL PRODUCTION

Parsunkin B.N.¹, Andreyev S.M.², Akhmetova A.U.³

^{1,2,3}Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

³Lbp40032@yandex.ru

Аннотация. Перспективным и экономически целесообразным направлением использования современных вычислительных технических средств АСУТП является применение свободно программируемых микропроцессорных регулирующих контроллеров (МРК). Такие устройства позволяют создавать адаптивные или самонастраивающиеся локальные автоматизированные системы, способные практически без вмешательства человека само приспособляться к автоматизируемому технологическому процессу (объекту управления) в различных отраслях промышленного производства.

Ключевые слова: микропроцессорные регулирующие контроллеры, автоматизированные системы, технологический процесс, промышленное производство.

Abstract. Perspective and economically expedient direction of use of modern computing technical means of the PCS is use of freely programmable microprocessor regulating controllers (MRC). Such devices allow to create adaptive or the automated systems capable which are self-adjusted local practically without intervention of the person itself to adapt to the automated technological process (object of management) in various branches of industrial production.

Keywords: the microprocessor regulating controllers, the automated systems, technological process, industrial production.

Введение

Методика синтеза адаптивной системы локального или полевого уровня управления в составе иерархической АСУТП рассмотрена на конкретном примере создания системы управления тепловым режимом многозонной методической печи, предназначенной для нагрева массивных непрерывнолитых слябовых заготовок перед прокаткой на высокопроизводительном листопрокатном широкополосном стане горячей прокатки (ШСП).

Программное обеспечение адаптивной системы включает в себя неизменяемую управляющую программу «КООРДИНАТОР», функционирующую в режиме разделения времени, и варьруемый в зависимости от свойств объекта управления блок исходных данных.

Управляющая программа в зависимости от выбранного режима управляет работой отдельных подпрограмм осуществляющих реализацию следующих функций.

Подпрограмма «КОНФИГУРАЦИЯ СИСТЕМЫ» осуществляет формирование отдельных локальных контуров управления технологическими параметрами путем назначения цифровых кодов входных выходных информационных и управляющих параметров в соот-

ветствии с принятыми наименованиями параметров и назначение кодов команд управления соответственно выбранного исполнительного механизма (ИМ).

Подпрограмма «ГРАДУИРОВКА» осуществляет адаптацию управляющего МРК к информационной структуре, используемой на автоматизированном технологическом агрегате с целью получения достоверной оперативной информации о текущем состоянии управляемого процесса путем формирования градуировочных реальных характеристик по каждому информационному каналу за счет приведения в соответствие текущих величин: «ФИЗИЧЕСКАЯ ВЕЛИЧИНА ПАРАМЕТРА – КОД АЦП».

Подпрограмма «НАСТРОЙКА» обеспечивает адаптацию МРК к технологическому объекту или каждого локального стабилизирующего контура управления путем выполнения следующих процедур:

1. Формирование и реализацию плана тестирующих возмущающих воздействий с целью обеспечения определения достоверной результирующей переходной характеристики объекта управления по каждому контуру управления.

2. Определение динамических параметров объекта управления по результирующей переходной характеристике (кривой разгона) по каждому регулируемому параметру.
3. Формирование цифрового аналога ПИ или ПИД законов управления и определение оптимальных значений параметров динамической настройки каждого контура управления, гарантирующих устойчивый процесс управления.
4. Расчет сигналов рассогласования и управляющих воздействий с учетом выбранного закона управления и выдачи управляющих воздействий с учетом реальной скорости перемещения регулирующего органа по каждому контуру управления.

Подпрограмма «ИНДИКАЦИЯ» реализует процедуры визуализации на экране монитора автоматизированного рабочего места (АРМ) технолога оператора текущих значений основных технологических параметров автоматизируемого процесса и самодиагностики и проверки достоверности получаемой с объекта управления текущей информации.

Вызов подпрограмм осуществляется по сигналам прерываний от таймера с АРМ.

В следствии инерционности реальных исполнительных механизмов (ИМ), которые не реагируют на управляющие импульсы продолжительностью меньше $0,1 \div 0,15$ с расчет ходов ИМ осуществляется с учетом данного обстоятельства при 16-ричной форме представления чисел по всем каналам, поэтому расчет управляющих воздействий по 12 контурам управления осуществляется за $0,5 \div 0,7$ с.

Идентификация динамических свойств при адаптации МРК к технологическому объекту управления

Задача идентификации динамических свойств объекта управления по каждому каналу управления, требующая высокой квалификации, решается программно самой управляющей системой при функционировании подпрограммы «НАСТРОЙКА».

Различные технологические и организационные возмущения [8-10] являются причиной значительных ошибок в определении динамических параметров объектов управления.

Наиболее целесообразно в таких условиях использовать активный метод подачи на вход контура управляемого технологического параметра идентифицирующих (тестирующих) возмущающих планку воздействий, позволяющий компенсировать негативное влияние возмущений на достоверность оценок динамических параметров.

В качестве тестирующих воздействий обычно используются однократные скачкообразные возмущения [1] в виде последовательности псевдослучайных импульсов.

По реакции технологического параметра на тестирующие воздействия (переходным характеристикам) определяются динамические количественные показатели, которые являются исходными данными для расчета динамических параметров настройки контуров управления исследуемых технологических параметров автоматизируемого процесса.

Использование предлагаемого метода адаптации МРК приведено для управления инерционным с запаздыванием технологическим параметром, динамические свойства которого идентифицированы передающей функцией вида [1]:

$$W(p) = K_{об} \cdot e^{-\tau_3} / (T_0 \cdot p + 1), \quad (1)$$

где $K_{об}$ – коэффициент передачи объекта; T_0 – постоянная времени, характеризующая инерционные свойства управляемого технологического параметра; τ_3 – время запаздывания в локальном контуре при передаче управляющего воздействия.

Конкретные величины $K_{об}$, T_0 , τ_3 определяются МРК программно в режиме «НАСТРОЙКА» по экспериментальным кривым разгона на интервале времени $\Delta \tau \geq 3 \div 4T_0$, в течении которого значение управляющего воздействия (входного параметра) остается постоянным.

Изменение во времени величин управляющего воздействия (обычно угол поворота регулирующего органа в процентах хода), при однократном тестирующем воздействии определяется в виде выражения:

$$x(\tau) = x_0 + A \cdot \Psi_n(\tau), \quad 0 \leq \tau \leq T_n, \quad (2)$$

где τ – текущее время, T_n – общая продолжительность интервала времени, используемого для определения всех переходных характеристик (кривых разгона) по данному каналу управления; $x(\tau)$ – текущее значение управляющего (входного) параметра, %хода ИМ; $x_0 = x(\tau=0)$ – начальное значение входного параметра (обычно в окрестности 50% хода исполнительного механизма ИМ); $A = \Delta x$ – постоянная величина, определяющая величину амплитуды входного тестирующего воздействия, равная $10 \div 15$ хода ИМ; $\Psi_n(\tau)$ – тестирующая знаковая функция, определяющая текущее значение $x(\tau)$ на интервале времени $\tau \in (0, T_n)$.

Функция $\Psi_n(\tau)$ является неперiodической кусочно-монотонной, определенной на интервале времени $(0, T_n)$ в соответствии с условием:

$$\Psi_n(\tau) = \sum_{i=1}^m \Psi_n(\tau_i) \cdot \varphi_0(\tau - i \cdot \Delta \tau), \quad i = 1, \dots, m, \quad (3)$$

где $m = T_n / \Delta \tau$ – количество переходных характеристик, используемых при адаптации МРК по выбранному контуру управления; $\Psi_n(\tau_i)$ – сигнум-функция переключения направления возмущающих воздействий, постоянная на отрезке времени $\Delta \tau_i = \tau_i - \tau_{i-1}$ и принимающая значение на интервале времени $\tau \in (0, T_n)$ значения:

$$\Psi_n(\tau_i) \in \{-1, +1\}, \quad (4)$$

где $\tau(i)$ – момент времени, изменения входных возмущающих воздействий; $\varphi_0(\tau)$ – единичная функция на промежутке времени $\Delta \tau$ между двумя тестирующими

воздействиями в соответствии с условием (5):

$$\varphi_0(\tau) = \begin{cases} 0, & \text{при } \tau \leq 0 \\ 1, & \text{при } 0 < \tau \leq \Delta\tau \\ 0, & \text{при } \tau > \Delta\tau \end{cases}, \quad (5)$$

Примем для определенности следующее условие при $0 < \tau \leq \Delta\tau$, $\Psi_n(\tau) = +1$.

В промышленных автоматических системах локального уровня управления используются ИМ постоянной скорости $K_{им}$:

$$K_{им} = 100 / T_S = const, \quad (6)$$

где T_S – время движения ИМ от одного крайнего 0%хода до другого 100%, которые ограничены конечными выключателями. Поэтому при использовании МРК в качестве амплитуды тестирующих воздействий целесообразно использовать время движения ИМ в определенном функцией $\Psi_n(\tau)$ направлении – $\tau_{вoз}$:

$$\tau_{вoз} = A / K_{им} = \Delta x / K_{им}, \text{ с} \quad (7)$$

Значит, в установившемся режиме связь между управляемым и управляющим параметрами в контуре управления можно представить в виде выражения:

$$Y(\tau) = Y_0 + A \cdot K_{об} \cdot \Psi_n(\tau) + Y_c(\tau), \quad 0 \leq \tau < T_n, \quad (8)$$

где $Y(\tau)$ – текущее значение управляемого технологического параметра в адаптируемом контуре; Y_0 – начальное значение выходного параметра $Y(\tau)$ при $x(\tau) = x_0$ и $\tau = 0$, $Y_c(\tau)$ – случайная составляющая $Y(\tau)$, определяемая влиянием неконтролируемых технологических возмущений в интервале $\tau \in (0, T_n)$ на величину $Y(\tau)$.

Практический опыт показывает, что наличие $Y_c(\tau)$ оказывает заметное влияние на величину $K_{об}$. Поэтому для достоверного определения $K_{об}$ в адаптируемом контуре управления используем следующий способ.

Определяем интегральную оценку $Y(\tau)$ на интервале времени $\tau \in (0, T_n)$ в соответствии с выражением:

$$R(T_n) = \frac{1}{T_n} \int_0^{T_n} Y(\tau) \cdot \Psi_n(\tau) d\tau, \quad 0 \leq \tau < T_n, \quad (9)$$

где $\Psi_n(\tau)$ – переключающая функция, обеспечивающая переключение знака интегрирования на интервале времени $0 \leq \tau < T_n$, аналогично $\Psi_n(\tau)$ в выражении (2).

Для функции $\Psi_n(\tau)$ кроме (3) введено условие ограничения в виде (10):

$$\int_0^{T_n} \Psi_n(\tau) d\tau = 0. \quad (10)$$

Подставив (8) в (9) с учетом (5) и (10), получим:

$$R(T_n) = 0,5 \cdot K_{об} \cdot A + Z_c(T_n), \quad (11)$$

где 0,5 – продолжительность времени на интервале $\tau \in (0, T_n)$, в течение которого $\Psi_n(\tau)$ принимает значения +1 или -1, равно $0,5 T_n$;

$$Z_c(T_n) = \frac{1}{T_n} \cdot \int_0^{T_n} Y_c(\tau) \Psi_n(\tau) d\tau - \text{определяет величину}$$

влияния неконтролируемых технологических возмущений на величину интегральной оценки $R(T_n)$.

Значит, переключающую функцию необходимо синтезировать таким образом, чтобы случайная составляющая $Z_c(T_n)$ в (11) была по величине практически нулевой.

Наличие инерционности технологических параметров обуславливает появление ошибки в определении значения $K_{об}$ в соответствии с (11) в сторону занижения результата. Точность определения $K_{об}$ увеличивается при увеличении значения $\Delta\tau$, но это приводит к увеличению значения T_n , что не всегда желательно и осуществимо.

Для практического использования вместо (9) определение $R(T_n)$ целесообразно производить в соответствии с выражением:

$$R(T_n) = \frac{1}{T_n} \sum_{i=1}^m [Y(\tau_i) \cdot \Delta\tau] \cdot \Psi_n(\tau), \quad 0 \leq \tau < T_n, \quad (12)$$

где $Y(\tau_i)$ – значение выходного (управляемого) параметра $Y(\tau)$ в момент времени τ_i , соответствующий моменту переключения функции $\Psi_n(\tau)$.

Учитывая, что $T_n = m \cdot \Delta\tau$, при $\Delta\tau = const$ получим:

$$R(T_n) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m Y(\tau_i) \cdot \Psi_n(\tau). \quad (13)$$

В качестве переключающей функции $\Psi_n(\tau)$ Обуховым Г.Ф. [2] предложено и обосновано использование ортогональной синус-функции Уолша, имеющей вид (14):

$$\Psi_n(\tau) = \prod_{k=1}^{n+1} \text{sign} \sin \frac{2^k \pi \tau}{T_n}, \quad (14)$$

где n – степень аппроксимирующего полинома, которым может быть представлена траектория внешнего технологического возмущения $Y_c(\tau)$ на интервале времени $\tau \in (0, T_n)$, причем необходимо иметь $m = 2^{n+1}$ – количество кривых разгона, тогда $T_n = m \cdot \Delta\tau$.

Уникальные свойства функции Уолша (14) при компенсации негативного влияния технологических

возмущений на величину интегральной оценки выходного параметра заслуживают широкого применения. Это подтверждено практическими результатами [7], но до сих пор не находит нужного применения в практической работе.

Даже при наличии $Z_c(\tau)$ в (11), определение $K_{об}$ в соответствии с (13) осуществляется просто и с минимальным затратами машинного времени МРК.

Величина $K_{об}$ характеризует оценку технологического параметра в установившемся состоянии процесса, т.е. является важной основной статической оценкой технологического процесса.

Адаптация МРК к динамическим параметрам осуществляется путем программного определения значений $T_{об}$ и τ_3 по результирующей переходной характеристике полученной в процессе реализации идентифицирующих тестирующих воздействий в соответствии с функцией $\Psi_n(\tau)$.

Экспериментальные переходные характеристики зашумлены низкочастотными и высокочастотными помехами. Динамическая характеристика (кривая разгона) при адаптации контура стабилизации температуры поверхности нагреваемого металла в случае перемещения на 5% клапана расхода природного газа в зону нагрева представлена на рис. 1.

Для устранения влияния высокочастотных помех в программе формирования результирующей кривой разгона предусмотрено двойное усреднение текущих значений регулируемого параметра в каждом контуре управления.

На первом этапе при определении m переходных характеристик согласно плану, соответствующего функции $\Psi_n(\tau)$, МРК осуществляет усреднение текущих значений регулируемого параметра в соответствии с условием:

$$Y(i) = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m -\Psi_n(\tau) \cdot Y_k(0) + \Psi_n(\tau) \cdot Y_k(i), \quad (15)$$

где $K = (1, 2, \dots, m)$; $i = (0, 1, 2, \dots, M)$; $Y(i)$ – среднее относи-

тельное значение контролируемого параметра при считывании i -го значения; $M = \Delta\tau / \Delta\tau_0$ – количество дискретных значений контролируемого параметра, составляющих переходную характеристику $60 \leq M \leq 120$; $\Delta\tau_0$ – интервал времени опроса датчиков технологического параметра зависящий от инерционных свойств, который может изменяться в пределах $0,2 \div 2$ с; $Y_k(0)$ – начальное значение идентифицируемого параметра в момент внесения входного тестирующего управления; $Y_k(i)$ – значение управляемого параметра в момент считывания i -го значения при определении k -ой кривой разгона.

Для выполнения второго этапа усреднения отрезок времени $\Delta\tau$ делится на S равных частей $\Delta\tau_S$: число S ($10 \leq S \leq 20$) для каждого контура управления задано в памяти МРК в блоке исходных данных вместе с видом функции $\Psi_n(\tau)$.

В каждом интервале времени $\Delta\tau_S$ содержится практически равное число дискретных значений $l = M / S = \Delta\tau_S / \Delta\tau_0$. МРК вычисляет среднее значения параметра внутри каждого интервала $\Delta\tau_S$ в соответствии с выражением:

$$\bar{Y}(j) = \frac{1}{l} \sum_{q=1}^l \bar{Y}_i(q), \quad q = (1, 2, \dots, l), \quad j = (1, 2, \dots, s). \quad (16)$$

Значение $\bar{Y}(j)$ присваивается моменту времени, соответствующей середине каждого интервалу $\Delta\tau_S / 2$. Осуществляемое МРК двойное усреднение позволяет получить достаточно сглаженную результирующую кривую разгона, примерный вид которой представлен на рис. 2. Динамические параметры технологического процесса по всем используемым контурам управления определяются МРК программно по результирующим кривым разгона в соответствии с методом, изображенным на рис. 2.

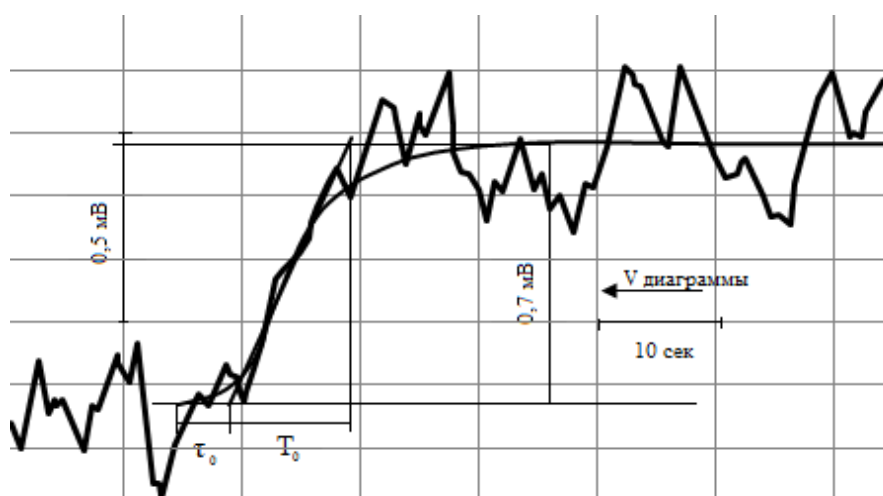


Рис 1. Фрагмент диаграммы измерительного прибора при определении кривой разгона по температуре поверхности нагреваемого металла

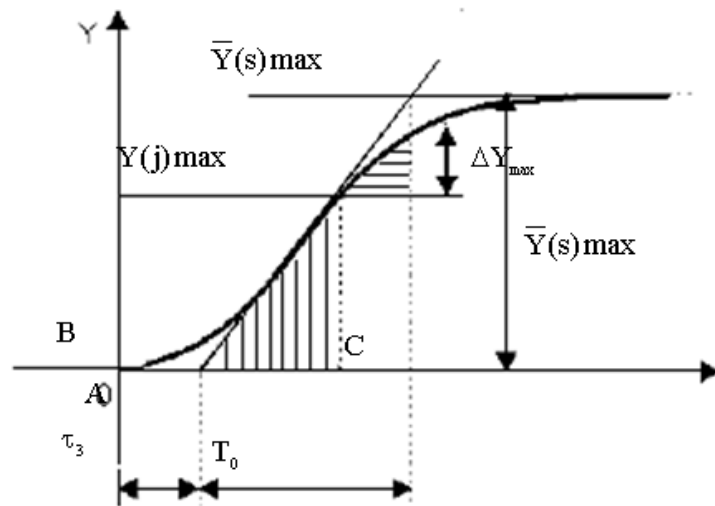


Рис 2. Определение динамических параметров объекта по результирующей кривой разгона

Уточнение величины $K_{об}$ осуществляется по формуле (17):

$$K_{об} = \bar{Y}(s)_{max} / A, \quad (17)$$

где $\bar{Y}(s)_{max}$ – максимальное установившееся значение управляемого параметра по результирующей кривой разгона в момент времени $\Delta\tau = (S-1) \cdot \Delta\tau_S + \Delta\tau_S / 2$.

Определение значений T_0 и τ_3 осуществляется МРК путем выполнения следующих процедур.

Максимальная скорость изменения управляемого параметра ΔY_{max} (точка перегиба результирующей кривой разгона) определяется как максимальное приращение $\bar{Y}(j)$ за время $\Delta\tau_s$ при $\tau = \tau_{max}$.

Величина T_0 рассчитывается МРК в соответствии с выражением (18):

$$T_0 = (\bar{Y}(S)_{max} \cdot \Delta\tau_s) / \Delta Y_{max}. \quad (18)$$

Время запаздывания $\Delta\tau_3$ рассчитывается МРК по формуле (19):

$$\tau_3 = \tau_{max} - (\bar{Y}(j)_{max} \cdot \Delta\tau_s) / \Delta Y_{max}, \quad (19)$$

где τ_{max} – координата времени точки перегиба результирующей кривой разгона; $\bar{Y}(j)_{max}$ – значение контролируемого параметра по результирующей кривой разгона при $\tau = \tau_{max}$.

По известным динамическим параметрам объекта с самовыравниванием $K_{об}, T_0, \tau_3$ с использованием метода «оптимума по модулю» изложенному в [4], [5] МРК рассчитывает величины параметров динамической настройки регулятора в каждом контуре в соответствии с выражением для ПИ или ПИД законов управления.

Для ПИ-закона управления:

$$T_{из} = T_0; K_p = T_0 / (2K_{об} \cdot \tau_3). \quad (20)$$

Для ПИД-закона управления:

$$T_n = 0,15T_0; T_{из} = T_0; K_p = T_0 / (2K_{об} \cdot \tau_3), \quad (20)$$

где $T_{из}$ – время изодрома; K_p – коэффициент передачи, T_n – время предварения.

Полученные значения $T_{из}$ и K_p гарантируют получение устойчивого переходного процесса в каждом локальном контуре управления [4],[5].

Для снижения вероятности возможного перемещения ИМ при действии случайных неконтролируемых помех вычисление текущего сигнала рассогласования в каждом контуре управления осуществляется с использованием множества запомненных значений сигналов рассогласования, разнесенных во времени, то есть с учетом предыстории состояния управляемого параметра [6].

Заключение

Рассмотренный метод программной реализации процедуры адаптации свободного программируемого МРК на полевом уровне управления в АСУТП применим к любому автоматизируемому процессу промышленного производства [8-13]. Метод апробирован в реальных производственных условиях при централизованном автоматическом управлении процессом нагрева металла.

Использование предлагаемого метода позволяет оперативно и эффективно осуществлять технологическую наладку МРК на полевом уровне управления технологическими параметрами. Это значительно ускоряет освоение системы автоматического управления технологическим процессом в реальных производственных условиях. Реально удалось обеспечить управление тепловым режимом многозонной методической печи МРК с объемом оперативной памяти всего 64 кбайт. Это реально увеличивает быстродействие управления.

За счет рационального и эффективного использования вычислительных возможностей МРК одновременно значительно снижаются экономические затраты на

автоматизацию за счет применения менее дорогих технических средств и затрат на наладку этих средств в реальных производственных условиях. Это особенно целесообразно для малых предприятий в современных условиях рыночных экономических отношений.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Балакирев, В.С.** Экспериментальное определение динамических характеристик промышленных объектов управления / В.С. Балакирев, Е.Г. Дудников, А.М. Цирлин // М: Энергия. 1967. 73-75 с.
2. **Парсункин, Б.Н.** Формирование тестирующих сигналов для идентификации теплоэнергетических объектов / Б.Н. Парсункин, Г.Ф. Обухов, А.В. Леднов // Известия вузов. Теплоэнергетика. 1988. №6. 65-70 с.
3. **Парсункин, Б.Н.** Определение параметров идентификации объектов металлургического производства // Известия вузов. Черная металлургия. 1988. №6. 121-125 с.
4. **Фрер, Ф.** Введение в электронную технику регулирования / Ф. Фрер, Ф. Ортенбургер // М: Энергия. 1973. 190 с.
5. **Кулаков, Г.Т.** Инженерные экспресс-методы расчета промышленных систем регулирования – справочное пособие // Минск: Высшая школа. 1994. 27-40 с.
6. **Парсункин, Б.Н.** Адаптация и оптимизация настройки контуров цифрового управления: учеб. пособ. // Магнитогорск. МГМА. 1997. 134 с.
7. **Парсункин, Б.Н.** Оперативное определение эффективности работы микропроцессорных систем управления технологическими процессами / Б.Н. Парсункин, В.М. Рябков, Г.Ф. Обухов и др. // Сталь. 1987. №9. 101-105 с.
8. **Рябчиков, М.Ю.** Изучение режимов нагрева стальной полосы в протяжной печи башенного типа для светлого отжига / М.Ю. Рябчиков, И.Г. Самарина // Металлообработка. 2013. -№ 1 (73). -С. 43-49.
9. **Рябчиков, М.Ю.** Использование модели нагрева полосы при управлении температурным режимом в протяжной печи башенного типа / М.Ю.Рябчиков, Б.Н.Парсункин, С.М.Андреев, Н.А.Головки // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2011. -№ 5. -С. 41-50.
10. **Полько, П.Г.** Алгоритм нечеткого управления для синтеза цифровых контуров автоматической стабилизации технологических параметров / П.Г. Полько, О.С. Логунова, Е.С. Рябчикова, М.Ю. Рябчиков, С.М. Андреев, Б.Н. Парсункин // Автоматизация в промышленности. 2010. -№ 11. -С. 32-37.
11. **Павлов, А.С.** Прогнозирование производства дефектной продукции агрегатом непрерывного горячего цинкования ОАО ММК с помощью нейросетевой модели процесса нагрева металла / А.С. Павлов, М.Ю. Рябчиков, Е.С. Михальченко // Электротехнические системы и комплексы. 2009. № 17. С. 135-139.
12. **Андреев, С.М.** Концепция нейросетевой системы управления многозонными нагревательными устройствами протяжного типа / С.М. Андреев, Б.Н. Парсункин, М.Ю. Рябчиков, В.Н. Целых // Электротехнические системы и комплексы. 2007. № 14. С. 344-351.
13. **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. 2012. № 4. С. 81-97.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ АГЛОПРОЦЕССА В РЕЗУЛЬТАТЕ АВТОМАТИЗАЦИИ РЕЖИМА УВЛАЖНЕНИЯ АГЛОШИХТЫ ПРИ ОКОМКОВАНИИ

К.В. Лицин¹, А.Н. Шаповалов²

¹ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»,
г. Магнитогорск, Россия

²Новотроицкий филиал НИТУ «МИСиС», г. Новотроицк

IMPROVING THE EFFICIENCY OF AGGLOMERATION PROCESS BY AUTOMATION MOISTURE REGIME OF SINTER BURDEN DURING PELLETIZATION

K.V. Litsin¹, A.N. Shapovalov²

^{1,2}Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

²Novotroitsk branch MISIS, Russia

¹k.litsin@rambler.ru

²alshapo@yandex.ru

Аннотация. Исследовано влияние стабильности влажности аглошихты на показатели аглопроцесса. Установлено, что действующий режим окомкования и увлажнения имеет недостаточную эффективность, не обеспечивая стабильное получение аглошихты с постоянной влажностью и хорошей газопроницаемостью. Для повышения эффективности окомкования предложено автоматизировать корректировку влажности аглошихты. Представлена функциональная схема системы автоматического регулирования влажности. Ее внедрение позволит стабилизировать качество аглошихты и обеспечит улучшение показателей аглопроцесса и качество агломерата.

Ключевые слова: агломерационная шихта, гранулометрический состав, окомкование, агломерация, режим увлажнения.

Abstract. The effect of the stability of the humidity of charging material on the performance agglomeration process is explored. It was found that the current regime pelletizing and moisturizing does not provide a stable level of humidity and gas permeability of the sinter burden. To improve the efficiency of pelletizing is proposed to automate the adjustment of humidity sinter burden. The functional diagram of the system of automatic control of humidity is presented. Its implementation will allow to stabilize the quality of sinter burden and ensure improvement of agglomeration process and quality of sinter.

Keywords: sinter burden, granulometric composition, pelletizing, agglomeration, the moisture regime.

Эффективность аглопроцесса определяется свойствами исходных компонентов шихты, составом и качеством ее подготовки, а также параметрами спекания. При постоянных параметрах спекания, во многом определяемых техническим состоянием агломашины (газоплотность вакуумной системы, мощность эксгаустера), результаты аглопроцесса зависят от свойств шихты и ее подготовки.

Подготовка аглошихты к спеканию в аглоцехе ОАО «Уральская Сталь» проводится в две стадии: смешивание (с увлажнением до 3,5-4 %) – в смесительном барабане СБ-2,8×6, установленном под углом 2° к горизонту и вращающемся со скоростью 6,6 об/мин; окомкование и доувлажнение до оптимального уровня (6,5-8,0 %) – в барабане СБ-2,8×6, установленном под углом 1°30' к горизонту и вращающемся со скоростью 6 об/мин.

В условиях действующего производства, ключевым фактором, определяющим качество подготовки аглошихты к спеканию, является режим увлажнения: степень и стабильность влажности, свойства воды, способ и место ее подачи, использование добавок и др. Из всех параметров увлажнения в производственных условиях ОАО «Уральская Сталь» корректируется только расход

технической воды, определяющий уровень влажности аглошихты. Коррекция производится в ручном режиме в зависимости от влажности аглошихты на спекательной тележке, контролируемой по внешним признакам в соответствии с ТИ 13657842-ОА-01-2012 [1].

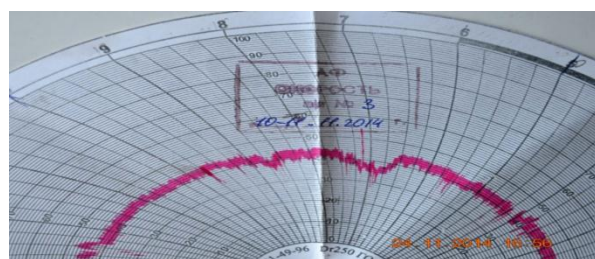
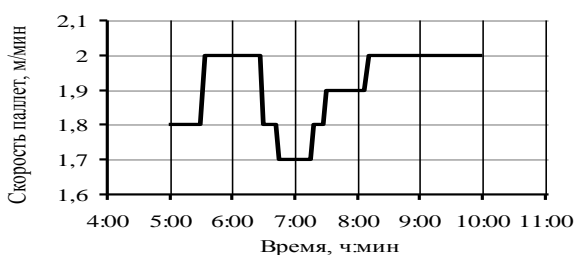
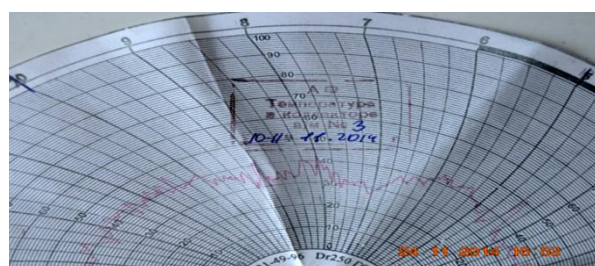
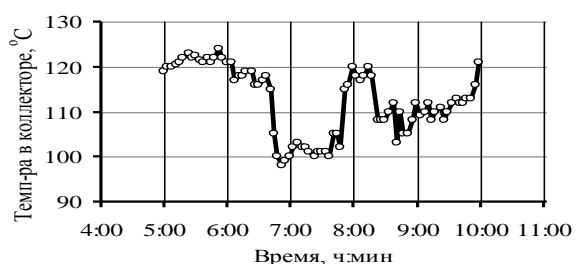
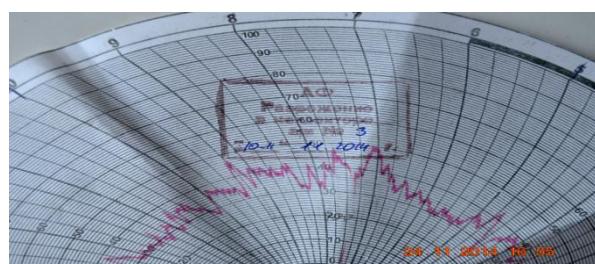
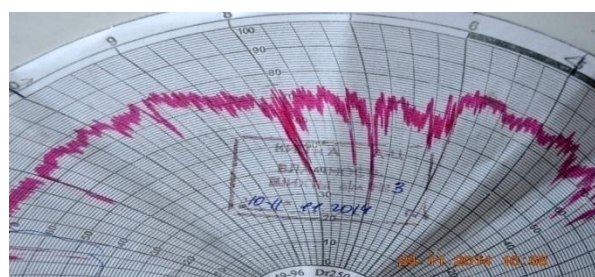
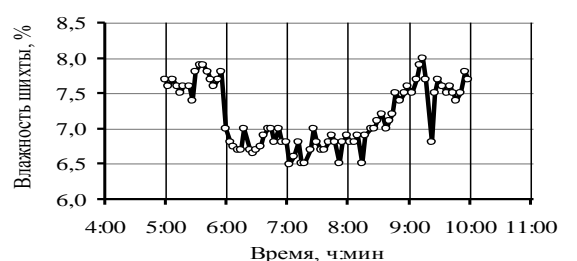
Для оценки эффективности действующей технологии подготовки аглошихты в период с июня по декабрь 2014 г. на технологической линии агломашины №3 ОАО «Уральская Сталь» был проведен эксперимент, заключающийся в отборе проб аглошихты и агломерата, а также фиксации параметров работы агломашины. Усредненные опытные данные представлены в таблице 1.

Полученные в ходе исследования данные позволяют заключить, что, несмотря на значительное количество комкующих фракций в исходной шихте, количество мелочи (фракция 0-1 мм) в окомкованной шихте, определяющее ее порозность и газопроницаемость, остается на значительном уровне, снижаясь ниже 10 % только при переувлажнении шихты сверх оптимальной влажности (6,5-8,0 % по условиям ОАО «Уральская Сталь» [1, 2]).

Кроме того, значительные колебания влажности аглошихты и, как следствие, нестабильные показатели ее качества, наблюдаемые в период исследования, отража-

Таблица 1

Показатель		Интервал изменения	Среднее значение
Влажность шихты до окомкования, %		3,33-4,9	3,97
Содержание мелочи (0-1 мм) в неокомкованной шихте, %		52,4-63,4	57,22
Влажность окомкованной аглошихты, %		6,3-9,7	8,1
Фракционный состав окомкованной шихты, %	+10 мм	7,85-16,2	11,55
	5-10 мм	10,21-18,8	14,22
	3-5 мм	14,46-26,79	19,46
	1-3 мм	29,91-44,7	37,84
	0-1 мм	6,41-28,33	16,92
Средний диаметр гранул окомкованной шихты, мм		3,4-4,97	4,07
Разрежение в коллекторе, мм.вод.ст		480-660	564,1
Температура в коллекторе, °С		70-140	97
Скорость аглоленты, м/мин		1,5-2,1	1,77
Расчетная производительность, т/(м ² ×ч)		0,941-1,106	1,041
Прочность на удар по ГОСТ 15137-77, %		60,22-70,1	65,03
Сопротивление истиранию по ГОСТ 15137-77, %		6,4-4,66	5,41



Г

Рис.1. Динамика влажности аглошихты (а), разрежения (б) и температуры (в) в коллекторе, скорости аглоленты (г) в период колебания влажности агломерационной шихты

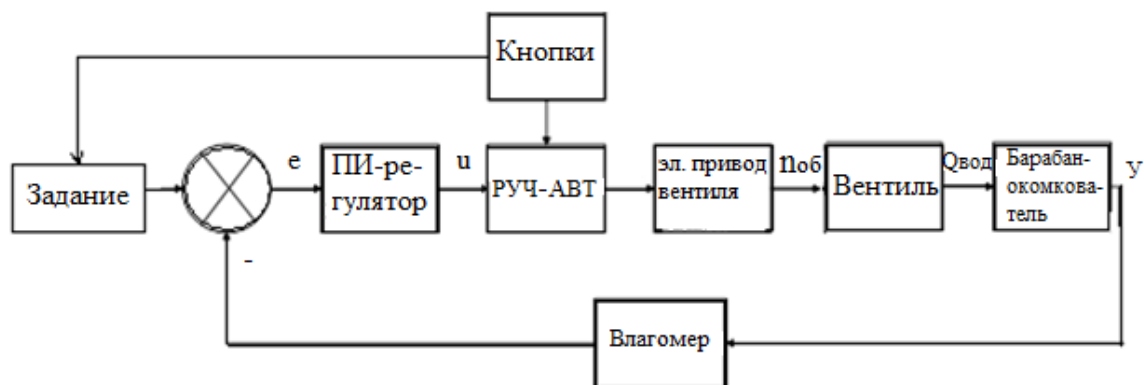


Рис. 2. Функциональная схема системы автоматического регулирования влажности

ются на показателях аглопроцесса. Так, колебания влажности аглошихты, ведущие к изменению ее гранулометрического состава, влияют на газопроницаемость спекаемого слоя, что отражается на разрежении и температуре газа в коллекторе, и вынуждает корректировать скорость аглоленты. Нестабильность влажности и газопроницаемости шихты также влияют на ход спекания и тепловое состояние спекаемого слоя, что в свою очередь отражается на прочности агломерата.

Для иллюстрации влияния стабильности влажности аглошихты на показатели аглопроцесса на рис. 1 представлена динамика показателей работы агломашины №3 за период, в течение которого влажность колебалась от 6,5 до 8,0 %. С понижением влажности аглошихты до 6,5 % (рис. 1, а), вследствие ухудшения качества окомкования и газопроницаемости спекаемого слоя, выросло разрежение в коллекторе с 550 до 650 мм.вод.ст. (рисунок 1, б), а температура в коллекторе упала с 120 до 100 °С (рис. 1, в). Для стабилизации процесса спекания был скорректирован расход воды на увлажнение и влажность аглошихты, а также снижена скорость аглоленты с 2,0 до 1,7 м/мин. В результате разрежение стабилизировалось, и наметилась тенденция к повышению температуры в коллекторе. В дальнейшем, после поступления на спекание шихты с нормальной влажностью и хорошей газопроницаемостью, разрежение в коллекторе снизилось до 550-600 мм.вод.ст., что позволило повысить скорость движения аглоленты до 2,0 м/мин при средней температуре в коллекторе 110 °С.

Таким образом, применяемый технологический режим окомкования и увлажнения имеет недостаточную эффективность, не обеспечивая стабильное получение аглошихты с постоянной влажностью и хорошей газопроницаемостью. Это, наряду с неудовлетворительным техническим состоянием тракта отходящих газов, ограничивает высоту спекаемого слоя, производительность цеха и является сдерживающим фактором увеличения расхода тонкозернистых концентратов [3-6]. Одной из причин значительных колебаний влажности аглошихты, оказывающих существенное влияние на окомкование и показатели спекания, является отсутствие динамической системы контроля и коррекции влажности, позволяющей оперативно реагировать на изменения свойств шихты, поступающей на окомкование.

Регулировка же влажности шихты в ручном режиме осуществляется периодически и, главным образом, по данным о температуре в коллекторе, появляющимся через 15-20 минут от загрузки шихты на спекательные тележки.

В таком режиме невозможно обеспечивать постоянство влажности и результатов окомкования, что и проявляется на стабильности показателей спекания.

Для снижения влияния колебаний влажности на показатели аглопроцесса необходимо автоматизировать корректировку влажности аглошихты, для чего требуется оборудовать тракт подачи воды на окомкование системой автоматического регулирования влажности.

На рис. 2 показана функциональная схема системы автоматического регулирования влажности. За счет коррекции расхода воды на увлажнение, в зависимости от текущей влажности шихты, обеспечивается постоянство условий окомкования и газопроницаемости в процессе спекания, что позволяет стабилизировать температуру и разрежение в коллекторе при постоянной скорости аглоленты.

Значение влажности (y) измеряется с помощью влагомера. С него сигнал поступает на компаратор, где сравнивается с заданием. Возникающее рассогласование, сигнал ошибки "е", обрабатывается в ПИ-регуляторе, который вырабатывает сигнал управляющего воздействия u . Блок "РУЧ-АВТ" предусмотрен для возможности переключения в ручной режим работы в случае возникновения в этом необходимости (например, при аварийной ситуации). Для осуществления переключения используется блок "Кнопки". Далее управляющий сигнал поступает на исполнительный механизм, коим в данном случае является электропривод. В зависимости от величины управляющего сигнала происходит увеличение или уменьшение вращения ротора электропривода, который осуществляет перемещение вентиля. Таким образом, происходит изменение объема подаваемой воды, что приводит к изменению влажности.

Внедрение системы автоматического регулирования влажности позволит стабилизировать качество аглошихты, что обеспечит улучшение показателей аглопроцесса и качества агломерата [4, 7, 8].

ЛИТЕРАТУРА

1. **Технологическая инструкция ТИ 13657842-ОА-01-2012. Производство офлюсованного агломерата.** – Новотроицк: ОАО «Уральская Сталь», 2012. – 54с.
2. **Панычев, А.А.** Оптимизация технологических параметров на основе математических моделей при агломерации михайловских и лебединских концентратов / А.А. Панычев, А.П. Никонова // *Металлург*, 2008. - №10. - С.46-51.

-
3. **Базилевич, С.В.** Агломерация / С.В. Базилевич, Е.Ф. Вегман. – М.: Metallurgy, 1967. - 368с.
 4. **Коротич, В.И.** Агломерация рудных материалов. Научное издание / В.И. Коротич, Ю.А. Фролов, Г.Н. Бездежский. - Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2003. – 400с.
 5. **Шаповалов, А.Н.** Качество подготовки агломерационной шихты к спеканию в условиях ОАО «Уральская сталь» / А.Н. Шаповалов, Е.В. Овчинникова, Н.А. Майстренко // Теория и технология металлургического производства, 2014. №1(14). С.6-9.
 6. **Шаповалов, А.Н.** Повышение качества подготовки агломерационной шихты к спеканию в условиях ОАО «Уральская Сталь» / А.Н. Шаповалов, Е.В. Овчинникова, Н.А. Майстренко // Metallurg, 2015. №3. С.30-36.
 7. **Вегман, Е.Ф.** Окускование руд и концентратов. М.: Metallurgy, 1968. – 258с.
 8. **Пазюк, М.Ю.** Влияние качества подготовки шихты на прочность агломерата / М.Ю. Пазюк, В.Н. Погорелов, В.И. Гранковский и др. // Известия вузов. Черная металлургия, 1985. –№ 4. – С.21–24.

ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ СИСТЕМ ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ АГЛОМЕРАЦИОННЫМ ПРОЦЕССОМ

М.Ю. Рябчиков¹, В.В. Гребенникова², Е.С.Рябчикова³, Н.В. Богданов⁴, А.И. Сунаргулова⁵
^{1,2,3,4}ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»,
 г. Магнитогорск, Россия.

REVIEW OF EXISTING OPERATIONAL CONTROL SYSTEMS AND OPTIMIZED SINTERING PROCESS

M.Yu. Ryabchikov¹, V.V. Grebennikova², E.S. Ryabchikova³, N.V. Bogdanov⁴, A.I. Sunargulova⁵
^{1,2,3,4}Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

² greb1981@mail.ru

Аннотация. В статье приведён обзор существующих систем управления агломерационным процессом на этапе дозирования и в процессе спекания. Приведены контролируемые параметры, средства контроля и регулирующие воздействия. Проанализированы недостатки существующих систем, с точки зрения учета качества агломерата.

Ключевые слова: система управления, агломерационный процесс, качество металлургического агломерата, дозирование, процесс спекания агломерата.

Abstract. The article provides a review of existing systems for sintering process control in the dosing stage and during sintering operation. Controlled variables, control tools, and regulatory impact are presented in the article. We analysed disadvantages of existing systems in terms of sinter quality records.

Keywords: control system, sintering process, quality of iron ore sinter, dosing process, process of batch sintering.

Задача управления процессом спекания состоит в стабилизации процесса при оптимальных параметрах с точки зрения качества агломерата и производительности агломашины. Отклонение массовой доли топлива и влаги от нормальных значений, чрезмерное уплотнение аглошихты, поступающей на спекательные тележки, приводят к уменьшению вертикальной скорости спекания. Таким образом, необходим связный контроль технологических показателей процесса агломерации до начала спекания, при загрузке шихты на аглоленту. Для этого необходимы средства измерения, которые позволят контролировать технологические показатели процесса [1].

Основными управляемыми параметрами агломерационного процесса, связанными с физическими свойствами шихты, являются насыпная плотность, влажность и высота слоя шихты на аглоленте, а также содержание углерода. Изменение перечисленных параметров, состава шихты (химического, минералогического, гранулометрического) и скорости движения аглоленты сказывается на положении места окончания процесса спекания и качества агломерата [2].

К настоящему времени разработан ряд систем контроля и регулирования на этапах дозирования и спекания, в которых используются различные контролируемые параметры и регулирующие воздействия, таблица 1,2.

При управлении на этапах дозирования наиболее распространенные контролируемые параметры представлены в табл. 1. Так, авторы Львов А.С. и Полянский А.В. в работе [4] предлагают обеспечить непрерывный бесконтактный контроль параметров аглошихты с применением радиометрического гамма-абсорбционного

метода. Насыпная плотность и высота слоя аглошихты являются параметрами функции интенсивности излучения. С учетом комптоновского рассеяния интенсивность потока излучения N_1 , регистрируемая коллимированным детектором, и частота следования импульсов, фиксируемая счётчиком N_2 , изменяются согласно выражениям:

$$N_1 = N_0 B_{air} e^{-\mu_{ш} \rho_n h}, \quad N_2 = N_0 \frac{B_{общ}}{h^2} e^{-\mu_{ш} \rho_n h}, \quad (1)$$

где h – толщина слоя вещества; N_0 – интенсивность гамма-квантов характеризует поток при отсутствии шихты на паллете; $\mu_{ш}$ – массовый коэффициент ослабления гамма-излучения в аглошихте; ρ_n – насыпная плотность аглошихты; B_{air} – buildup-фактор, учитывающий эффект комптоновского рассеяния в воздухе фотонов, достигающих сцинтилляционного счетчика; $B_{общ}$ – общий buildup-фактор, учитывающий рассеивание гамма-квантов с образованием вторичных фотонов не только в воздухе, но и в материале шихты и паллеты.

Массовый коэффициент ослабления $\mu_{ш}$ для конкретного состава шихты [2] примет вид:

$$\mu_{ш} = 0,24\mu_k + 0,38\mu_p + 0,65\mu_u + n(C)\mu_c + n(H_2O)\mu_{H_2O} + (0,315 - n(C) - n(H_2O))\mu_g, \quad (2)$$

где μ_k , μ_p , μ_u , μ_c , μ_{H_2O} и μ_g – массовые коэффициенты ослабления гамма-излучения соответственно в

Таблица 1

Основные контролируемые параметры и регулирующие воздействия на этапах дозирования

Контролируемые параметры	Средства контроля	Регулирующие воздействия
Насыпная плотность и высота слоя аглошихты	РИП	Изменения скорости вращения барабанного питателя
Химический состав руды	CON-X	Изменение расхода коксика
Газопроницаемость шихты в бункере	Пневматическая трубка	Увлажнение шихты, и обработка паром

Таблица 2

Основные контролируемые параметры и регулирующие воздействия в процессе спекания

Контролируемые параметры	Средства контроля	Регулирующие воздействия
Температура в вакуум-камерах	Термопара, термометр сопротивления	Скорость ленты
Расход газа (разрежение) в «нулевой» вакуум-камере	Расходомер	Уплотнение слоя, расход шихты
Состав газа общий	Газоанализатор	Дросселирование эксгаустера
Расход воздуха через спекаемый слой	Анемометр	Высота слоя
Светимость в последних вакуум камерах	Фотодатчик	Скорость ленты
Изображение излома готового агломерата [3]	Телекамера	Скорость ленты

концентрате, руде, известняке, углероде, воде и возврате; $n(C)$, $n(H_2O)$ – содержания углерода и влаги в аглошихте являются варьируемыми технологическими показателями, влияющими на содержание возврата.

Связь между значениями параметров ρ_n и h и количеством зафиксированных гамма-квантов N_1 и N_2 находят с помощью нейросетевой аппроксимацией.

Этот подход применяется при создании многофункциональных РИП. Такой прибор ввиду бесконтактного принципа контроля может быть размещён в непосредственной близости от точки загрузки шихты на аглоленту до гладилки. В результате становится возможным минимизировать запаздывания в локальной системе регулирования, управляющей толщиной слоя и плотностью загружаемой шихты, путём изменения скорости вращения барабанного питателя. При контроле толщины слоя аглошихты после гладилки величина запаздывания может составлять до 1 мин. На этапах дозирования могут быть использованы радиоизотопные приборы (РИП), недостатком является то, что большинство РИП, применяемые настоящее время, выполняют измерение единственного параметра сыпучей смеси.

В агломерационном цехе ОАО «ММК» производится контроль химического состава рудной смеси с помощью РФА CON-X-02 непосредственно на ленте конвейера без отбора проб. Набор спектра рентгеновской флуоресценции происходит в течение нескольких минут, затем данные передаются на ЭВМ, где рассчитывается химический состав сыпучего материала в бункерах, а также необходимый расход различных сыпучих материалов для производства продукта заданного химического состава [5]. Недостатками способа является отсутствие определения оксидов SiO_2 , MgO , Al_2O_3 , которые сильно влияют на свойства получаемого агломерата, если исходить из результатов работ [6, 7] и непостоянство расстояния между РФА и ЖРС.

CON-X-02 в настоящий момент контролирует ограниченный набор элементов (Fe, Mn, Ca) и кроме того не ясны частотные особенности колебания химического состава во времени, что не позволяет с уверенностью говорить о возможности организации оперативного управления.

Исходя из обзора систем контроля и управления на этапах дозирования можно сделать вывод, что системы ориентированы на решение задач стабилизации физико-химических параметров не имеющих однозначной связи с качеством получаемого агломерата, что является общим недостатком таких систем.

Что касается процесса спекания агломерационной шихты, то этот этап является основным в процессе получения агломерата, поэтому управлению на этом этапе уделяется внимание многими исследователями. Важными задачами процесса спекания является зажигание [8,9] и своевременное завершение процесса спекания, для этого скорость движения спекательных тележек регулируется в зависимости от вертикальной скорости спекания с таким образом, чтобы процесс спекания закончился в предпоследней вакуум-камере коллектора. Незавершённость спекания значительно снизит механическую прочность готового агломерата [10,11]. Окончание процесса спекания определяют, контролируя параметры представленные в табл.2. и в дальнейшем по этим параметрам вырабатывают соответствующие регулирующие воздействия.

В работе [12] Ершовым Е.В. предложен метод управления спеканием агломерационной шихты и принцип формирования управляющего воздействия, с использованием способов распознавания высокотемпературной зоны излома и температурного поля поверхности спекаемого слоя за зажигательным горном.

Система управления определяет на изображении область, соответствующую только раскалённым участкам

излома аглоспёка (экспериментально получено, что при 800 °С цвет агломерата становится ярко-вишнёвым). По соотношению площади раскалённой части излома $S_{ВТЗ}$ и общей площади поперечного сечения $S_{общ}$ завершенность процесса спекания с использованием коэффициента $K_{ВТЗ}$:

$$K_{ВТЗ} = \frac{S_{ВТЗ}}{S_{общ}}. \quad (3)$$

Используя $K_{ВТЗ}^{изл}$ – коэффициент высокотемпературной зоны излома аглоспека и $K_{ВТЗ}^{пов}$ – коэффициент высокотемпературной зоны поверхности спекаемого слоя за зажигательным горном по матрице, рис.1, определяется коэффициент, на который необходимо изменить скорость движения паллет для восстановления оптимального хода технологического процесса.

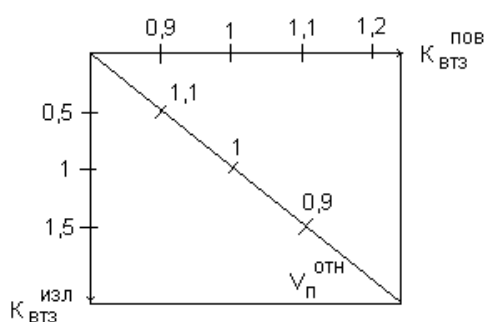


Рис.1. Управляющая матрица [12] полученная Ершовым Е.В. с использованием модели теплообмена ($V_n^{отн}$ – относительная скорость движения паллет)

Другим способом определения окончания процесса спекания является определение текущего значения активной длины ленты [13], суть данного метода изображена на рис. 2, а, б.

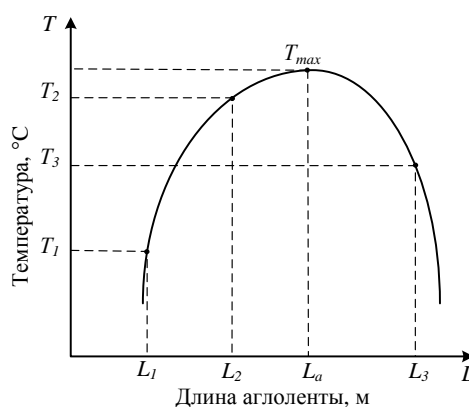
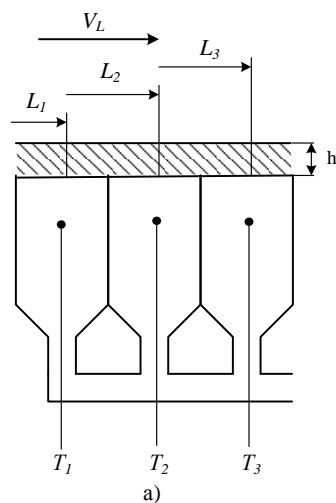


Рис. 2. Метод определения текущего значения активной длины ленты L_a по результату измерения температур в вакуум-камерах заданной зоны окончания процесса: а – схема установки термопар; б – значение температур относительно длины ленты

Данный способ определения L_a основан на аппроксимации траектории изменения температуры в вакуум-камерах в зависимости от длины ленты параболой, симметричной относительно текущего значения L_a по экспериментальным точкам.

По температуре отходящих газов в последних вакуум-камерах определяется квадратичная функция, откуда определяется текущее значение L_a :

$$L_a = -b/2c. \quad (4)$$

Зная текущее значение L_a , можно управлять скоростью аглоленты.

Эта система, как и другие системы автоматического управления, которые используют контролируемые параметры и управляющие воздействия, решают, как правило, задачи стабилизации процесса, исходя из предположения, что это стабилизирует качество агломерата, что в итоге может не соответствовать действительности. При этом конечной целью управления процессом является такая его оптимизация, при которой минимально требуемое качество агломерата обеспечивается при наилучших экономических показателях. Обычно решается такая оптимизация, когда за основной критерий принимают производительность агломашин.

Производительность агломерационного процесса зависит от многих факторов, влияние которых неоднозначно. В работе [13] предложена система автоматической поисковой оптимизации, задачей которой является обеспечение текущей максимально возможной производительности.

Скорость процесса спекания, зависит от газопроницаемости и слоя шихты, связанной с её влажностью. Пример зависимости [13] относительной производительности агломашин от влажности шихты представлен на рис. 3.

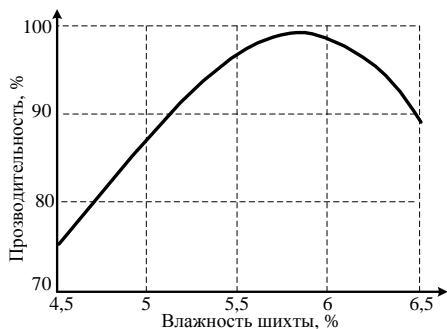


Рис. 3. Пример зависимости относительной производительности агломашины от влажности шихты

При недостаточной влажности шихты слабоокусовавшиеся мелкие фракции препятствуют прохождению воздуха к зоне горения, снижая газопроницаемость слоя. При переувлажнении расплывшиеся комочки шихты также снижают газопроницаемость. Кроме того, на испарение излишней влаги затрачивается тепловая энергия при сжигании топлива. Задачей САΟΥ является поддержание такой влажности шихты, при которой достигается максимальная текущая производительность, изменяющаяся вследствие действия возмущений.

Для решения задачи, учитывая значительное запаздывание, в качестве алгоритма САΟΥ в [13] предложено использовать систему экстремального регулирования (СЭР) шагового типа [13].

В качестве недостатка предложенной в [13] САΟΥ можно отметить то, что производительность агломашины изменяется под действием многих возмущающих воздействий. Выявление эффекта изменения влажности в подобных условиях при наличии значительного запаздывания может потребовать чрезмерно большой амплитуды поисковых воздействий, неприменимых для реального процесса.

Так, другим технологическим параметром, влияющим на производительность агломашины и свойства агломерата, является содержание углерода в агломерационной шихте. Примеры зависимости производительности аглоустановки по выходу годного агломерата по данным [13] представлены на рис. 4а. При малом содержании углерода в шихте вследствие недостаточной прочности

спекшегося агломерата наблюдается повышенная доля возврата, что негативно влияет на производительность агломашины. При повышенном содержании увеличивается сопротивление зоны расплава, затрудняется приток кислорода к фронту горения, что снижает вертикальную скорость спекания и производительность агломашины.

Зависимость выхода класса +5 мм от содержания углерода в аглошихте представлена на рис. 4 б.

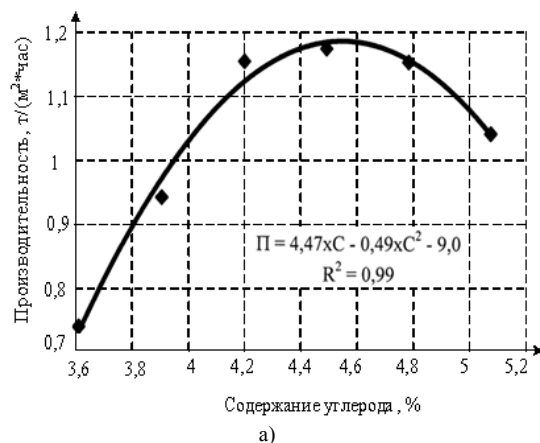
Исходя из вида зависимостей, рис. 4, авторы делают вывод, что максимальная производительность и максимальная прочность агломерата обеспечиваются при практически одинаковом содержании углерода, что обосновывает использование САΟΥ для управления дозированием кокса.

Однако, как отмечалось, выход класса +5 мм не является в полной мере характеристикой прочности. Такой характеристикой может являться барабанный индекс +5мм. Отмеченное авторами соответствие экстремумов можно объяснить тем, что для годного агломерата фактически входит в состав доли +5мм.

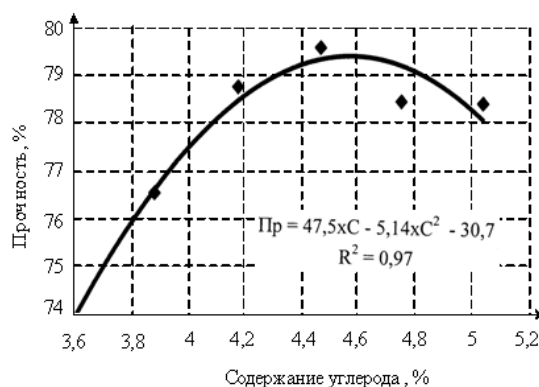
Анализируя современные системы управления и оптимизации агломерационным процессом, можно сделать вывод, что они ориентированы на качественные характеристики, актуальные с позиции производительности и затрат на подготовку материалов и их спекание, но не учитывают оценки качества, определяемые по ГОСТ с позиции эффективного протекания доменного процесса.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Вегман, Е.Ф.** Теория и технология агломерации / Е.Ф. Вегман. – М.: Металлургия, 1974. – 228 с.
2. **Коротич, В.И.** Агломерация рудных материалов / В.И. Коротич, Ю.А. Фролов, Г.Н. Бездежский. – Екатеринбург: ГОУ ВПО “УГТУ-УПИ”, 2003. 400 с.
3. **Ершов, Е.В.** Методы, модели и алгоритмы управления технологическим процессом производства агломерата на основе оптико-электронного контроля качества. Дис. канд. техн. наук: 05.13.06. Курск, 2009. – 172 с.
4. **Львов, А.С.** Многопараметрический неразрушающий контроль технологических показателей процесса агломерации при загрузке шихты на аглоленту / А.С. Львов, А.В. Полянский - Металлург, 2010, №7 – С. 23-27.



а)



б)

Рис. 4. Зависимость производительности аглоустановки по выходу годного агломерата от содержания углерода [13] (а) и зависимость выхода класса +5 мм от содержания углерода [13] (б)

-
5. **Рябчиков, М.Ю.** Обзор рентгенофлуоресцентных анализаторов для контроля свойств рудных материалов / М.Ю. Рябчиков, В.В. Гребенникова, Е.С. Богданов, Н.В. Богданов // Приборы, 2014. №11. С.45-51.
 6. **Рябчиков, М.Ю.** Моделирование комплексного влияния производственных факторов на механическую прочность металлургического агломерата / М.Ю. Рябчиков, В.В. Гребенникова // Металлург. 2013. № 4. С. 40-47.
 7. **Рябчиков, М.Ю.** Контроль качества металлургического агломерата с использованием модели восстановимости / М.Ю. Рябчиков, В.В. Гребенникова, Е.С. Рябчикова // Сталь. 2014. № 2. С. 4-8.
 8. **Малыгин, А.В.** Контроль и регулирование процесса зажигания шихты на конвейерной агломерационной машине / А.В. Малыгин, С.С. Головырин, С.В. Ендияров // Сталь, 2013. №9. С. 2 – 4.
 9. **Дмитриева, Е.Г.** Применение математической модели для оптимизации процесса зажигания / Е.Г. Дмитриева, В.П. Жилкин, А.В. Малыгин, С.С. Скачкова // Бюллетень научно-технической и экономической информации “Черная металлургия”, №3. 2005 г.
 10. **Дегтяренко, И.А.** Управление процессом спекания шихты на агломерационной машине конвейерного типа с использованием оптико-электронного метода. / А.В. Дегтяренко, Е.В. Ершов, О.Л. Селяничев, В.Ю. Кучин. – Череповец: ЧГУ, 1997
 11. **Базилевич, С.В.** Агломерация / С.В. Базилевич, Е.Ф. Вегман. – М. Металлургия. 1967. 368 с.
 12. **Ершов, Е.В.** Оптико-электронная система управления спеканием агломерационной шихты / Е.В. Ершов. – Датчики и системы, 2007, №7 – С.36 – 41.
 13. **Парсункин, Б.Н.** Автоматизация технологических процессов и производств в металлургии. Ч.I. Подготовка рудных материалов. Агломерация и производство окатышей / Б.Н. Парсункин, С.М. Андреев, Е.С. Рябчикова, В.В. Гребенникова. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2013. – 199 с.

СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ УГЛОВОЙ СТАБИЛИЗАЦИЕЙ КВАДРОКОПТЕРА

И.Б. Прохоров¹, П.А. Гребенщиков², А.Р. Мубаракшин³, Д.А. Ахметдинов⁴, В.С. Моисеев⁵
^{1,2,3,4,5}ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия

AUTOMATIC CONTROL SYSTEM OF QUADROPTER'S STABILIZATION OF ANGLE

I.B. Prokhorov¹, P.A. Grebenschikov², A.R. Mubarakshin³, D.A. Ahmetdinov⁴, V.S. Moiseyev⁵
^{1,2,3,4,5}Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

¹Цуа94prok@mail.ru

Аннотация. Для успешного управления мультироторным БПЛА автоматически или оператором необходимо построить САУ. Вид и структура САУ для таких аппаратов может быть различна. В статье рассматривается два вида регулятора угловой стабилизации – одного из нижних контуров САУ квадрокоптера, с целью их сравнения и выявления наиболее оптимального для решения поставленных задач.

Ключевые слова: САУ, квадрокоптер, стабилизация аппарата, БПЛА, ПИД.

Abstract. To successfully manage multirotor UAV automatically or operator needs to build ACS. The type and structure of the ACS for such devices may be different. The article deals with two types of angular stabilization control - one of the lower contours ACSquadropters in order to compare them and identify the most appropriate for the task.

Keywords: ACS, quadcopter, stabilization, UAV, PID.

Квадрокоптер является частным случаем беспилотных летательных систем мультироторного типа, имеющий в своей структуре 4 винтомоторных группы (ВМГ). Двигателями аппарата являются закрепленные на раме трехфазные синхронные двигатели переменного тока. На роторе закреплен воздушный винт с фиксированным шагом. В случае квадрокоптера четыре ВМГ закреплены симметрично по углам конструкции рамы. Схема представлена на рис. 1.

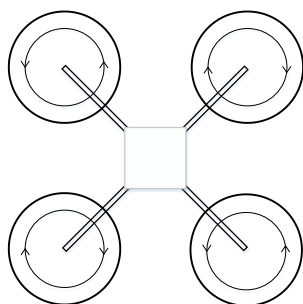


Рис. 1. Схема конструкции двигателей на раме квадрокоптера

Обязательным требованием конструкции данного вида аппарата является четное количество противоположно вращающихся ВМГ для компенсации их момента. Подъем или спуск аппарата осуществляется при одинаковом увеличении тяги всех ВМГ или уменьшении тяги соответственно. Горизонтальное перемещение аппарата в воздухе происходит за счет увеличения тяги двух противоположно вращающихся ВМГ и уменьшения тяги двух других, из-за чего происходит наклон аппарата в сторону перемещения (крен и тангаж). Поворот вокруг

вертикальной оси возможен при увеличении тяги одинаково вращающихся ВМГ и уменьшении тяги двух других (рыскание) [1]. Схема базовых перемещений показана на рис. 2.

Системы автоматического управления беспилотными мультироторными летательными аппаратами включают множество регуляторов, имеющих разную иерархию[2]. Например, регулятор позиции находится во внешнем контуре относительно регулятора скорости, а он в свою очередь будет внешним для регулятора тангажа и регулятора крена.

На рис. 3 изображен общий вид схемы САУ квадрокоптера. Оператор или программа может управлять любым из контуров, при этом вышестоящие контуры использоваться не будут, то есть оператор может не задавать позицию аппарата, а управлять непосредственно углом наклона, при этом требуется меньше данных с датчика, но сложность управления возрастает, и наоборот, если оператору необходимо обеспечить неподвижность аппарата при внешних возмущениях (ветер), то задействуется самый внешний контур (контур удержания позиции), но для его работы требуется еще больше данных о положении аппарата, что внесет дополнительную нагрузку на процессор.

В данной статье будет рассмотрен один из нижних по данной иерархии контуров, но в то же время самый трудно настраиваемый и зависимый от многих параметров аппарата – контур крена и тангажа, то есть контур угловой стабилизации. Задачей данной статьи является сравнение нескольких видов САУ с целью выбора наиболее подходящей для следующих параметров: качество переходного процесса (отсутствие перерегулирования, плавность, время переходного

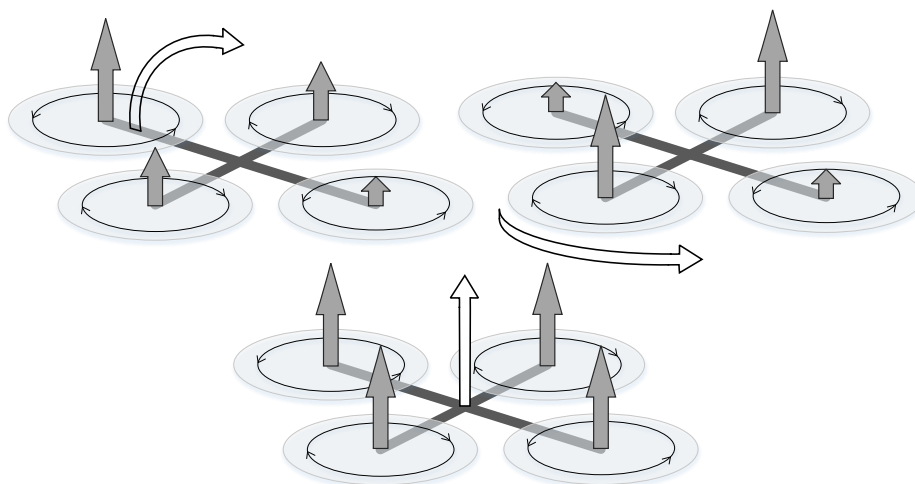


Рис. 2. Базовые перемещения квадрокоптера

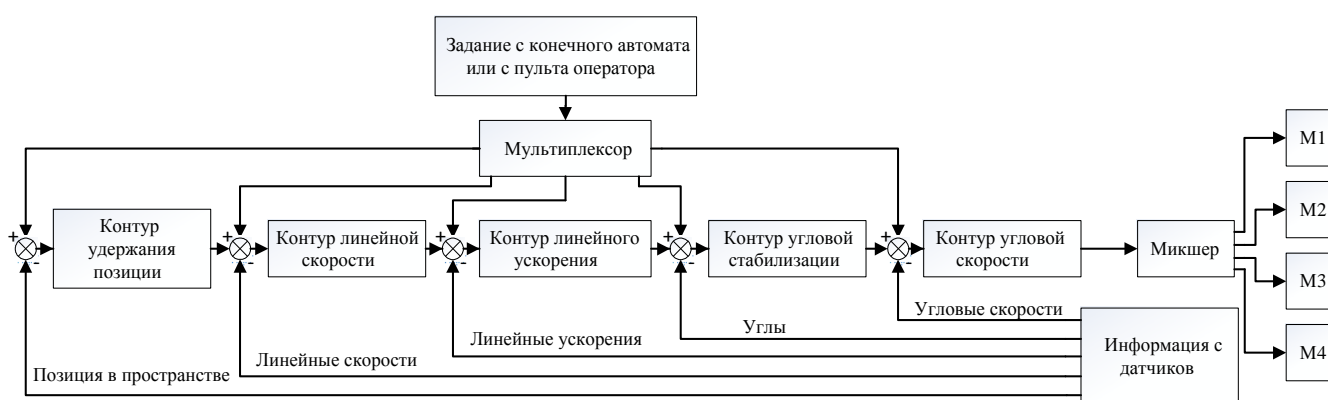


Рис. 3. Структурная схема САУ квадрокоптера

процесса), гибкость настройки, робастность, большой запас устойчивости по фазе и по усилению, экономичный расход аккумуляторной батареи.

Контур угловой стабилизации квадрокоптера должен обеспечивать необходимый угол наклона аппарата в воздухе. Сразу следует указать, что для разных целей аппарата нужно проводить настройку регулятора. В данной статье оптимальными параметрами настройки будут являться плавность, отсутствие перерегулирования резких скачков, которые вызывают быстрый разряд батареи.

Управляющее воздействие с регулятора поступает на т.н. микшер, задача которого распределить управляющее воздействие на каждый мотор. Структура микшера зависит от конструкции аппарата и числа ВМГ. Выход микшера поступает на преобразователь относительных единиц тяги в реальную тягу. Эти преобразователи несут одну из самых главных функций конструкции мультироторных беспилотных летательных аппаратов и занимают отдельную тему. Стоит лишь сказать, что перевод единиц относительной тяги в реальную происходит не в обороты, а в часть напряжения аккумулятора [3], то есть они не могут поддерживать обороты и соответственно тягу ВМГ. Для простоты понимания их можно представлять как некий ШИМ контроллер.

Далее будут рассмотрены две наиболее распространенные схемы реализации контура угловой стабили-

зации. Для моделирования и подробного сбора данных процесса угловой стабилизации был собран стенд, схема и фотография которого представлены на рис. 4 а) и б) соответственно.

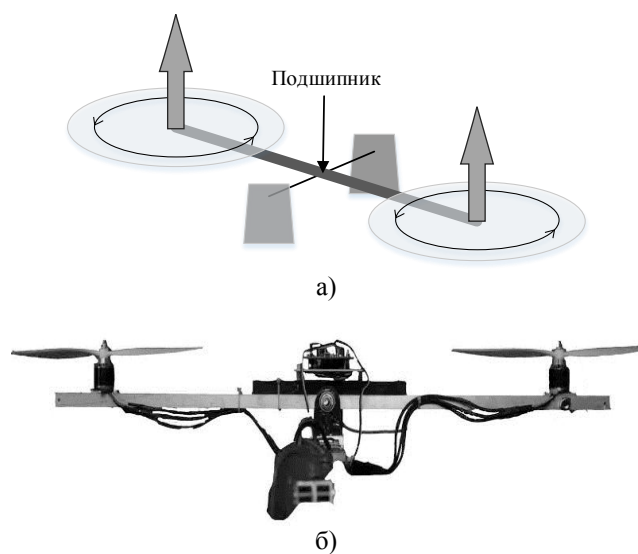


Рис. 4. Схема реального прототипа стенда для изучения САУ угловой стабилизации квадрокоптера (а) и его фотография (б)

Алгоритмы испытывались на расположенном в центре конструкции стенда контроллере STM32F407GV06 [4], написанные на языке программирования C++.

Одноконтурная САУ

Структурная схема одноконтурной САУ изображена на рис. 5.

Коэффициенты ПИД регулятора были настроены на середину тяги ВМГ, так как большинство маневров совершается именно в этом диапазоне.

Двухконтурная САУ

Структурная схема двухконтурной САУ изображена на рис. 6.

Внешним контуром является ПИ регулятор угла, выход которого соединен с входом ПИД регулятора угловой скорости, здесь имеет место принцип подчиненного регулирования. Дифференциальная составляющая ПИД регулятора угловой скорости пропускается через фильтр нижних частот, так как имеет высокочастотный шум.

Из преимуществ двухконтурного управления можно выявить: простоту настройки; возможность настройки как точности удержания самого угла, так и быстроты выставления этого угла; широкий диапазон возможных коэффициентов, при которых аппарат все еще стабилен.

Выводы

На рис. 7 показаны графики переходных процессов и ошибки двух реализаций контуров регулирования угловой стабилизации квадрокоптера.

Можно подумать, что одноконтурная САУ не настроена, но это не так. Настройка происходила опытным путем, были выбраны наиболее оптимальные коэффициенты. Также можно заметить, что дифференциальная составляющая привносит перерегулирование и нестабильность, однако при данной величине дифференциальной составляющей переходный процесс наиболее оптимален.

У каждой системы есть свои преимущества и недостатки. Однако главным критерием выбора той или иной системы является робастность и качество переходного процесса, а именно плавность, не скачкообразность, качество переходного процесса [5]. Поэтому для данного вида аппаратов следует выбирать двухконтурную САУ, так как она обладает более широким диапазоном коэффициентов регулирования как стабилизации самого угла, так и быстроты отработки контура.

Выбирая двухконтурную САУ угловой стабилизации квадрокоптера, уменьшаются явления, присущие одноконтурной САУ, а именно лишняя трата энергии аккумулятора и более быстрый износ двигателей, а также появляется больший запас устойчивости.

В дополнение можно отметить, что двухконтурная

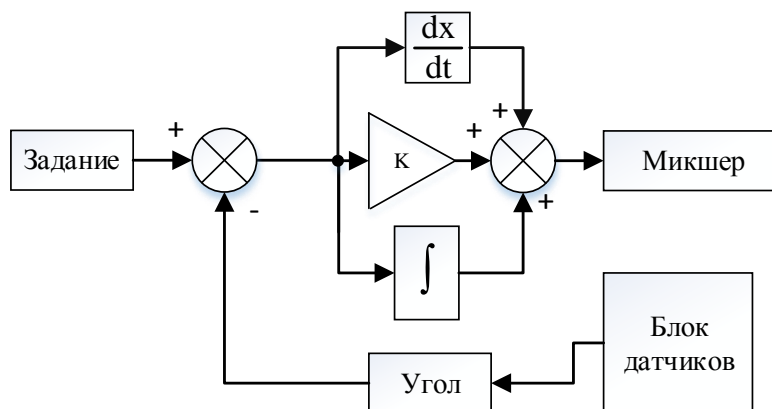


Рис. 5. Структурная схема одноконтурной САУ угловой стабилизации квадрокоптера

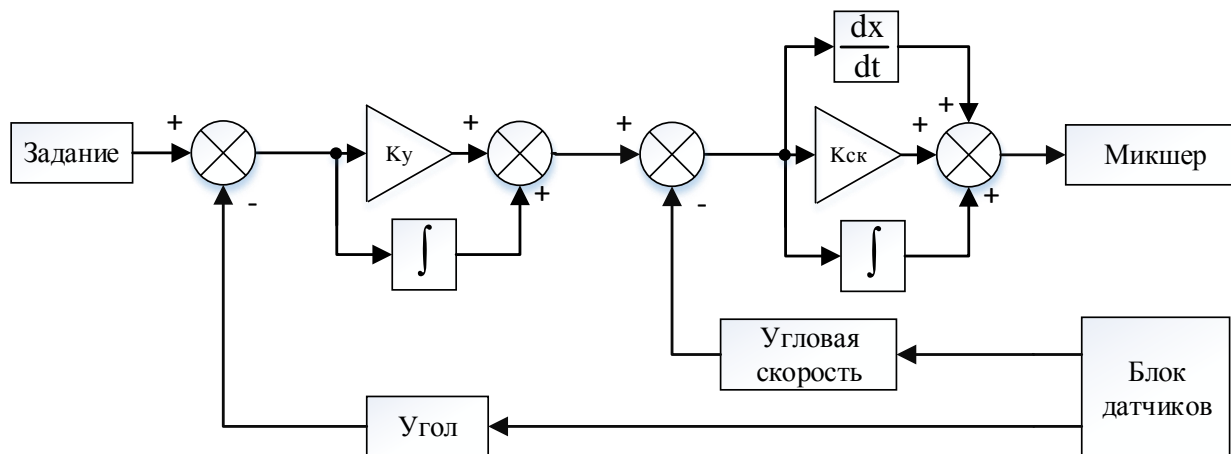


Рис. 6. Структурная схема двухконтурной САУ угловой стабилизации квадрокоптера

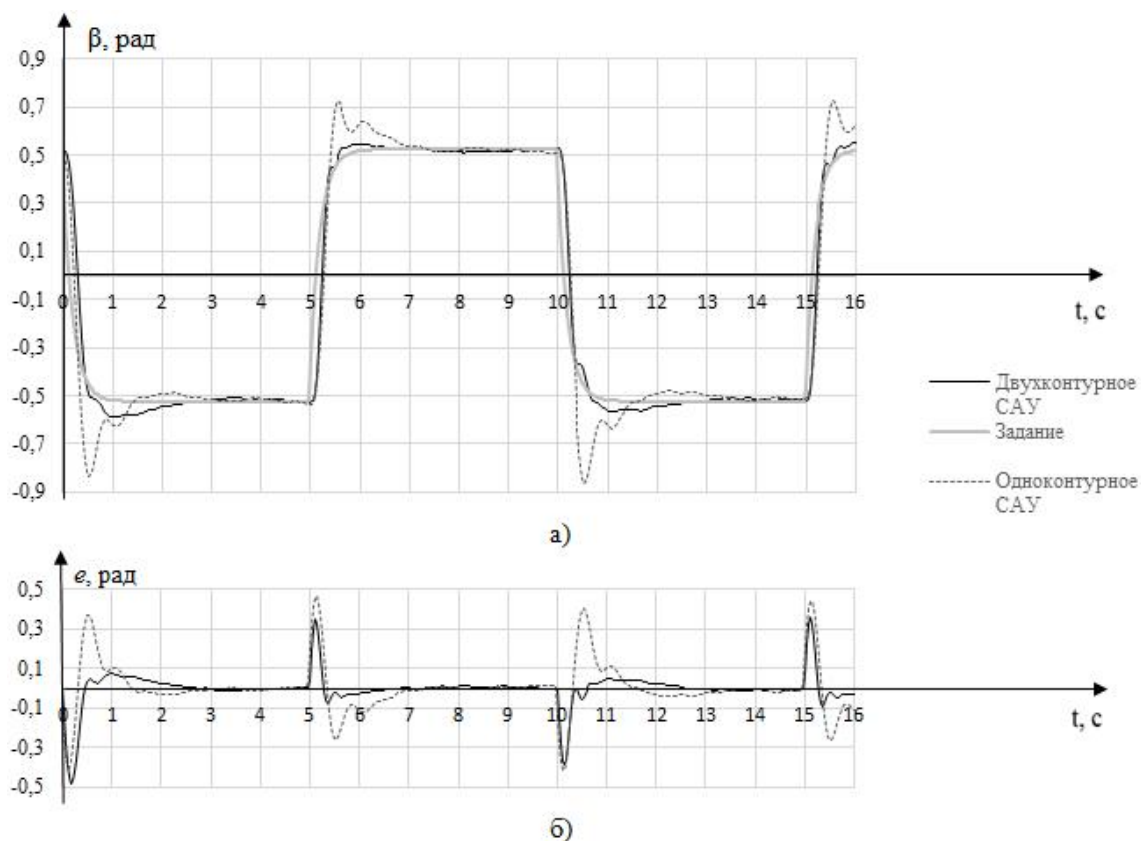


Рис. 7. Графики переходных процессов (а) и ошибок (б)

САУ гораздо лучше проявила себя при различных уровнях тяги ВМГ, что нельзя сказать об одноконтурной, которая при низком и высоком уровне тяги, становилась неустойчивой.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Pounds P.** Modelling and Control of a Quad-Rotor Robot / P. Pounds, R. Mahony, P. Corke // Proceedings of the Australasian Conference on Robotics and Automation. – 2006.
2. **Kivrak A.O.** Design of Control Systems for a Quadrotor Flight Vehicle equipped with inertial Sensors / A.O. Kivrak // Masters Thesis, Atilim University Turkey. – 2006.
3. **Nice E.B.** Design of a Four Rotor Hovering Vehicle / E.B. Nice // M.S. thesis, Cornell University. – 2003, - С. 57-62.
4. **STM32F407 Datasheet.** – 2015. – (<http://www.st.com/web/en/resource/technical/document/datasheet/DM00037051.pdf>).
5. **Pilz U.** Robust controller design for formation flight of quad-rotor helicopters / U. Pilz, A. P. Popov, H. Werner // 48th IEEE conference on decision and control, held jointly with the 28th Chinese control conference (CDC/CCC). – 2009, - С. 8322-8327.

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ МАШИНИСТОМ С ВОЗМОЖНОСТЬЮ АВТОВЕДЕНИЯ ПОЕЗДА

А.Ю. Заковоротный

Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт",
г. Харьков, Украина

INTELLECTUAL SYSTEM A DECISION SUPPORT MACHINIST WITH THE POSSIBILITY OF AUTOMATIC DRIVING THE TRAIN

A.Y. Zakovorotnyi

National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute", Kharkov, Ukrainian

arcade@i.ua

Аннотация. Для дизель-поездов разработана структура интеллектуальной компьютерной системы поддержки принятия решений машинистом. Система в реальном времени выдает машинисту закон управления поездом при котором соблюдается график движения и минимизируется расход топлива. Предлагаемая система может также осуществлять автоматическое управление дизель-поездом в реальных условиях эксплуатации.

Ключевые слова: система поддержки принятия решений машинистом, автоматическое управление дизель-поездом, минимизация расхода топлива.

Abstract. For diesel-trains designed structure intelligent computer decision support systems machinist. The system gives out in real time control law machinist the train where complied with the timetable and minimized fuel consumption. The proposed system can implement automatic control of a diesel-train in real conditions.

Keywords: decision support system machinist, automatic control of diesel-trains, minimizing fuel consumption.

Постановка проблемы и анализ литературы

Тяговый подвижной состав железных дорог является крупным потребителем топливно-энергетических ресурсов. Поэтому одной из основных задач, которая ставится перед научным сообществом, является создание и внедрение на железнодорожном транспорте специализированных систем, позволяющих оптимизировать энергопотребление подвижного состава. Решение этих проблем видится не только в техническом перевооружении и структурной перестройке железнодорожного транспорта при сохранении объёмов перевозок, но и в повышении эффективности его эксплуатации. В связи с этим разработана и внедрена на железнодорожном транспорте надежных энергосберегающих систем, автоматизирующих процесс управления подвижным составом является своевременной и актуальной задачей. При этом особое внимание уделяется внедрению бортовых интеллектуальной систем поддержки принятия решений, которые позволяют в реальных условиях эксплуатации подвижного состава формировать для машиниста рекомендации по управлению поездом, при которых соблюдается заданный график движения с минимальным расходом топливно-энергетических ресурсов.

В современных автоматизированных системах управления сложными техническими объектами управление процессами может осуществляться автоматически в реальном времени, без участия лица принимающего решения, которое, в свою очередь, непрерывно контролирует процесс управления объектом и подключается только при возникновении, так называемых, проблемных ситуаций [1 – 6].

При этом под проблемной ситуацией понимается ситуация, которая возникает в процессе управления, при воздействии возмущающих факторов, носящих случайный характер и имеющих широкий спектр отрицательных последствий. Как правило, выход из таких ситуаций не может быть выполнен без участия лица принимающего решения. Выбор конкретной альтернативы управления осуществляется при наличии информации о состоянии объекта и системы управления при наличии критериев, решающих правил и собственной системы предпочтений. При этом советчиком, лица принимающего решения, является интеллектуальная система поддержки принятия решений.

Из практики управления подвижным составом известно, что расход энергоресурсов локомотивом или дизель-поездом за поездку во многом зависит от машиниста. Опытные машинисты часто экономят до 10% энергоресурсов по сравнению с заданной нормой, однако существуют и бригады, которые не укладываются в установленные нормы. Это связано с тем, что машинист при ведении состава не только выполняет требования «маршрутных карт», которые рассчитываются с помощью специального метода тяговых расчетов [7, 8], но и использует свой опыт, позволяющий учитывать вес состава, тип и загрузку вагонов, профиль и состояние пути, скорость движения, погодные условия и т.д. Это приводит к необходимости синтеза новых систем автоматизирующих процесс управления железнодорожным транспортом.

При совершенствовании уже существующих или синтезе новых систем управления необходимо учитывать сложность объекта управления, которым является

тяговый подвижный состав железнодорожного транспорта, разнообразие условий его эксплуатации и существующие ограничения, накладываемые на работу тягового оборудования. Для учета перечисленных особенностей необходим анализ множества разнообразных факторов, начиная с типа тягового электропривода и заканчивая существующими методами оптимизации процессов управления и их критериями оптимальности. В работах [9 – 17] отмечается, что на сегодняшний день основным направлением при создании подобных систем управления железнодорожным транспортом, является использование в их структуре вычислительной техники и современных компьютерных технологий.

Бурное развитие микропроцессорных систем [12 – 14] позволяет реализовывать на их основе все более и более сложные алгоритмы управления тяговым подвижным составом. Так в работе [18] описывается аппаратура микропроцессорной системы управления и диагностики (МСУД), которая выполняет автоматическое управление электроприводом и электрическими аппаратами серийного электровоза в режимах тяги и торможения. Аппаратура МСУД построена на программных принципах обработки информации, поступающей от датчиков тока, скорости, узлов коммутации, сельсинов задатчиков тока и скорости, а также ряда дискретных сигналов состояния оборудования электровоза. Аппаратура МСУД состоит из трех контроллеров: центрального и двух технологических с разделенными функциями управления электрооборудованием, диагностики и возможностью передачи управления друг другу при реконфигурации в случае повреждения одного из контроллеров, а также двух блоков индикации на пультах машиниста.

Аппаратура МСУД позволяет реализовать на магистральном пассажирском электровозе режим автоведения. База данных для автоведения записывается в энергонезависимый накопитель МСУД и содержит информацию о профиле пути, действующих скоростных ограничениях на участке следования и графике движения. Для активизации режима автоведения достаточно ввести номер поезда, в составе которого следует электровоз, и включить режим автоведения. Режим автоведения обеспечивает движение по графику, выполнение всех ограничений скорости и минимизирует расход электроэнергии на тягу.

Однако подходы, реализованные в режиме автоведения рассмотренной МСУД, не предполагают, при изменении дорожной ситуации, считывания новых параметров движения с энергонезависимого накопителя информации или пересчета параметров движения подвижного состава в реальном времени. Это, в свою очередь, приводит к тому, что дальнейшее движение поезда по оставшемуся участку пути, будет далеко от оптимального и будет зависеть только от опыта и уровня квалификации машиниста.

В работе [19] рассмотрена структура автоматической системы управления (АСУ) «Локомотив» основным модулем которой, является аппаратно-программный комплекс (АПК) «Пилот». АПК «Пилот» состоящий из центрального блока управления (ЦБУ), который предназначен для сбора информации от дискретных, аналоговых и частотных датчиков и выдачи управляющего воздействия на исполнительные устройства, а также формирования сигналов для управления тиристорным преобразователем и

электронным регулятором частоты вращения вала дизеля. Еще одна функция блока – сохранение диагностической информации в сменной кассете. Имеются также два температурных измерителя, которые обеспечивают прием сигналов от датчиков температуры и передачу информации в ЦБУ. Температура измеряется для диагностики систем дизеля, а также для индикации состояния контролируемых сред на пульте машиниста.

Применение бортовых АПК «Пилот» приносит экономический эффект по таким позициям, как снижение расхода топлива на 8%, уменьшение расходов на ремонт тепловоза на 8%, повышение производительности тепловоза на 10%. Однако дополнительные возможности, связанные с экономией топлива за счет определения и реализации оптимальных законов управления подвижным составом в данном аппаратно-программном комплексе не реализованы.

В работах [20, 21] рассмотрены примеры применения на железных дорогах Германии и Японии бортовых компьютерных систем, оптимизирующих, по потреблению энергии, режимы вождения подвижного состава. Это становится возможным благодаря тому, что в системе моделируются многочисленные варианты движения поезда на рассматриваемом участке, для которых принимаются различные режимы ведения поезда и прогнозируется потребление энергии. В зависимости от потребления энергии производится отбор режимов, из которых выбирается оптимальный. Таким образом, рассмотренный метод позволяет выявить энергооптимальный режим ведения путем математической оценки случайно распределенных резервов времени и общего потребления энергии. Однако рассмотренные подходы, многократно проводимых последовательных расчетов и их математической оценки, являются не самыми лучшими при построении систем оптимального управления. Это связано, в первую очередь, с невысокой точностью результатов, получаемых с помощью подобного рода методов случайного поиска и многовариантных просчетов. Кроме того, полученные управления не учитывают особенности работы привода, который используется на локомотиве, в различных режимах его функционирования, что необходимо для выработки управляющих воздействий при оптимальном ведении подвижного состава. Как видно из вышеизложенного, созданию и внедрению, на тяговом подвижном составе, современных бортовых компьютерных систем управления и поддержки принятия решений уделяется большое внимание. Подобного рода системы представляют собой сложные технические объекты с высокоинтеллектуальными системами управления с применением программируемых микропроцессоров и ЭВМ, в которых используются передовые информационные технологии. Однако определение оптимальных законов управления подвижным составом в большинстве из них не рассмотрены, либо реализованы на базе многовариантных просчетов, на основе существующих тяговых расчетов, это связано, в первую очередь с тем, что проблема разработки и поиска оптимальных законов управления для тягового подвижного состава во многом не решена и по сей день. Таким образом, при разработке бортовой компьютерной системы управления и поддержки принятия решений, необходимо, с одной стороны, определение оптимальных законов управления движением подвижного состава, которые учитывают особенности работы используемого

привода, а с другой стороны, реализация возможности пересчета параметров движения подвижного состава в реальном времени.

Цель статьи – разработка структуры системы поддержки принятия решений машинистом, которая обеспечит управление дизель-поездом в реальном времени с минимальным расходом топлива при соблюдении заданного графика движения.

Основной раздел

При оптимальном ведении поезда по маршруту машинист должен учитывать множество различных факторов, к которым, в первую очередь, относится расписание движения, профиль железнодорожного пути, текущие погодные условия, параметры, характеризующие подвижной состав (вес состава, его загрузка и технические характеристики и т.д.), время, оставшееся для преодоления перегона, текущую скорость движения, а также различные ограничения, принятые как для всего маршрута следования состава так и для конкретного участка пути (если они существуют). При этом опытный машинист может определить, с одной стороны, необходимую в текущий момент времени позицию контроллера машиниста, а с другой стороны, будущую стратегию управления подвижным составом, т.е. будущую последовательность переключений тягового и тормозного контроллера машиниста. В этом машинисту поезда помогает маршрутная карта движения состава, которая рассчитана заранее для каждого

железнодорожного перегона, согласно существующего графика движения и определенных погодных условий. Однако при возникновении в процессе движения подвижного состава ситуаций, которые существенно отличаются от принятых при расчете маршрутной карты и ведущих к отклонению от рассчитанного графика движения по перегону, карта становится практически бесполезной, а оставшийся путь, до конечного пункта назначения, машинист дизель-поезда выполняет, основываясь на своем опыте.

Кроме этого, возникновение непредвиденных ситуаций ведет и к отклонениям в системе ориентиров, которыми пользуется машинист при штатном ведении дизель-поезда по данному участку железнодорожного пути. В связи с этим необходимым является оперативный пересчет маршрутной карты во время движения состава, с текущего места на железнодорожном перегоне до конечного пункта назначения с учетом изменившихся условий движения поезда, оставшегося времени по расписанию, а также минимизации расхода энергоресурсов.

Для обеспечения этого поезд должен быть снабжен бортовой компьютерной интеллектуальной системой поддержки принятия решений машинистом (ИСППРМ) (рис. 1), которая бы выдавала машинисту необходимую информацию для оптимального ведения подвижного состава, в частности, законы переключения позиций тягового и тормозного контроллеров машиниста.

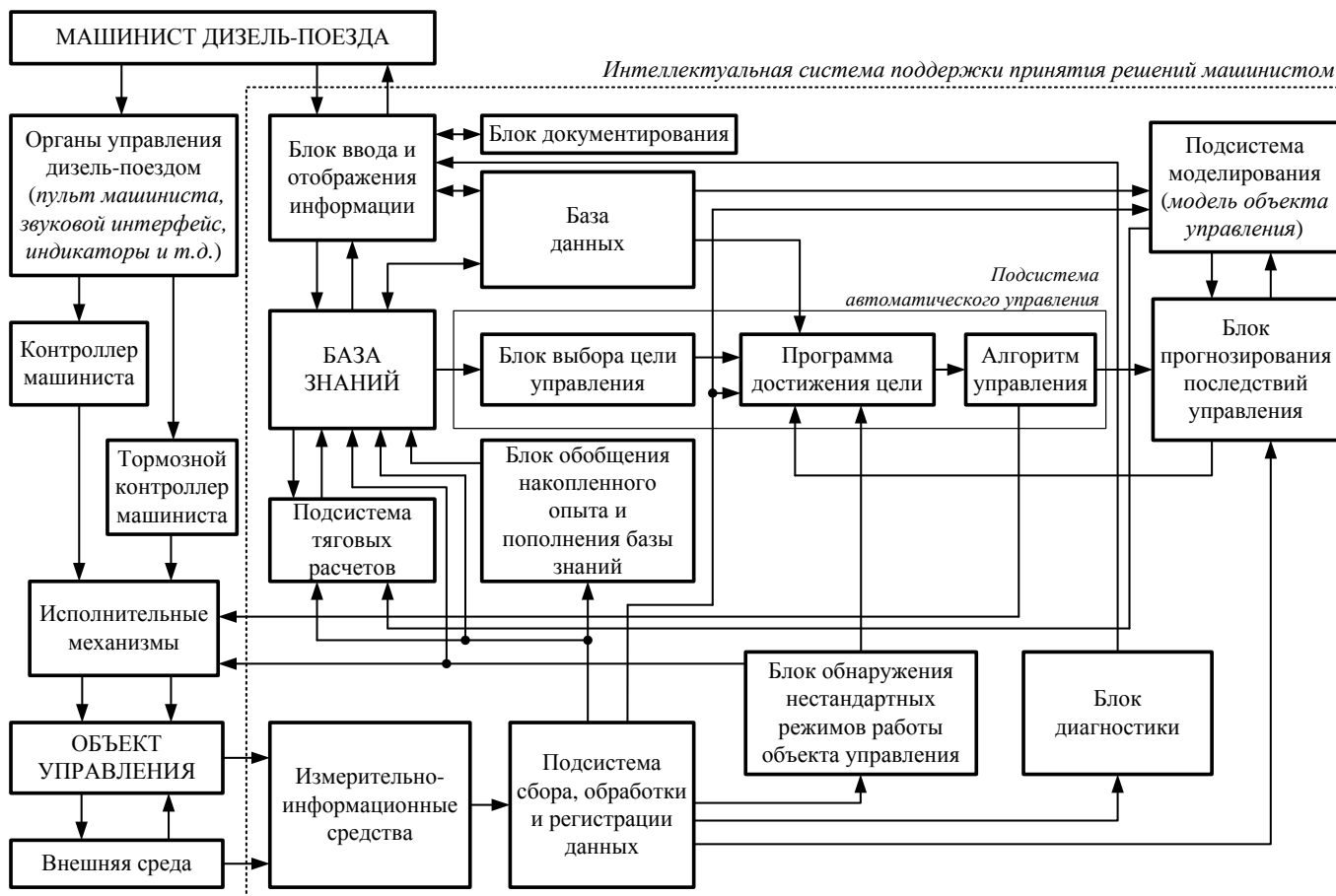


Рис. 1. Структура интеллектуальной системой поддержки принятия решений машинистом дизель-поезда

Для этого структура ИСППРМ должна содержать как минимум:

- блок ввода и отображения информации в каждой из двух кабин дизель-поезда, куда входит экран дисплея вывода данных и устройство ввода;
- базу знаний, хранящую электронные маршрутные карты движения по всем перегонам маршрута;
- базу данных, хранящую дополнительную информацию об объекте управления, параметрах и маршрутах движения, расписании и т.д.;
- подсистемы тяговых расчетов на основе алгебраических и дифференциальных моделей движения составов, позволяющие пересчитывать, в случае необходимости, электронную маршрутную карту движения;
- подсистему сбора, обработки и регистрации данных (ПСОРД);
- измерительно-информационные средства;
- блок обобщения накопленного опыта и пополнения базы знаний;
- блок обнаружения нестандартных режимов работы объекта управления;
- блок прогнозирования последствий управления;
- подсистему моделирования;
- блок диагностики;
- блок документирования;
- подсистему автоматического управления, которая должна включать в себя блок выбора цели управления, программу достижения цели и алгоритм управления.

Одним из основных элементов, входящих в структуру ИСППРМ, является база знаний. Она осуществляет компактное хранение информации о программной траектории движения поезда и электронных маршрутных картах движения подвижного состава, которые рассчитаны заранее для всех перегонов маршрута с учетом расписания, возможных погодных условий, а также возможных ограничений по скорости и времени. Эти данные необходимы машинисту при движении поезда из начального в конечный пункт назначения по заданному перегону железнодорожного пути с соблюдением определенного графика движения подвижного состава при текущих погодных условиях. Заполнение базы знаний осуществляется электронными маршрутными картами, с одной стороны, рассчитанными в подсистеме тяговых расчетов с помощью алгебраических и дифференциальных моделей движения составов, которые хранятся в подсистеме моделирования, а с другой стороны, полученными от блока обобщения накопленного опыта и пополнения базы знаний, который берет информацию из ПСОРД в виде данных о поездках опытных машинистов. При этом база знаний обеспечивает пополнение хранимой информации без потерь или искажения уже запомненных ранее данных, а также хранить: номер и длину перегона, время и скорость движения по перегону, профиль пути, режим ведения подвижного состава, имеющиеся ограничения и т.д. Для устранения влияния изменяющихся условий внешней среды, которые ведут к нарушению графика движения подвижного состава, ИСППРМ должна позволять оперативно пересчитывать траектории движения подвижного состава из текущего положения на перегоне до конечного пункта назначения на основе метода тяговых расчетов при каждом изменении дорожной ситуации. Расчет основных параметров движения подвижного со-

става (силы тяги, подведенной и полезной мощности, тягового момента, силы сопротивления движению и т.д.), на основании которых осуществляется расчет программной траектории движения поезда, а значит и электронной маршрутной карты, должен вестись с использованием реального значения тягового момента, величина которого снимается непосредственно с объекта управления с помощью ПСОРД, что в значительной степени повышает точность проводимых расчетов. При этом маршрутные карты, полученные в результате работы подсистемы тяговых расчетов, запоминаются в имеющейся базе знаний и могут использоваться в последующем при ведении подвижного состава в подобных условиях поведения внешней среды.

ПСОРД, заложенная в структуру ИСППРМ, в реальном времени производит опрос датчиков и устройств системы управления с помощью измерительно-информационных средств, принимает текущее значение сигналов управления, выполняет предобработку, масштабирование и фильтрацию сигналов, а также нормализацию и преобразование данных в формат, соответствующий физическим сигналам, протекающим в объекте управления. К данным, поступающим на входы ПСОРД, относятся действующие и активные токи двигателя, напряжения генераторов и выпрямителей, частоты оборотов дизеля и частоты вращения роторов всех четырех двигателей дизель-поезда, а также температуры двигателей и генераторов. Наряду с этим ПСОРД перенаправляет поступающие в неё сигналы другим блокам, которые входят в структуру ИСППРМ. Так, с одной стороны, реальные значения тяговых моментов двигателей дизель-поезда, которые снимаются с объекта управления, передаются подсистеме тяговых расчетов, для осуществления более точных вычислений, а с другой стороны, значения полученных фазовых координат поступают на вход подсистемы моделирования в математическую модель тягового асинхронного привода, на основании которых осуществляется уточнение и подстройка управляющих воздействий на объект управления, в следствие чего достигается оптимизация расхода топлива. При этом ПСОРД позволяет передавать при необходимости полученную информацию для хранения в имеющуюся базу знаний через блок обобщения накопленного опыта и пополнения базы знаний, который также входит в состав структуры ИСППРМ и позволяет фиксировать и сохранять в виде маршрутной карты действия машиниста по переключению контроллеров дизель-поезда, при ведении подвижного состава по различным перегонам заданного маршрута. Кроме того, переменные, снимаемые с реального объекта, поступают на блок обнаружения нестандартных режимов работы объекта управления для выявления и борьбы с такими процессами как буксование и юз, также и на блок диагностики, для контроля параметров работы объекта управления, и блок прогнозирования последствий управления, для проверки оптимальности выбранного алгоритма управления в подсистеме автоматического управления на основе данных о текущем состоянии управляемого объекта. Наряду с этим текущие параметры погодных условий передаются из ПСОРД непосредственно в базу знаний, для выбора соответствующей электронной маршрутной карты движения по заданному перегону.

В состав ИСППРМ входит и подсистема моделирования с математической моделью движения дизель-поезда, представленной в линейной канонической форме Бруновского, которая получена с помощью геометрической теории управления, и используется для определения оптимальных, с точки зрения расхода топлива, управляющих воздействий [22 – 24]. Математическая модель объекта управления работает на основании данных, получаемых от ПСОРД, которые, в свою очередь, представлены в виде реальных значений фазовых координат, на основании которых формируются уточнённые управляющие воздействия. Подсистема моделирования, имитирующая поведение реального объекта может выступать, как агент данных о состоянии объекта на этапах тестирования и настройки ИСППРМ, а также может быть использована совместно с блоком прогнозирования последствий управления для предсказания последствий применения управляющих воздействий, полученных в результате работы подсистемы автоматического управления на основе данных о текущем состоянии управляемого объекта, которые поступают от ПСОРД, а также данных хранящихся в базе данных.

База данных осуществляет хранение информации об объекте управления, параметрах и маршрутах движения, расписании, а также о всех машинистах, закрепленных за данным поездом. Кроме того, она хранит данные, поступающие в процессе работы от машиниста, объекта управления и от самой ИСППРМ.

Подсистема автоматического управления включает в себя блок выработки цели управления, программу достижения цели, а также блок выбора алгоритма управления. Данная подсистема для конкретного участка маршрута и расписания следования состава реализует оптимальный с точки зрения расхода энергии алгоритм управления подвижным составом на основании знаний, хранящихся в базе знаний и информации из базы данных. При этом обязательно проводится проверка адекватности выбранного алгоритма управления с помощью блока прогнозирования последствий управления и подсистемы моделирования. В случае прохождения данной проверки выбранный алгоритм применяется для автоматического управления подвижным составом через соответствующие исполнительные механизмы, а в случае не прохождения – изменяется или модифицируется, и снова проходит повторную проверку.

Блок обнаружения нестандартных режимов работы объекта управления включает в себя устройства для выявления и защиты от таких процессов как буксование и юз. При этом для обнаружения буксования и юза выполняется вычисление разницы частот вращения тяговых двигателей и потребляемых токов каждым из двигателей, а также значения производных частот вращения и потребляемых токов. При обнаружении буксования в процессе разгона поезда система с помощью исполнительных механизмов удерживает напряжение питания соответствующих тяговых асинхронных двигателей на уровне, который соответствовал моменту обнаружения буксования за счет чего происходит подавление его развития. В свою очередь, при обнаружении юза в процессе торможения противоюзное устройство, входящее в структуру блока обнаружения нестандартных режимов работы объекта управления, с помощью исполнительных механизмов

переводит соответствующий двигатель из генераторного режима в режим тяги до прекращения юза, т.е. пока частота его вращения не станет соответствовать частоте, предшествующей юзу.

Блок диагностики осуществляет тестирование исполнительных устройств и механизмов, датчиков и подсистем, а также выдачу диагностической информации в подсистему визуализации данных блока ввода и отображения информации.

Блок ввода и отображения информации выполняет функции визуального представления данных, поступающих от ИСППРМ и предназначенных для машиниста дизель-поезда, а также для ввода информации, необходимой для работы ИСППРМ.

Энергонезависимый блок документирования ИСППРМ выполняет функцию записи и хранения текущей информации о характеристиках всего дизель-поезда, отдельных систем и агрегатов, параметрах движения во время поездки, а также диагностической информации, которая может быть использована при проведении работ по техническому обслуживанию подвижного состава.

Выводы

Для дизель-поездов разработана структура бортовой интеллектуальной компьютерной системы поддержки принятия решений машинистом, которая в реальном времени выдает машинисту дизель-поезда необходимую информацию для ведения подвижного состава по перегону. ИСППРМ на основе специализированной базы знаний и подсистемы тяговых расчетов определяет приближенные управления подвижным составом на заданном маршруте, которые уточняются с помощью вспомогательной математической модели объекта – системы линейных обыкновенных дифференциальных уравнений в форме Бруновского, полученной на основании геометрической теории управления путем динамической линеаризацией исходной нелинейной модели. ИСППРМ позволяет в реальных условиях эксплуатации подвижного состава и текущего изменения дорожной обстановки выдавать машинисту закон управления, при котором соблюдается график движения при минимальном расходе топливо-энергетических ресурсов, а также осуществлять автоматическое управление дизель-поездом.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Асратян, Р.Э.** Распределенная интегрированная информационная система поддержки принятия решений / Р.Э. Асратян, А.Д. Козлов, В.Н. Лебедев, И.Н. Мараканов // Проблемы управления. – 2004. – №2. – С. 14-20.
2. **Виссия, Х.** Модели, алгоритмы и технология интеллектуализации принятия решений на основе предметных коллекций / Х. Виссия // Автореферат дисс. ... канд. техн. наук. – Минск: БГУ. – 2012. – 24 с.
3. **Кузнецов, М.А.** Современная классификация систем поддержки принятия решений / М.А. Кузнецов, С.С. Пономарев // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2009. – № 3. – С. 52-58.
4. **Лычкина, Н.Н.** Имитационные модели в процедурах и системах поддержки принятия стратегических решений на предприятиях / Н.Н. Лычкина // Бизнес-информатика. – 2007. – №1. – С. 29-35.

5. **Моргунов, Е.П.** Система поддержки принятия решений при исследовании эффективности сложных систем: принципы разработки, требования и архитектура / Е.П. Моргунов // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М.Ф. Решетнева. – 2007. – №3. – С. 59-63.
6. **Сороколетов, П.В.** Построение интеллектуальных систем поддержки принятия решений / П.В. Сороколетов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2009. – № 4. – С. 117-124.
7. **Осипов, С.И.** Основы тяги поездов. Учебник для студентов техникумов и колледжей железнодорожного транспорта / С.И. Осипов, С.С. Осипов. – М.: УМК МПС России. – 2000. – 592 с.
8. **Кузьмич, В.Д.** Теория локомотивной тяги / В.Д. Кузьмич, В.С. Руднев, С.Я. Френкель // Учебник для вузов ж.-д. транспорта. – М.: Маршрут. – 2005. – 448 с.
9. **Скалозуб, В.В.** Ресурсосберегающие методы управления тягой поездов и совершенствование конструкции подвижного состава: дис. ... доктора техн. наук: 05.22.07 / В.В. Скалозуб. – Днепропетровск, 2003. – 533 с.
10. **Скалозуб, В.В.** Модели и методы компромиссно-оптимальных режимов движения поезда / В.В. Скалозуб // Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Днепропетровск, 2002. – Вип. 3. – С. 137-146.
11. **Скалозуб, В.В.** Оптимизация режимов ведения поездов на основе непрерывного динамического программирования / В.В. Скалозуб, К.И. Железнов // Математичне моделювання. – Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2002. – № 2. – С. 32-36.
12. **Горбунов, Н.Н.** Улучшение тягово-тормозных свойств локомотивов за счет применения микропроцессорных систем / Н.Н. Горбунов, А.Л. Кашура, В.И. Спиригин и др. // Перспективні задачі інженерної науки. – Днепропетровск: GAUDEAMUS, 2002. – Вип. 4. – С. 168-172.
13. **Абрамов, В.М.** Повышение надежности и перспективы развития микропроцессорных систем управления и обеспечения безопасности движения поездов / В.М. Абрамов, Л.А. Мугинштейн, Б.Д. Никифоров и др. // Вестник ВНИИЖТ. – 2002. – № 5. – С. 9-14.
14. **Жуковский, В.И.** Об одной особенности «многокритериальных» дифференциальных игр / В.И. Жуковский // Кибернетика и системный анализ. – 2002. – № 3. – С. 181-188.
15. **Могилевкин, И. М.** Транспорт и коммуникации: прошлое, настоящее, будущее / И. М. Могилевкин. – М.: Наука, 2005. – 357 с.
16. **Корниенко, В.В.** Высокоскоростной электрический транспорт. Мировой опыт / В.В. Корниенко, В.И. Омельяненко. – Х.: НТУ «ХПИ», 2007. – 159 с.
17. **Horstmann, D.** 100 Jahre Entwicklung der Antriebs-technik für elektrische Bahnen. Teil 2 / Daniel Horstmann, Rudolf Wagner, Wolf-Dieter Weigel // Elek. Bahnen. – 2003. – № 7. – P. 338-345.
18. **Бадьян, И.П.** Аппаратура микропроцессорной системы управления и диагностики электровоза / И.П. Бадьян // Железнодорожный транспорт. – 2000. – № 4. – С. 48-52.
19. Пат. 116114 Российская Федерация, МПК В61L. Микропроцессорная система управления и диагностики локомотива / Федоров Е.В.; заявитель и патентообладатель ООО «Центр инновационного развития СТМ»; заявл. 7.11.2011; опубл. 20.05.2012; Бюл. № 23.
20. **Töpfer, C.** Optimierung Kompetenz des Zugs anhand Bordscomputers / C. Töpfer // Eisenbahningenieur. – 1998. – № 2. – P. 68-70.
21. **Киселёв, И.П.** Краткий обзор истории высокоскоростных поездов в Японии / И.П. Киселёв. Железные дороги мира. – 2005. – № 7. – С. 7-16.
22. **Дмитриенко, В.Д.** Моделирование и оптимизация процессов управления движением дизель-поездов / В.Д. Дмитриенко, А.Ю. Заковоротный. – Х.: Изд. центр «НТМТ», 2013. – 248 с.
23. **Дмитриенко, В.Д.** Математическая модель для исследования и оптимизации электропривода дизель-поезда / В.Д. Дмитриенко, А.Ю. Заковоротный // Электротехнические системы и комплексы. – Магнитогорск, 2014. – № 1(22). – С. 35 – 40.
24. **Дмитриенко, В.Д.** Автоматизация процессов преобразования нелинейных моделей к эквивалентным линейным в форме Бруновского / В.Д. Дмитриенко, А.Ю. Заковоротный // Вісник НТУ «ХПИ». Збірник наукових праць. Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ «ХПИ». – 2014. – № 62 (1104). – С. 22 – 37.

**ОБЗОР ПРИБОРОВ МАГНИТНОЙ СТРУКТУРОСКОПИИ СТАЛИ
В ПРОКАТНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ****И.Г. Самарина¹, В.Э. Каюмова²**^{1,2}ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»,
г. Магнитогорск, Россия**INSTRUMENT OVERVIEW STRUCTURESCOPY MAGNETIC
STEEL ROLLING INDUSTRY*****I.G.Samarina¹, V.E. Kayumova²***^{1,2}Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia¹ig_samarina@inbox.ru

Аннотация. Описан принцип работы, устройство, назначение и технические характеристики приборов, реализующих импульсный метод магнитной структуроскопии. Рассмотренные приборы позволяют обеспечить требуемый уровень качества выпускаемой продукции в технологическом потоке производства.

Ключевые слова: магнитный метод, неразрушающий контроль, механические свойства, ИМПОК, ИМА, КИПФ.

Abstract. The principle of operation, the structure, the purpose and technical characteristics of instruments implementing the pulsed method of magnetic structurescopy. Created instruments allow to provide the required level of product quality in technological line.

Keywords: magnetic method, non-destructive testing, mechanical properties, ИМОС, ИМА, КИПФ.

Надежность и долговечность машин и механизмов в значительной степени определяется механическими свойствами и структурой используемых материалов. Оперативный контроль этих свойств без повреждения изделий при достаточной производительности может быть осуществлен только неразрушающими методами [1].

Большинство свойств сталей и сплавов определяется их внутренним строением. Имея достоверные методы определения внутреннего строения сталей, можно оценить различные физико-механические характеристики стальных изделий [2].

Магнитные свойства чувствительны к изменениям, происходящим в фазовом и химическом составах, структурном и напряженном состояниях сталей и сплавов. Поэтому высокая чувствительность магнитных свойств к указанным факторам стала основой для создания научного направления магнитного структурно-фазового анализа [3].

В основе магнитной структуроскопии лежит наличие корреляционных связей между магнитными свойствами и структурными параметрами или прочностными характеристиками материала изделий [1].

В зависимости от решаемых задач неразрушающего контроля, марки контролируемого материала, требуемой производительности метода могут использоваться различные первичные параметры. К наиболее распространенным параметрам относятся: коэрцитивная сила, намагниченность, остаточная ин-

дукция, магнитная проницаемость, напряженность и напряженности эффекта Баркгаузена [4].

Наибольшее применение в практике неразрушающего контроля структуры и механических свойств получили остаточная намагниченность B_r и коэрцитивная сила H_c [5].

В данной работе рассмотрены особенности построения и возможности применения приборов магнитной структуроскопии в цехах ОАО «ММК».

Для контроля основных механических свойств металла на входе и выходе агрегата непрерывного горячего оцинкования (АНГЦ-1) ОАО «ММК» установлены приборы ИМПОК-1Б (импульсный магнитный поточный контролер).

Поточный контролер ИМПОК-1Б предназначен для автоматического неразрушающего контроля механических свойств листового проката низкоуглеродистых сталей толщиной 0,15 – 12 мм, движущегося в технологическом потоке производства со скоростью 0,1 – 5 м/с. Возможен контроль ряда среднеуглеродистых и низколегированных холоднокатаных и некоторых горячекатаных сталей.

Принцип работы заключается в периодическом локальном намагничивании движущегося листового проката с двух сторон намагничивающими соленоидными 1, представлено на *рис. 1*. Соленоиды создают импульсные магнитные поля, нормальные составляющие которых направлены навстречу друг другу. Далее измеряются максимальные значения градиентов напряженности поля

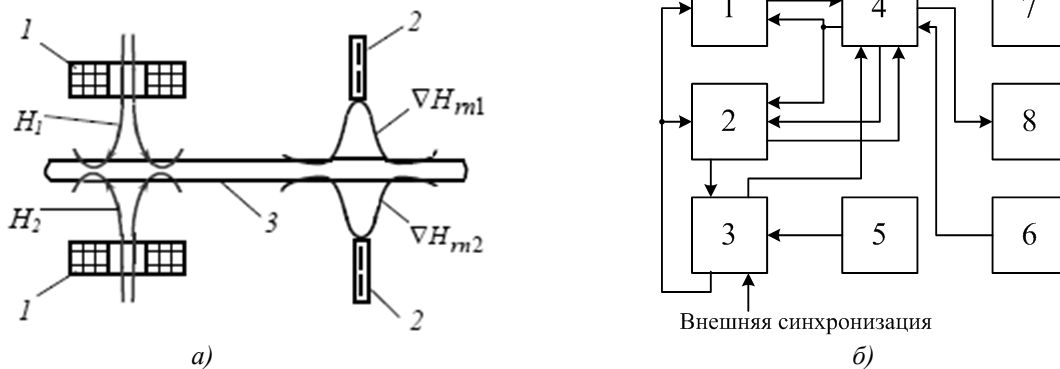


Рис. 1. Расположение чувствительного элемента и функциональная схема установки ИМПОК:

- а) 1 – намагничивающие соленоиды, 2 – феррозонды-градиентометры, 3 – движущийся лист, H_1 и H_2 – силовые линии магнитного поля встречно включенных соленоидов, ∇H_{m1} и ∇H_{m2} – градиенты нормальных составляющих напряженности поля остаточной намагниченности**
б) 1 и 2 – преобразователи; 3 – блок генератора; 4 – блок измерительный; 5 – датчик скорости; 6 – имитатор; 7 – самописец; 8 – внешний измеритель тока

остаточной намагниченности ∇H_r с обеих сторон движущегося проката, с помощью феррозондов-градиентометров 2 и усредняются (определяется среднее арифметическое или среднее геометрическое) [6]. Механические свойства проката определяются по корреляционным связям с усредненными значениями измеренных градиентов в соответствии с ГОСТ 30415-96.

Для низкоуглеродистых холоднокатаных сталей установка обеспечивает контроль: твердости от 30 до 100 единиц по шкале HRB30/100; предела текучести от 20 до 75 кГс/мм²; предела прочности от 20 до 85 кГс/мм²; относительного удлинения от 2 до 50, а также контроль глубины лунки по Эриксену и другое.

В настоящее время специалистами ЦЛК ОАО «ММК» определены эмпирические зависимости [7], которые связывают показания прибора с физическими величинами, определяющими механические свойства полосы. В процессе эксплуатации используется несколько зависимостей. Например, уравнение регрессии для определения твердости марки стали 08ПС толщины 0,5 мм (в единицах по Брюнелю):

$$d4 = 41,43 - 7 \cdot 10^{-4} IMP - 10,818[Mn],$$

где IMP – показание прибора, А/м²; [Mn] – процентное марганца в стали.

А уравнение для определения предела текучести, МПа:

$$Gt = 283,69 + 128 \cdot 10^{-4} IMP - 54,753.$$

Коэффициент корреляции между показаниями ИМПОК и механическими характеристиками стали достигает 90%.

Установка ИМПОК позволяет осуществлять неразрушающий контроль механических свойств и структуры листового проката сталей толщиной до 12 мм в процессе его движения в технологическом потоке со скоростью до 25 м/с.

Для контроля механических свойств готовой продукции производства ЭСПЦ в ЛПЦ № 4, 7 был внедрен прибор КИПФ-1 [8]. В качестве первичного параметра в

приборе используется коэрцитивная сила H_c .

Для холодно- и горячекатаного проката низкоуглеродистых и среднеуглеродистых сталей наблюдается надежная корреляция между коэрцитивной силой H_c и прочностными характеристиками металла, как показано на рис. 2а.

Принцип действия коэрцитиметра КИПФ (рис. 2б и в) основан на намагничивании и перемагничивании изделия с помощью приставного П-образного электромагнита и измерении тока (пропорционального коэрцитивной силе H_c) перемагничивания в момент равенства нулю магнитного потока. Размагниченное состояние определяется по отсутствию магнитного потока, что фиксируется рамочным феррозондом, встроенным в перемычку П-образного электромагнита [5].

Замена прямых измерений механических свойств массово изготавливаемых изделий неразрушающим методом с помощью коэрцитиметра КИПФ-1 позволяет экономить металл, повысить производительность труда при контроле, гарантировать качество изделий.

Еще один прибор для измерения градиента напряженности остаточной намагниченности на ЛПЦ №8 и АНГЦ ОАО «ММК» применяется импульсный магнитный анализатор типа ИМА [1].

Локальное намагничивание контролируемого изделия в этих приборах осуществляется посредством разряда батареи конденсаторов на малогабаритный соленоид, устанавливаемый своим торцом на объект контроля. Измерение градиента нормальной составляющей намагниченности поля остаточной намагниченности осуществляется с помощью феррозонда-градиентометра, расположенного внутри намагничивающего соленоида на его оси в области однородного поля.

Принцип работы приборов типа ИМА рассмотрим на примере прибора ИМА-4М, устройство преобразователя и структурная схема которого представлена на рис. 3.

Приборы серии ИМА позволяют решить широкий круг задач магнитной структуроскопии: контроль качества термообработки, механических свойств и структуры изделий из низкоуглеродистых и слаболегированных сталей толщиной от 0,15 до 30 мм после техноло-

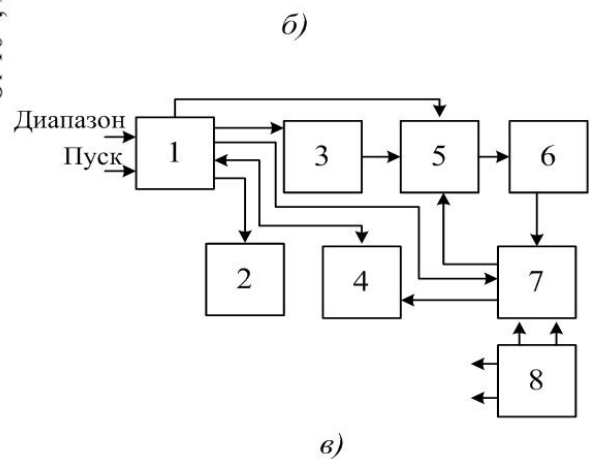
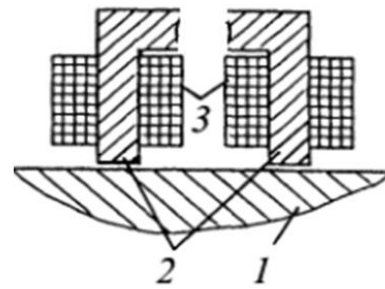
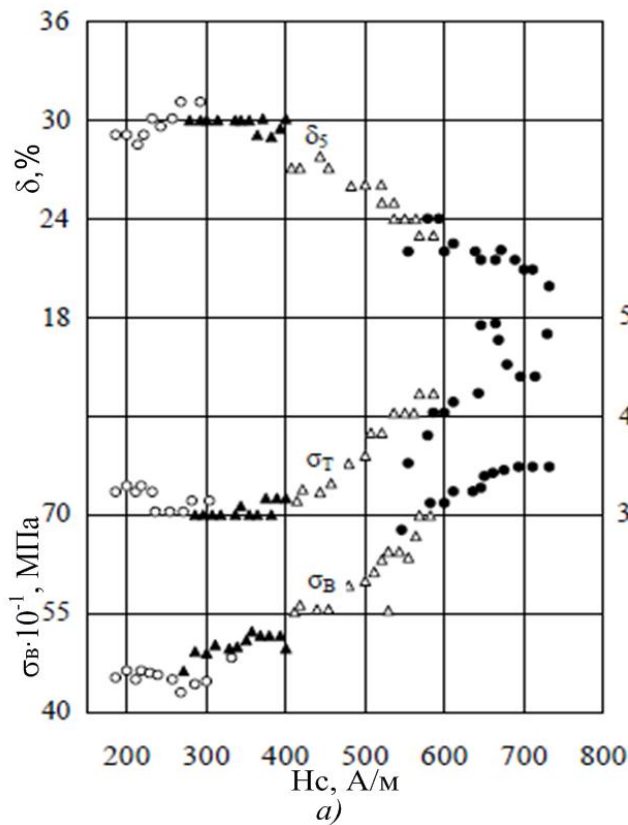


Рис. 2. Принцип работы коэрцитиметра КИПФ-1

а) корреляция прочностных свойств и относительного удлинения сталей марок 10(○), 20 (▲), 35 (Δ) и 45 (●) с коэрцитивной силой; б) преобразователь: 1 – контролируемый участок металла; 2 – полюсы приставного электромагнита; 3 – намагничивающая катушка; в) структурная схема: 1 – блок управления; 2 – блок индикации; 3 – блок намагничивания; 4 – аналого-цифровой преобразователь; 5 – преобразователь; 6 – блок обработки сигнала; 7 – блок размагничивания; 8 – блок питания

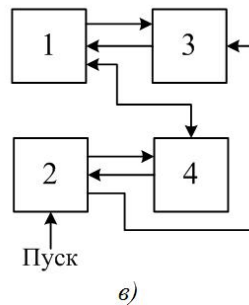
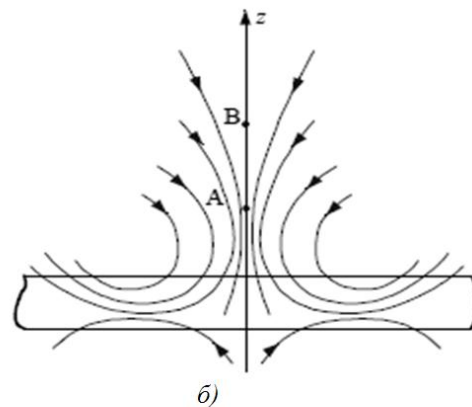
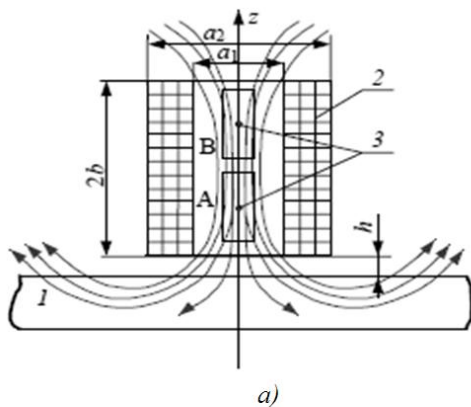


Рис. 3. Принцип устройства преобразователя и функциональная схема прибора ИМА-4М:

а) 1 – контролируемое изделие; 2 – намагничивающий соленоид; 3 – феррозонд-градиентометр; a_1 и a_2 – внутренний и внешний диаметр; $2b$ – длина соленоида; б) распределение поля остаточной намагниченности после локального намагничивания; в) 1- преобразователь; 2- блок управления; 3- блок измерения; 4 – блок намагничивания

гического отжига. Приборы могут также применяться для сортировки сталей по маркам и для контроля уровня остаточной намагниченности изделий.

Заключение

Контроль механических свойств металлопроката проводится разрушающими и неразрушающими методами (НМК).

Недостатки разрушающих методов испытаний, выборочность, трудоемкость, продолжительность изготовления и испытаний, потери металла и электроэнергии, исключаются при внедрении неразрушающих методов контроля.

Применение приборов НМК контактного (ИМА, КИПФ) и бесконтактного типа (ИМПОК), позволяет проводить контроль магнитных параметров в автоматическом режиме и оценивать уровень механических свойств по всей длине полосы металлопроката. А так же снизить трудоемкость и сократить продолжительность испытаний, уменьшить потери металла на отборе проб.

Эффективность НМК определяется большим числом факторов, главными из которых являются: выявление дефектов [9-16], производительность, оперативность, безопасность и стоимость.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Матюк, В.Ф.** Приборы магнитной структуроскопии на основе локального однополярного импульсного намагничивания / В.Ф. Матюк // *Неразрушающий контроль и диагностика: Электронный научно-практический журнал* – Минск: Диатех. 2012. № 2. – С. 29-64.
2. **Клюева, В.В.** Неразрушающий контроль. Справочник: В 7т. Кн. 1: Магнитные методы контроля / В.В. Клюева, В.Ф. Мужижский, Э.С. Горкунов, В.Е. Щербинин – М.: Машиностроение, 2004. – 832 с.
3. **Клюева, В.В.** Неразрушающий контроль. Справочник / В.В. Клюева – М.: Машиностроение, 1995. – 487 с.
4. **Артемов, В.А.** Современные аспекты оборудования для магнитной структуроскопии / В.А. Артемов, А.С. Бакунов, Д.А.Кудрявцев // *Дефектоскопия* – Екатеринбург: Российская академия наук. 2011. №3. – С. 17-27.
5. **Матюк, В.Ф.** Контроль структуры, механических свойств и напряженного состояния ферромагнитных изделий методом коэрцитиметрии / В.Ф. Матюк, В.Н. Кулагин // *Неразрушающий контроль и диагностика: Электронный научно-практический журнал* – Минск: Диатех. 2010. № 3. – С. 4-14.
6. **Государственный реестр средств измерений** – онлайн просмотр реестров СИ, Госреестр средств измерений. Режим доступа свободный: <http://reestr.si.ru/>
7. **Иванова, Л.С.** Опыт применения установки ИМПОК-1Б в линии агрегата непрерывного горячего цинкования цеха покрытий ОАО «ММК» / Л.С. Иванова, В.И. Белякова, В.Л. Корнилов, В.Ю. Божевалев, Ф.Ц. Капцан // *Вестник МГТУ им. Г.И. Носова: научный рецензируемый журнал* – Магнитогорск: ФГБОУ ВПО «МГТУ». 2007. №2. – С. 52-54.
8. **Иванова, Л.С.** Внедрение неразрушающего магнитного контроля механических свойств готовой продукции производства ЭСПЦ в ЛПЦ №4, 7 / Л.С. Иванова // *Бюллетень «Черная металлургия»*. 2008. №6. – С.80-81.
9. **Самарина, И.Г.** Анализ причин появления дефектной продукции на агрегате непрерывного горячего цинкования / И.Г. Самарина // *Автоматизированные технологии и производства: сб. научн. тр. - Магнитогорск: ФГБОУ ВПО «МГТУ»*. 2014. Вып.6 – С.105-109.
10. **Рябчиков, М.Ю.** Изучение режимов нагрева стальной полосы в протяжной печи башенного типа для светлого отжига / М.Ю.Рябчиков, И.Г. Самарина // *Металлообработка*. 2013. -№ 1 (73). -С. 43-49.
11. **Рябчиков, М.Ю.** Использование модели нагрева полосы при управлении температурным режимом в протяжной печи башенного типа / М.Ю. Рябчиков, Б.Н. Парсункин, С.М. Андреев, Н.А. Головкин // *Нейрокомпьютеры: разработка, применение*. 2011. - № 5. -С. 41-50.
12. **Рахманов, С.Н.** Совершенствование системы управления нагревом полосы на агрегате непрерывного горячего оцинкования с целью снижения количества производимой дефектной продукции / С.Н. Рахманов, А.Д. Гурьянов, М.Ю. Рябчиков // *Актуальные проблемы современной науки, техники и образования*. 2011. -№ 2. -С. 33-35.
13. **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*. 2012. № 4. С. 81-97.
14. **Андреев, С.М.** Концепция нейросетевой системы управления многозонными нагревательными устройствами протяжного типа / С.М. Андреев, Б.Н. Парсункин, М.Ю. Рябчиков, В.Н. Целых // *Электротехнические системы и комплексы*. 2007. № 14. С. 344-351.
15. **Полько, П.Г.** Алгоритм нечеткого управления для синтеза цифровых контуров автоматической стабилизации технологических параметров / П.Г. Полько, О.С. Логунова, Е.С. Рябчикова, М.Ю. Рябчиков, С.М. Андреев, Б.Н. Парсункин // *Автоматизация в промышленности*. 2010. № 11. С. 32-37.
16. **Павлов, А.С.** Прогнозирование производства дефектной продукции агрегатом непрерывного горячего цинкования ОАО ММК с помощью нейросетевой модели процесса нагрева металла / А.С. Павлов, М.Ю. Рябчиков, Е.С. Михальченко // *Электротехнические системы и комплексы*. 2009. № 17. С. 135-139.

СИНТЕЗ ПОКАЗАНИЙ ДВУХ ДАТЧИКОВ НА ПРИМЕРЕ ВЫСОТОМЕРА

И.Б.Прохоров¹, П.А. Гребенщиков²

^{1,2}ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»,
г. Магнитогорск, Россия.

SENSOR FUSION FOR EXAMPLE ALTITUDE

I.B.Prokhorov¹, P.A. Grebenschikov²

^{1,2}Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

¹ Ilya94prok@mail.ru

Аннотация. Для наиболее достоверного знания физической величины в ряде ситуаций данных полученных с одного датчика недостаточно, в виду его недопустимого шума или точности, в таких случаях можно использовать синтез двух и более одинаковых датчиков, шум сигнала, полученного усреднением данных, будет определяться количеством датчиков. Однако, в ряде случаев датчики по своей физической природе имеют недостаточную точность, и предыдущий метод будет не эффективен. В данной статье будет рассмотрен подход синтеза показаний двух разных по своей природе датчиков, для нахождения наиболее достоверной искомой физической величины. Данный метод хорошо себя зарекомендовал в некоторых технических задачах, таких как – навигация, ориентация тела в пространстве и многих других в виду своей простоты и эффективности.

Ключевые слова: ориентация в пространстве; навигация; акселерометр; барометр; фильтр высоты.

Abstract. For the most authentic knowledge of the physical quantity in some situations data obtained from a single sensor is insufficient, since it unacceptable noise or precision, in such cases, you can use the synthesis of two or more of the same sensor, the noise signal obtained by averaging the data will determine the number of sensors. However, in some cases, the sensors on the physical nature are not sufficiently accurate, the previous method will not be effective. This article will consider the approach of synthesis of two different readings on the nature of sensors to find the most trustworthy desired physical quantity. This method is well-proven in some of the technical challenges, such as: - navigation, the orientation of the body in space, and many other means of its simplicity and effectiveness.

Keywords: spatial orientation; navigation; accelerometer; barometer; filter height.

Во многих технических задачах и сферах требуется знать некую физическую величину для дальнейшего управления, диагностирования, либо для правильного формирования технологического процесса. В большинстве случаев достаточно использовать специализированные для этих задач датчики, однако в ряде некоторых задач датчики, непосредственно измеряющие данную величину, либо слишком дороги, либо не подходят для выполнения задачи, в виду своей точности, габаритов и т.д. Множество решений основаны на простом усреднении показаний одинаковых датчиков, либо задании веса каждому датчику в суммарном сигнале. Эти методы позволяют избавиться от белого шума, присутствующем в каждом датчике, однако увеличить точность таким образом не получится. Очевидно, что наиболее точная информация о физической величине будет получена, если использовать разные по природе датчики, косвенные данные могут существенно увеличить точность.

В данной статье рассматривается два наиболее простых метода получения наиболее достоверной информации физической величины на основе слияния показаний нескольких разных по природе датчиков на примере нахождения высоты объекта, на котором установлены датчики.

В качестве датчиков решено использовать микромеханический 16-ти разрядный 3-х осевой цифровой

акселерометр MPU6050 фирмы Inven Sense[1] и воздушный барометр BMP180 от BOSCH[2].

В качестве платформы для изучения данной темы был выбрана отладочная плата с микроконтроллером STM32F407VG6 Discovery [3]. Язык написания алгоритма C++.

Барометр осуществляет измерение воздушного давления и преобразовывает его в высоту относительно уровня моря, однако точность данного датчика $\pm 1,0$ м [2]. Величина высоты, полученная с помощью датчика, покоящегося на столе, показана на рис. 1.

Как видно из рис.1, в значении высоты присутствует шум. Точность полученного сигнала мала.

Акселерометр позволяет измерять ускорение. Для получения позиции объекта с установленным акселерометром, следовало бы дважды проинтегрировать полученное ускорение, но такой метод будет работать всего несколько секунд, пока накопленная ошибка слишком мала, из-за присутствующих в сигнале шумов и несовершенства микромеханических акселерометров. Так как акселерометр показывает не только линейные ускорения тела, но и ускорение свободного падения, то для нахождения позиции следует вычитать ускорение свободного падения из вертикальной оси акселерометра. Величина высоты, полученная с помощью покоящегося акселерометра, показана на рис. 2.

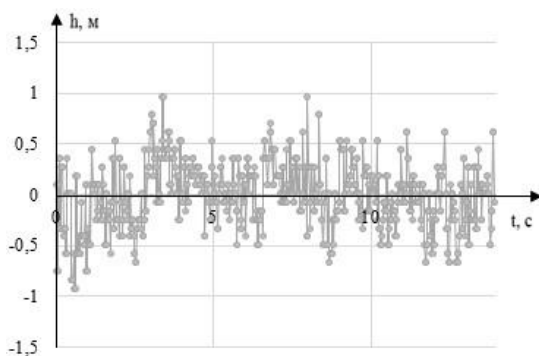


Рис. 1. График величины относительной высоты, полученной с помощью барометра

Из рис.2 видно, что величина высоты медленно «уплывает» от истинного значения, т. е. присутствует постоянное увеличение смещения. Также видно, что шума нет, значит, точность достаточно высока.

Из анализа поведения данных датчиков можно сделать вывод, что у обоих датчиков есть свои преимущества и недостатки: у барометра – на выходе имеется абсолютная величина высоты, но присутствует высокий уровень шума; у акселерометра – высокая точность, но постепенный уход от реальной величины. Используя преимущества обоих датчиков, можно получить наиболее достоверную информацию о высоте.

Рассмотрим наиболее простой способ, т.н. комплементарный фильтр. Очевидно, что акселерометр может показывать быстрые небольшие перемещения, а барометр – наоборот достоверен в больших медленных перемещениях, где относительный уровень шума мал.

Метод заключается в разделении частотных областей влияния датчика на конечную величину высоты. Акселерометр занимает высокочастотную область ЛАЧХ, а барометр - низкочастотную. Структурная схема фильтра показана на рис. 3.

Показания барометра следует пропустить через фильтр нижней частоты (ФНЧ) чтобы избавиться от шума. Ускорения, полученные с акселерометра, следует проинтегрировать и пропустить через фильтр верхней частоты (ФВЧ) дважды, пропуская тем самым, только малые быстрые перемещения и не давая пройти накопленному постоянному смещению[4]. Суммируя обе ветки схемы, получаем более точную информацию о высоте, чем датчики в отдельности. На рис. 4 показаны небольшие перемещения объекта с датчиками и полученная с помощью комплементарного фильтра величина высоты. Штриховая линия – реальное значение высоты, сплошная – значение, полученное с помощью датчиков. Коэффициенты фильтров были подобраны эмпирическим путем с учетом частоты работы алгоритма (600 Гц).

Из рис.4 видно, что отсутствует такой большой уровень шума как на показаниях с одного барометра, и нет сильного смещения от реальной высоты, но точность до сих пор недостаточна.

Рассмотрим второй метод синтеза показаний двух датчиков. Можно заметить, что постоянное смещение позиции полученной с помощью акселерометра можно компенсировать с помощью показаний барометра. В качестве основного датчика можно использовать акселерометр, а референсной системы – барометр. Данный фильтр построен на базе ПИ регулятора. Функциональная схема фильтра изображена на рис. 5.

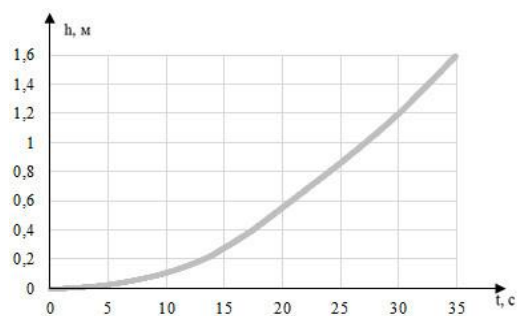


Рис. 2. График величины относительной высоты, полученной с помощью акселерометра

Схема несколько усложняется, однако данный подход позволяет наиболее точно получать данные о высоте. На рис. 6 показан график фильтра на основе ПИ регулятора и комплементарного фильтра с эмпирически подобранными коэффициентами.

На рис.6 сплошной черной линией показан фильтр на основе ПИ регулятора, сплошной серой – комплементарный фильтр, тонкой прерывистой – показания барометра.

Из графика видно, что фильтр на основе ПИ регулятора меньше подвержен искажениям и больше отображает реальную ситуацию.

За рамками статьи осталось то, как подключать датчики к микроконтроллеру, их настройка и первичная обработка, исходный код на языке программирования C++.

Оба метода применяются на практике в летательных аппаратах мультироторного типа, не только для нахождения высоты, но также для позиционирования и для ориентации в пространстве в более сложном виде, но с подобной основой алгоритма [5].

ЛИТЕРАТУРА

1. **MPU-6050 Datasheet.** – 2011. – Режим доступа: <http://www.cdiweb.com/datasheets/invensense/PS-MPU-6000A.pdf>.
2. **BMP180 Datasheet.** – 2013. – Режим доступа: <http://www.adafruit.com/datasheets/BST-BMP180-DS000-09.pdf>.
3. **STM32F407 Datasheet.** – 2015. – Режим доступа: <http://www.st.com/web/en/resource/technical/document/datasheet/DM00037051.pdf>.
4. **Tseng S. P.** Motion and Attitude Estimation Using Inertial Measurements with Complementary Filter / S. P. Tseng, W. L. Li, C.Y. Sheng, J.W. Hsu // Control Conference (ASCC). – 2011, - С. 863-868.
5. **Kodgirwar, V. P.** Design of Control System for Quadcopter using Complementary Filter and PID Controller / V. P. Kodgirwar, V. Kumar, M. Shegokar, S. Sawant // International Journal of Engineering Research & Technology. – 2014, - №3.
6. **IMU Data Fusing: Complementary, Kalman, and Mahony Filter.** – 2013. – Режим доступа: <http://www.olliw.eu/2013/imu-data-fusing>.

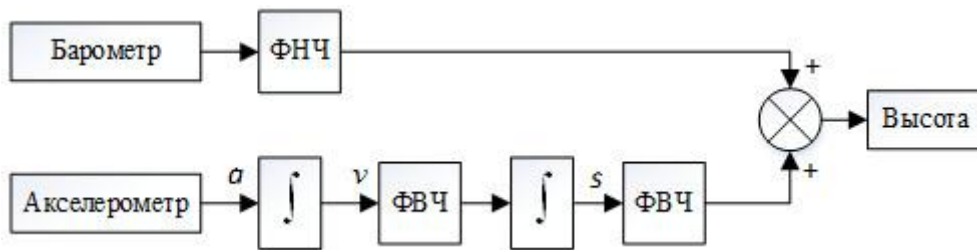


Рис. 3. Структурная схема комплементарного фильтра

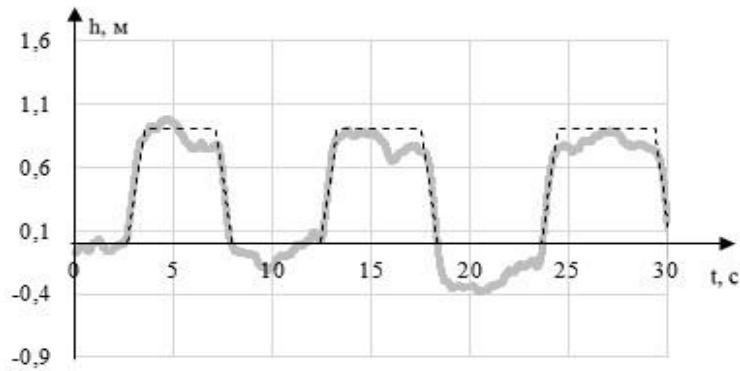


Рис. 4. График высоты, полученной с помощью комплементарного фильтра

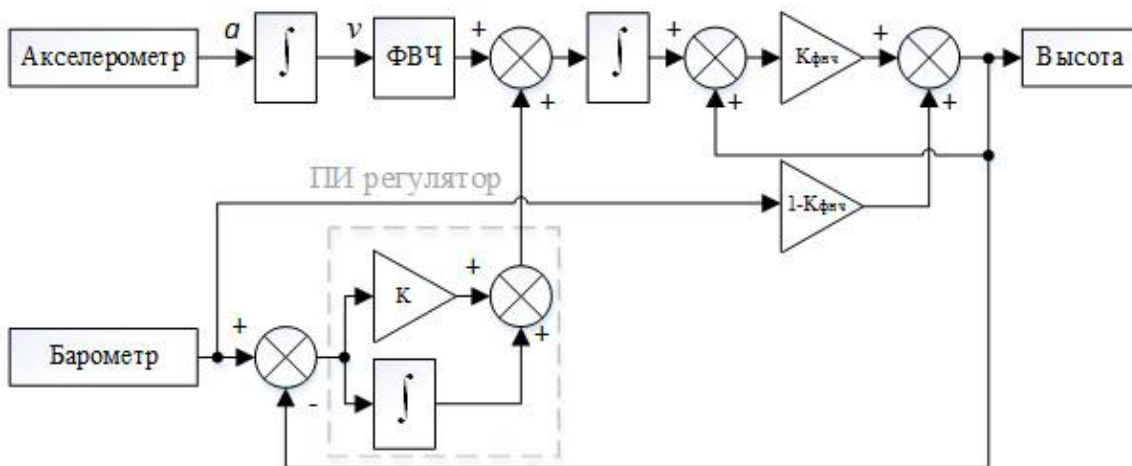


Рис. 5. Структурная схема фильтра на основе ПИ регулятора

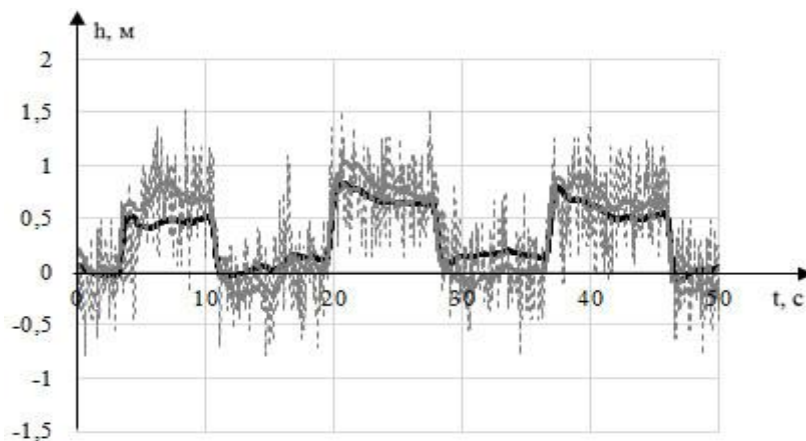


Рис. 6. График высоты, полученной с помощью фильтра на основе ПИ регулятора и комплементарного фильтра

