

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПРОИЗВОДСТВА

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПРОИЗВОДСТВА

№1 (27) декабрь 2023 г.

Международный научно-технический журнал

Учредитель: ФГБОУ ВО «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 производствами, практическому применению современных методов управления. Освещаются вопросы, связанные с моделированием систем управления, разработкой промышленных тренажеров и стендов для проведения научных исследований и испытаний. Приоритетным направлением журнала является освящение 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; обработка данных, информационное и программное обеспечение автоматизированных систем управления; автоматизированные технологии в образовании; математическое моделирование технологических систем и объектов управления; автоматизация контроля и испытаний; математические модели процессов в металлургии.

Редакция и редакционный совет

Редакционный совет

Председатель редакционного совета:

Лисиенко Владимир Георгиевич - Вице-президент Академии инженерных наук, президент регионального Уральского отделения Академии инженерных наук, доктор технических наук, профессор ФГАОУ ВО Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия

Заместитель председателя редакционного совета:

Парсункин Борис Николаевич - доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВО Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия

Члены редакционного совета:

Сарваров Анвар Сабулханович - доктор технических наук, профессор (МГТУ им. Г.И. Носова)

Карандаев Александр Сергеевич - доктор технических наук, профессор (МГТУ им. Г.И. Носова)

Логунова Оксана Сергеевна - доктор технических наук, профессор (МГТУ им. Г.И. Носова)

Спирин Николай Александрович - доктор технических наук, профессор (УрФУ)

Ишметьев Евгений Николаевич - доктор технических наук (ЗАО «КонСОМ СКС»)

Редакция

Главный редактор:

Андреев Сергей Михайлович – доктор технических наук, доцент

Ответственный редактор

Самарина Ирина Геннадьевна

Контакты

Главный редактор: Андреев Сергей Михайлович
Тел.: (3519) 29-85-27
Редакционная коллегия: Самарина Ирина Геннадьевна
Тел.: (3519) 29-85-58
E-mail: atp@magtu.ru

Адрес редакции: 455000, г. Магнитогорск,
пр. Ленина, 38.
E-mail: atp@magtu.ru
Выходит в свет 06.2023.

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

Математическое моделирование технологических систем и объектов управления

Д.В. Нужин, С.М. Андреев

Исследование влияния соседних зон на температуру греющей среды пятой зоны методической печи прокатного стана 3

И.П. Попов

Учет мгновенных значений момента синхронной электрической машины при реактивной нагрузке для целей САПР автоматизированного привода 11

Системы автоматизации и управления

А.А. Дубровская, К.В. Абрамкин, И.Г. Самарина

Система автоматического регулирования температуры в методической печи мелкосортного стана 250 14

Т.Г. Сухоносова, М.А. Бузмаков, В.В. Чернов, Д.Д. Филатов

Определение динамических параметров объекта в контуре автоматического регулирования с исполнительным механизмом постоянной скорости 18

Автоматизация технологических процессов

В.А. Максимов, Е.Ю. Мухина

Система автоматического управления вращающейся печью 23

Технические средства автоматизации

И.П. Попов

Автостабилизация угловой скорости: кинематика 27

Краткие сообщения

Т.Г. Сухоносова

Итоги универсиады «Путь к успеху» по метрологии и средствам измерения по направлению «управление в технических системах» 2023 30

Mathematic and simulation of control systems and objects

D.V. Nuzhin, S.M. Andreev

Research of the influence of neighboring zones on the heating medium temperatures of the fifth zone of the methodical furnace of the rolling mill 3

I.P. Popov

Account of instant values of torque of synchronous electric machine under reactive load for the purposes of CAD automated drive 11

Control System

A.A. Dubrovskaya, K.V. Abramkin, I.G. Samarina

Temperature control system in the heating furnace of the rolling mill 250 14

T.G. Sukhonosova, M.A. Buzmakov, V.V. Chernov, D.D. Filatov

Determination of the dynamic parameters of an object in the control loop with constant-speed actuator 18

Process Automation

V.A. Maksimov, E.Yu. Mukhina

Automatic control system of the rotating furnace 23

Automation equipment

I.P. Popov

Autostabilization of angular velocity: kinematics 27

Brief messages

T.G. Sukhonosova

Results of the Universiade «Way to Success» in metrology and measuring means in the direction «management in technical systems» 2023 30

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ

Оформление

Научные статьи, направляемые для публикации в журнал, **должны содержать**: название статьи; - сведения об авторах (Фамилия, Инициалы; место работы, город, страна; электронный адрес), количество авторов - не более 5; аннотацию в объеме от 100 до 250 слов; перечень ключевых слов или фраз в объеме не более 7; список литературы, не менее 8 ссылок. В случае представления статьи на русском языке указанные выше пункты должны быть представлены также и в англоязычном варианте. Если в оригинале статья написана на английском языке, то дополнительно эти сведения рекомендуется привести на русском языке.

Статью следует набирать в шаблоне, представленном на информационной станции портала ФГБОУ ВО "МГТУ" www.magtu.ru (раздел "Автоматизированные технологии и производства").

Рекомендуемая структура статьи: УДК. Аффiliation (фамилии авторов и место их работы). Название статьи. Аннотация. Ключевые слова. Введение. Методы исследования. ... Результаты. Заключение. Источник финансирования (при необходимости). Список литературы. Информация на английском (аффiliation, аннотация, ключевые слова, список литературы).

При оформлении статьи рекомендуется придерживаться следующих правил:

Объем рукописи статьи, оформленный в соответствии с приведенными требованиями, не должен превышать: обзорной статьи более 10 страниц; статьи более 6 страниц; краткого сообщения более 2 страниц.

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

Размерности величин выбираются и обозначаются согласно ГОСТ 8.417-2002.

В сопровождение рукописи статьи авторами должны быть направлены на официальный адрес электронной почты редакции журнала, следующие документы: **экспертное заключение** о возможности опубликования в открытой печати (цветной скан в формате PDF). Работы, выполненные авторами в инициативном порядке, представления экспертного заключения не требуют; **сведения об авторах** (Фамилия Имя и Отчество полностью, ученая степень и ученое звание, место работы, город, страна, электронный адрес) с указанием одного из авторов, который будет взаимодействовать с редакцией.

Пример оформления

УДК 681.5.015.32

ДОСТОВЕРНОЕ И ОПЕРАТИВНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ УПРАВЛЯЕМОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПРИ ИНТЕНСИВНЫХ ВОЗМУЩЕНИЯХ

Б.Н. Парсункин¹, Т.Г. Сухоногова²

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

² tgobuhova@gmail.com

Аннотация. В работе рассмотрена математическая модель программной реализации достоверного и оперативного метода определения значений динамических параметров управляемого технологического процесса для определения динамических параметров настройки микропроцессорных контуров управления в условиях интенсивного негативного воздействия технологических и организационных возмущений, характерных для реального производства. Эффективное решение поставленной задачи обеспечивается использованием уникальных свойств ортогональных функций Уолша, позволяющих формирование таких планов тестирующих воздействий, которые полностью компенсируют негативное влияние возмущающих воздействий на интегральную оценку отклика (реакцию) управляемого параметра на тестирующее входное воздействие. Использование предлагаемого метода особенно целесообразно при решении многих практических задач, когда необходимо получать достоверные результаты в условиях действия различных возмущающих факторов влияющих на точность определяемого параметра.

Ключевые слова: динамические параметры объекта управления, определение параметров объекта, функция Уолша, компенсация возмущений, тестирующие воздействия, интегральная оценка.

Введение

При адаптации современного микропроцессорного регулирующего комплекса (МРК) к управляемому технологическому процессу приоритетной задачей является оперативное и достоверное определение динамических параметров объектов управления: коэффициента передачи объекта $K_{об}$, постоянной

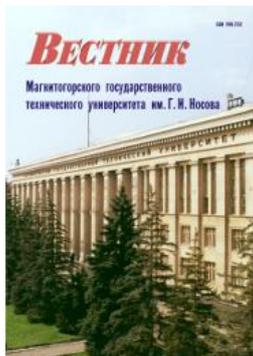
Например, кривые разгона по температуре поверхности нагреваемой заготовки в первой сварочной зоне методической печи №1 стана 2500 ОАО «ММК» (до реконструкции) при различных величинах расхода природного газа во второй сварочной зоне представлены на рис. 1. [2]. Динамические параметры, полученные при обработке экспериментальных кривых разгона на рис. 1 представлены в табл. 1. В зависимости от условий работы

Предоставление материалов

Для опубликования статьи в журнале необходимо представить в электронном виде по e-mail: atp@magtu.ru текст статьи, сведения об авторах и экспертное заключение о возможности опубликования.

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.

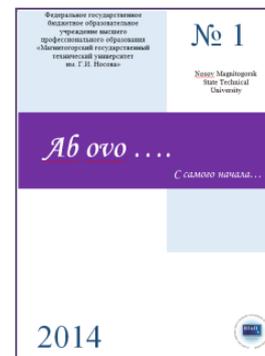
Другие рекомендуемые периодические издания



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

УДК 621.771.23

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СОСЕДНИХ ЗОН НА ТЕМПЕРАТУРУ ГРЕЮЩЕЙ СРЕДЫ ПЯТОЙ ЗОНЫ МЕТОДИЧЕСКОЙ ПЕЧИ ПРОКАТНОГО СТАНА

Д.В. Нужин, С.М. Андреев

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия

Аннотация: Собраны статистические данные распределения температуры греющей среды и подачи топлива в зоны нагревательной печи стана 2000 ОАО «ММК». Статистические данные для пятой зоны были обработаны путем группировки и удаления грубых ошибок эксперимента с помощью сравнение коэффициента Стьюдента. Найдена эмпирическая формула отражающая изменение температуры греющей среды в пятой зоне в зависимости от расхода топлива поданного в текущую зону и соседние зоны. Коэффициенты эмпирической формулы найдены с помощью симплексного метода Нелдера-Мида. Произведена проверка адекватности регрессионной модели путем сравнения расчетного и табличного коэффициента Фишера. По результатам проверки было установлено, что уравнение описывает динамику распределение значения температуры греющей среды не только топлива поданного в текущую зону, но и топлива поданного в соседние зоны и текущего темпа движения заготовок в печи с допустимой вероятностью.

Ключевые слова: Нагревательная печь, статистические данные, влияние зон, симплексный метод Нелдера-Мида, воспроизводимость статистических данных, коэффициенты эмпирической формулы, проверка на адекватность, регрессионная модель

ВВЕДЕНИЕ

В сталелитейной промышленности печи повторного нагрева являются основными потребителями энергии, и по оценкам, печи используют до 67% от общего объема энергии [1]. Основным мероприятием по снижению топливных затрат, не затрагивающих конструктивные особенности печи, является использование автоматизированных систем.

В настоящее время любая современная система управления нагревом заготовок строится на базе прогнозного управления, т. е. система, используя математические модели внешнего и внутреннего теплообмена в печи зная температурное распределение заготовок на выходе печи, заранее рассчитывает и ведет управление нагревом заготовок по энергосберегающей траектории нагрева.

Разработкам уравнениям описывающих теплообмен внутри печи посвящено много работ. Ниже выделены основные работы, описывающие зависимости “Расход топлива” – “Температура греющей среды”.

В работах [2]–[5] по нахождению оптимального распределения топливных нагрузок зависимость температуры греющей среды в зоне определяется линейно через коэффициент, характеризующий значение градусов на единицу поданного топлива в зону:

$$U(\tau) = kV(\tau) \quad (1)$$

где $U(\tau)$ – характеристическая температура управления, К; $V(\tau)$ – текущий расход топлива, м³/ч; k – коэффициент передачи по каналу “расход топлива – характеристическая температура“, К·м³/ч;

В работе [6] автор проанализировал потери тепла через ограждающие конструкции и дымовыми газами и

предположил, что топливо в зоне потребляется не только на нагрев металла, но и компенсацию тепловых потерь. Соответственно для поддержания заданной температуры в зоне печи необходимо в зону подать

$$V_i = V_{in} + n_i \cdot V_{\Sigma} \quad (2)$$

$$V_{in} = k_i (0,0039 \cdot t_i^2 + 1,024 \cdot t_i - 192,168) \quad (3)$$

где V_i – расход топлива на зону i , м³/ч; V_{in} – расход, требуемый для компенсации внешних тепловых потерь, м³/ч; k_i – доля тепловых потерь в зону; t_i – температура в зоне i , м³/ч; n_i – доля расхода, распределяемого на зону i .

Автором [7] была разработана детерминированная модель для прогноза температуры стальной полосы на выходе из нагревательной печи при оцинковании. Распределение температуры рабочего пространства в печи описывается следующим уравнением:

$$T_{II}(\tau) = a_2 \cdot \left(\frac{V_{II} \cdot \tau}{L_{MAX}} \right)^2 + a_1 \cdot \frac{V_{II} \cdot \tau}{L_{MAX}} + a_0, \quad (4)$$

где a_1, a_2, a_3 – коэффициенты регрессионной зависимости температуры рабочего пространства от относительной позиции металла в печи; L_{MAX} – общая длина полосы в печи; V_{II} – скорость полосы; τ – время, с.

Уравнение, связывающее расход топлива в зоне с температурой рабочего пространства, температурой поверхности заготовки и температурой горения согласно [8] представлено в виде:

$$G = M_0 \cdot \frac{t_{PI} - t_{II}}{T_p - t_{PI}} + M_{XX} \quad (5)$$

где G – расход топлива, M_0 – некоторая величина, t_{PI} – температура рабочего пространства, t_{II} – температура

поверхности металла, T_p – теоретическая температура горения топлива, $M_{лх}$ – мощность холостого хода.

Несмотря на то, что во всех перечисленных работах представлены результаты разработки систем управления, которые производят управление нагревом заготовок по энергосберегающим оптимальным траекториям авторы этих работ рассматривают зоны нагревательной печи автономными друг от друга.

Особенностью работы методических печей является противоточное движение дымовых газов и нагреваемых заготовок. Такая схема движения газов и металла позволяет полнее использовать тепло дымовых газов, утилизируя его в подогревательной зоне.

Анализируя технологию движение отходящих газов представляет интерес нахождения зависимости изменения температуры греющей среды в зоне в зависимости от подачи топлива в зоны, расположенные дальше, по ходу движения заготовок. В данной статье для описана процедура нахождения математической модели, описывающей динамику распределения температуры греющей среды в печи с учетом подачи топлива в соседние зоны и изменения темпа прохождения заготовок.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НАГРЕВА С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ СМЕЖНЫХ ЗОН

Процедура разработки математической модели разделена на 4 этапа:

- определение вида уравнения, описывающее динамику изменения температуры греющей среды с учетом особенностей технологического процесса нагрева заготовок в печи;
- анализ экспериментальных данных, снятых с объекта управления методической печи прокатного стана ОАО «ММК» г. Магнитогорск. Удаление «выбросов», лежащих anomalно далеко от других значений в наборе данных.
- нахождение коэффициентов математической модели позволяющим приблизить расчетное значение уравнение к опытным данным.
- проверка на адекватность расчетной модели экспериментальным исследованиям.

Разработка математических моделей описывающий процесс теплообмена внутри печи посвящено множество работ. Внутренний теплообмен в печи выражен системой дифференциальных уравнений, описывающих процесс конвективного и радиационного теплообмена в системы «газ–кладка–металл» с учетом турбулентного перемещения отходящих газов. Для решения задач теплообмена в основном используются программные пакеты моделирования [9-12]. Несмотря на достаточную точность результатов полученных с помощью математических моделей время затрачиваемое на решение полной системы уравнений не позволяет использовать такие методы для оперативного управления процессом нагрева в режиме реального времени. Соответственно эффективней для решения данной задачи является поиск упрощенной математической модели нагрева, связывающий эти показатели.

Для аппроксимации зависимости температуры греющей среды от расхода топлива и темпа прокатки принимаем простейшее уравнения следующего вида [13]:

$$Y = b_0 + a_1 \cdot X_1 + a_2 \cdot X_2 + \dots + a_n \cdot X_n \quad (6)$$

где Y - исследуемая величина; $a_1, a_2, \dots, a_n, b_0$ - постоянные коэффициенты; X_1, X_2, \dots, X_n - независимые переменные, определяющие один из параметров нагревательной печи, влияющих на нагрев заготовки и температуру рабочего пространства.

Для уточнения вида уравнения (6) и членов, влияющих на температуру среды рассмотрим основные особенности работы методической печи.

В каждую зону, кроме первых двух, тепло поступает от горелок, расположенных в своде печи. Дымовые газы движутся вдоль печи от последней зоны нагрева в сторону окна погрузки заготовок, где расположен дымовыводящий тракт, т.е. пересекая все зоны по пути, тем самым оказывают существенное влияние на температуру зоны, через которую проходит тепло. В связи с этим принимаем, что расход топлива влияет на смежные зоны по пути движения отходящих газов и чем ближе зона, тем значительнее оказывает влияние. На рис.1 приведена схема движения отходящих газов, проходящих через рабочее пространство в печи.

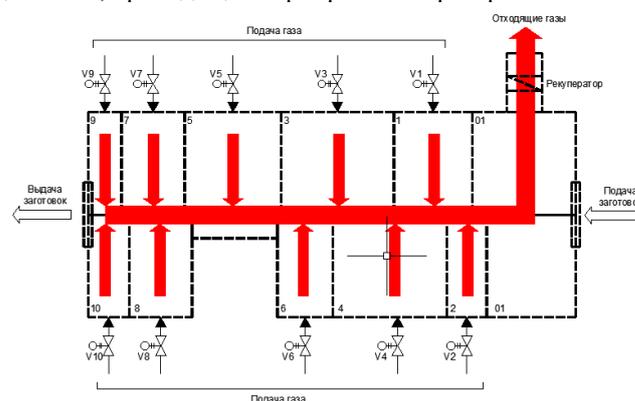


Рис.1 Структурная схема движения отходящих газов нагревательной методической печи

Вторым фактором, влияющим на температуру греющей среды, является текущий темп движения заготовок в печи. С увеличением темпа через зону печи проходит большее количество заготовок, соответственно для нагрева необходимо в зону подать больше тепла.

В работе [6] автором было замечено, что при поступлении партии заготовок в пустую зону не повышая расход топлива в зону, температура в зоне начинает снижаться.

Соответственно в уравнении (6) одним из факторов влияющим, на расход топлива является количество заготовок, проходящих через зону, которое зависит от темпа прохождения металла. Принимаем темп прохождения заготовок в печи по следующей зависимости: при повышении темпа – снижается температура греющей среды при неизменном расходе топлива в зону. В этом случае локальные регуляторы температуры зон начинают повышение расходов газа для стабилизации температуры зоны. Этот процесс может сопровождаться и повышением задания (зачастую с упреждением) на локальный контур регулирования температуры зоны со стороны оператора.

Третьей важной особенностью, которая не учитывается в уравнении (6), является инерционность изменения температуры греющей среды от подачи топлива в зону.

Динамику процесса преобразования расхода топлива в температуру греющей среды можно выразить следующим выражением [2]:

$$\frac{t_{гр}(\tau)}{dt} = \frac{1}{T_0} [U(\tau) - t_{гр}(\tau)], \quad (7)$$

где $U(\tau) = K_{П} V_T(\tau)$ - характеристическая температура управления, К; $V_T(\tau)$ - текущий расход топлива, м³/ч; $K_{П}$ - коэффициент передачи по каналу «расход топлива – характеристическая температура», град·м³/ч; T_0 - постоянная времени, характеризующая инерционность процесса теплопередачи по каналу «управления воздействие – температура рабочего пространства $t_{рп}(\tau)$ ».

В данной работе будет рассмотрен поиск математической модели описывающей распределение температуры греющей среды для пятой зоны.

Учитывая вышеописанные факторы, предположительно влияющие на значение температуры греющей среды уравнение (6) будет представлено следующей системой уравнения:

$$T_5(\tau+1) = T_5(\tau) + \frac{T_5(\tau)}{d\tau} \quad (8)$$

$$\frac{T_5(\tau)}{d\tau} = \frac{1}{k_1} [U_5(\tau) - T_5(\tau)] \quad (9)$$

$$\begin{cases} X_1 = T_5^{\min} \\ X_2 = V_5(\tau) - V_5^{\min} \\ X_3 = V_7(\tau) - V_7^{\min} \\ X_4 = V_8(\tau) - V_8^{\min} \\ X_5 = V_9(\tau) - V_9^{\min} \\ X_6 = \nu(\tau) \end{cases} \quad (10)$$

$$U_5(\tau) = k_1 X_1 + k_2 X_2 + k_3 X_3 + k_4 X_4 + k_5 X_5 + k_6 X_6$$

где $U_5(\tau)$ - характеристическая температура управления пятой зоны, °К; T_5^{\min} - минимальная температура греющей среды для рассматриваемого промежутка времени, °К; $V_i(\tau)$ - текущий расход топлива в i -зону м³/ч; V_i^{\min} - минимальный расход потраченный для компенсации тепловых потерь; $\nu(\tau)$ - приведенная текущая производительность нагревательной печи, т/ч; $T_5^{\min} = 1250$ °К - минимальная температура рабочего пространства в зоне 5 при работе методической печи в нормальном режиме; k_i - весовые коэффициенты влияния параметра на температуру в 5-й зоне на нагревательной печи, °С·ч/м³.

Таблица 1 – Значение коэффициентов уравнения (10)

i	5	7	8	9
V_i^{\min} , м ³ /ч	437	189	315	189

Значение приведенной производительности печи определялось в соответствии с выражением

$$\nu(\tau) = 0,0012P(\tau) - 0,08, \quad (11)$$

где $P(\tau)$ - реальная производительность стана, изменяющаяся в диапазоне от 150 до 900 т/ч.

Система уравнения (8)–(10) описывает зависимость температуры рабочего пространства в 5-й зоне нагревательной печи, ограниченной не ниже T_5^{\min} по значению функции и V_i^{\min} по значению расходов.

ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

При проведении эксперимента с помощью контрольно-измерительных приборов, установленных в печи производился хронометраж параметров нагревательной печи и, в частности, были получены данные по изменению во времени следующих параметров:

Данные о температуре 5-й зоны нагревательной печи T_5 , расходы топлива в зонах V_5, V_7, V_8, V_9 , текущее положение каждой заготовки Z . Параметр текущего темпа движения заготовки получен расчетным путем из текущей производительности печи $P(\tau)$.

Особенностью печи с шагающими балками является перемещение всех заготовок одновременно с помощью шагающих балок. Соответственно для получения информации о темпе достаточно определить количество шагов одной заготовки за заданный промежуток времени.

Расчет темпа производится путем слежения за одной заготовкой по координате заготовке Z находящиеся в печи.

Текущий темп прохождения в каждый момент определяется путем отслеживания изменения заготовки за предыдущий 10-ти минутный промежуток времени:

$$\nu(\tau) = \frac{\sum_{\tau=10}^{\tau-9} Z(\tau)}{10} \quad (12)$$

где $Z(\tau)$ – текущее положение заготовок.

Т. к. для анализа данных мы имеем уже массив данных прошедшего процесса и уровни факторов в каждом опыте зафиксированы, то эксперимент является пассивным, т. е. исследователь не имеет возможность задавать факторы в ручном режиме.

Перед поиском коэффициентов k_i уравнения (10) по полученным экспериментальным данным производился предварительный анализ и были удалены грубые выбросы экспериментальных значений, связанных с ошибками измерений и передачи параметров.

Из опытных данных выбирались диапазоны, в которых значения вариации достаточно точно равномерно или близко к нормальному. Размер и количество диапазонов определялось по формуле Стреджесса [14]:

$$h = \frac{X_{\max} - X_{\min}}{k} \quad (13)$$

$$k = 1 + 3,322 \lg N \quad (14)$$

где X_{\min}, X_{\max} – границы диапазона, k – количество групп; N – число значений величины в выборке.

На рис. 2 представлена выборка для значений температуры в пятой зоне.

Для значений найденных диапазонов выборок проверяют наличие грубых выбросов. Проверка производится с помощью одновыборочного t -критерия метода Стьюдента:

1) Рассчитывается среднее арифметическое:

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad (15)$$

2) Рассчитывается дисперсию выборки:

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (16)$$

3) Для каждой точки диапазона рассчитывается коэффициент Стьюдента:

$$t_p = \frac{|\bar{y} - y_i^*|}{S} \quad (17)$$

4) Производится сравнение значение коэффициента Стьюдента расчетного t_p и табличного t . Если $t_p > t$, то считается, что отклоняющиеся значение y^* является грубой ошибкой. Далее значение исключают см. рис. 3.

В табл. 2 приведены расчетные данные для диапазона (651- 721).

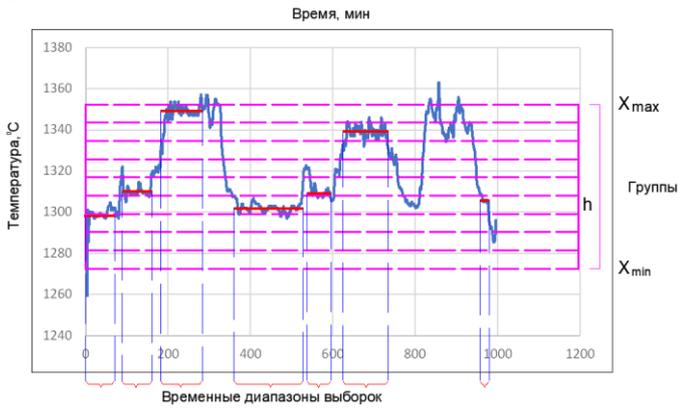


Рис. 2. Выделение групп с равномерным распределением значений температуры для 5-й зоны

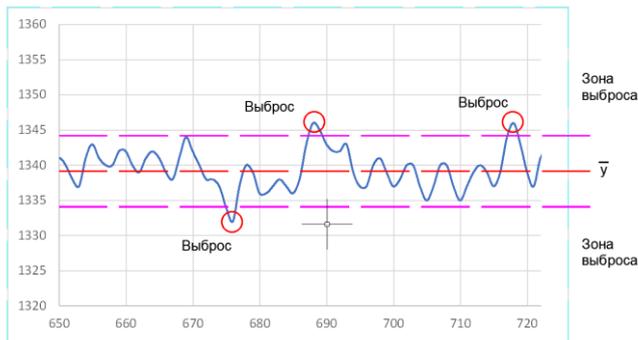


Рис. 3 Точки выброса значений температуры зоны T_5 в диапазоне 650 – 720 мин.

Таблица 2 – Результат обработки экспериментальных данных в диапазоне 651-721 мин

Время	T5 exper.	Y	S2	t_p	Статус
		1339,39	7,6994	1,96	
651	1340		0,36679	0,21826	НОРМ
675	1334		29,0992	1,94407	НОРМ
...
676	1332		54,6767	2,66485	ВЫБРОС
677	1337		5,73299	0,8629	НОРМ
...
687	1343		13,0006	1,29943	НОРМ
688	1346		43,6344	2,3806	ВЫБРОС
689	1345		31,4231	2,02021	ВЫБРОС
690	1343		13,0006	1,29943	НОРМ
...
721	1337		5,73299	0,8629	НОРМ

Из табл. 2 видно, что значения температур в точках 676, 688, 689 имеют значение Стьюдента больше 1,96, соответственно данные значения будут удалены из траектории. Аналогичная обработка данных приведены для

траектории распределения значений расходы топлива в зонах V_5, V_7, V_8, V_9 .

После обработки экспериментальных данных на предмет удаления выбросов был произведен поиск коэффициентов математической модели описанной уравнением (8) – (10) с помощью метода Нелдера-Мида (называется также поиском по деформируемому многограннику) является развитием симплексного метода Спендли, Хекста и Химсворта [15].

Идея метода состоит в сравнении значений функции в $(n+1)$ вершинах симплекса и перемещении симплекса в направлении оптимальной точки с помощью итерационной процедуры. Алгоритм поиска коэффициентов состоит из пяти этапов см. рис 4.

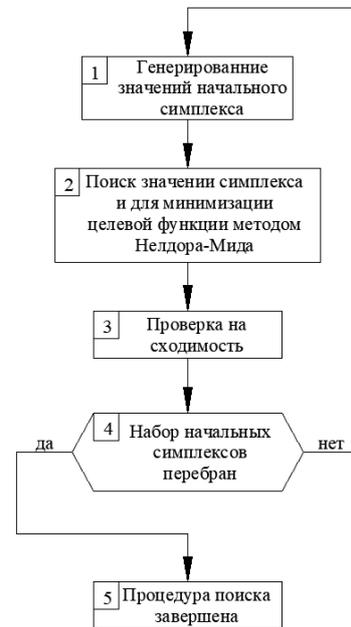


Рис. 4. Алгоритм поиска переменных математической модели симплекс-методом.

Для поиска переменных выполняется генерация первоначальных наборов переменных, находящие в заданных диапазонах. В соответствии с описанием работы Нелдера-Мида формируется $(n+1)$ наборов симплексов, т.е. для варианта поиска коэффициентов зоны №5 будет 6 наборов.

Генерирование значений симплексов с учетом ограничений формируются с помощью формулы:

$$f_x(i) = f_{x_{\min}}(i) + Rnd \cdot (f_{x_{\max}}(i) - f_{x_{\min}}(i)), \quad (18)$$

Далее запускается поиск коэффициентов $f_x(i)$ с помощью алгоритма Нелдера – Мида. Подробное описание алгоритма изложен в литературе [15].

В качестве целевой функции принимаем сумму всех квадратов значений разницы между рассчитанными и опытными данными для всего анализируемого временного промежутка. Целевая функция выражается следующим выражением:

$$J = \sum_{i=1}^{i=N_{\max}} (T_{\text{эсп}}(i) - T_{\text{расч}}(i))^2 \rightarrow 0, \quad (19)$$

Одним из основных ограничений в процессе нахождения минимального значения функции J является ограничение на перемещение переменных за пределы

минимального или максимального значения. При нарушении границ значений переменных целевая функция заменяется на величину условно превышающее значение функции $J=10^{12}$.

Процедура поиска минимального значения целевой функции прекращается после прохождения проверки на сходимость. Проверка сходимости основана на том, чтобы стандартное отклонение $(n+1)$ -го значения функции было меньше некоторого заданного малого значения ε . В этом случае вычисляется

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^{n+1} (f_i - \bar{f})^2 / (n+1), \text{ где } \bar{f} = \sum f_i / n+1, \quad (20)$$

Если $\sigma < \varepsilon$, то все значения функции очень близки друг к другу, и поэтому они, возможно, лежат вблизи точки минимума целевой функции.

Т.к. без специальных исследований практически невозможно предположить наличие локальных минимумов исследуемой функции крайним этапом является процедура поиска глобального минимума. Данная процедура включает в себя хаотичный случайный перебор начального симплекса с дальнейшим приведением его вершин к значению поиска локального минимума целевой функции окрестности начального симплекса. Процедура начального симплекса как правило составляет 20-40 итерации. Минимальное значение целевой функции и соответственно и подобранные вершины для данного симплекса являются оптимальными значениями.

В результате поисков коэффициентов обеспечивающих максимальное совпадения расчетных данных и экспериментальных эмпирическое уравнения для 5-й зоны принимает следующий вид:

$$U_5(\tau) = 1250 + 0,0242 \cdot (V_5(\tau) - 437) + 0,0265 \cdot (V_7(\tau) - 189) + 0,0097 \cdot (V_8(\tau) - 315) + 0,0001 \cdot (V_9(\tau) - 189) - 0,624 \cdot v(\tau) \quad (21)$$

Анализируя коэффициенты уравнения (21) коэффициент подачи топлива в 9 зону не оказывает влияние изменение температуры, соответственно в дальнейших вычислениях данный коэффициент будет исключен.

Траектория изменения приведена на рис. 5.

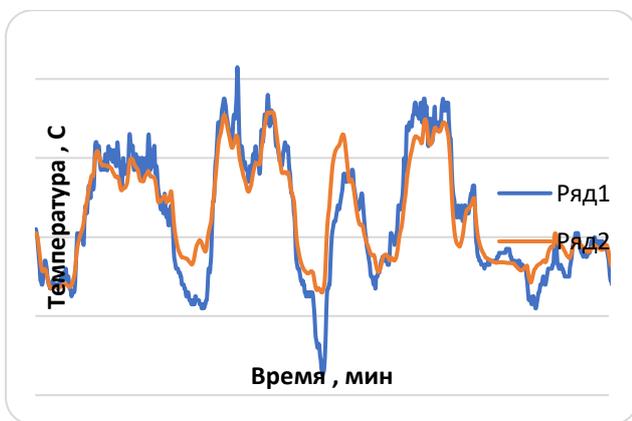


Рис. 5 Траектория изменения температуры греющей среды №5 для диапазона 540 – 1440 мин (Ряд 1 – экспериментальные данные, Ряд 2 – рассчитанные данные)

ПРОВЕРКА МОДЕЛИ НА АДЕКВАТНОСТЬ

Визуально, расчетная траектория температуры в пятой зоне представленная на рис. 6 соответствует экспериментальным данным. С математической точки зрения оценка адекватности полученной эмпирической функции исходным экспериментальным данным выполнена с помощью критерия Фишера [16].

Для проверки выполняем следующие шаги:

1) Рассчитываем коэффициент Фишера для расчетного диапазона:

$$F_{расч} = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_{расч} - \bar{Y}_{расч})^2}{m} \cdot \frac{n-m-1}{\sum_{i=1}^n (Y_{экспер} - Y_{расч})^2}, \quad (22)$$

где $Y_{расч}$, $Y_{экспер}$ – расчетное и экспериментальное значение температуры, °C; $\bar{Y}_{расч}$ – значение температур, полученное с помощью расчетной формулы (8)–(10), °C; n – количество факторов влияющие на значение $\bar{Y}_{расч}$; m – количество опытов.

Интерес исследования представляет качественные соответствия $Y_{расч}$ и $Y_{экспер}$, соответственно для обработки данных применяем только значения границ диапазонов выборок, полученных в уравнениях (15), (16). На рис. 6 и приведена схема выбора исследуемых величин. На рис. 7 и 8 приведены исследуемые величины до выборки и после соответственно.

1) Определяется табличное значение коэффициента Фишера $F_{ТАБЛ}$ используя пакет Excel. Коэффициент находим с помощью функции:

$$F.OБР(A1;A2;A3) \quad (23)$$

где $A1$ – вероятность; $A2$ – степень свободы (количество факторов влияющие на значение); $A3$ – степень свободы (количество опытов);

2) Выполняется сравнение рассчитанного и табличного значения критерия Фишера. Если $F_{расч} > F_{табл}$, то считается что расчетное значение температуры с большой достаточной долей вероятности способно описать динамику изменения температуры в печи. В таблице 3 представлены результаты со значениями расчета для траектории, рассчитанной по методике указанной на рис. 7.

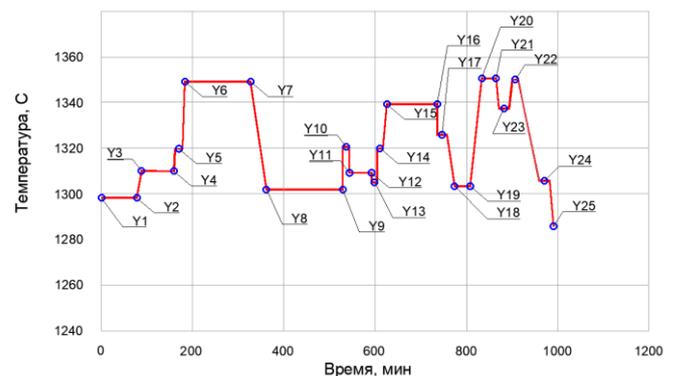


Рис. 6 Траектория качественных уровней температуры греющей среды

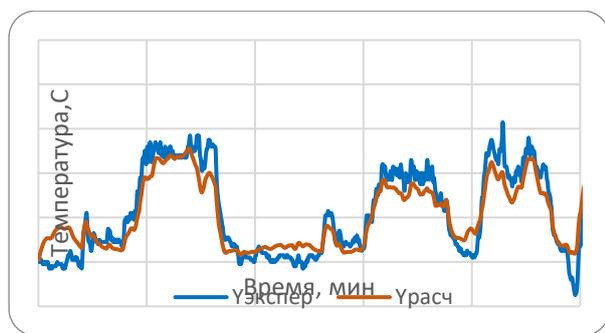


Рис. 7 Траектория распределения $Y_{расч}$ и $Y_{экспер}$, до выбора значимых значений.

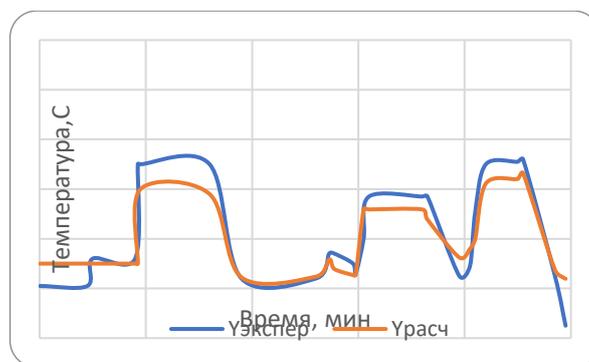


Рис. 8 Траектория распределения $Y_{расч}$, $Y_{экспер}$ после выбора значимых значений.

Таблица 2

Результаты выборки качественных значений для рассчитанной траектории для диапазона 1-1000мин

Но-мер i	Время	$Y_{экспер}$	$Y_{расч}$	$Y_{расч} - \bar{Y}_{расч}$	$Y_{экспер} - Y_{расч}$
1	1	1301	1310	86,9	81,0
2	90	1301	1310	86,9	81,0
3	100	1312	1310	86,9	4,0
4	180	1312	1310	86,9	4,0
5	185	1350	1310	86,9	1600,0
6	190	1350	1340	427,5	100,0
7	320	1350	1338,008	349,1	143,8
8	380	1304	1304,4832	220,3	0,2
9	520	1304	1304,7356	212,8	0,5
10	545	1314	1311,6599	58,7	5,5
11	555	1314	1307,812	132,5	38,3
12	590	1310	1305,382	194,4	21,3
13	595	1306	1305,4099	193,6	0,3
14	610	1320	1331,7975	155,6	139,2
15	620	1337	1331,7975	155,6	27,1
16	720	1337	1331,7975	155,6	27,1
17	730	1337	1327,7467	70,9	85,6
18	790	1305	1312,4624	47,1	55,7
19	810	1309	1315,9349	11,5	48,1
20	820	1331	1320	0,5	121,0
21	840	1350	1342,2555	525,8	60,0
22	900	1351	1344,0905	613,3	47,7
23	910	1352	1346,3885	732,4	31,5
24	970	1305	1307,4615	140,7	6,1
25	990	1285	1303,894	238,1	357,0

Из таблицы 3 видно, что $F_{расч} > F_{табл}$ соответственно, принимаем что эмпирическое уравнение (14) в достаточной вероятностью описывает связь температуры греющей среды в пятую зону от расхода топлива поданные в 5,7,8 зоны и темпа прохождения заготовок в печи.

Таблица 3

Итоговые результаты расчета коэффициента Фишера

$\sum_{i=1}^n (Y_{расч} - \bar{Y}_{расч})$	$\sum_{i=1}^m (Y_{экспер} - Y_{расч})$	$\bar{Y}_{расч}$	n	m	$F_{расч}$	$F_{табл}$
5070,8	3086,0	1319,3	4,0	25,0	8,2	4,2

ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1) В работах, посвященных поискам оптимальных траекторий нагрева заготовок в печах проходного типа не учитываются влияние соседних зон друг на друга. С учетом газодинамических и конструктивных особенностей проходной печи предполагается, что тепло полученное подачей топлива непосредственно в зону частично передается в соседние по ходу движения отходящих газов.

2) Была разработана эмпирическая формула, описывающая зависимости изменения температуры от топливных нагрузок смежных зон и темпа движения заготовок в печи.

3) Для настройки коэффициентов влияния в формуле были использованы предварительно обработанные экспериментальные данные печи.

4) Разработанная модель была проверена на адекватность с помощью критерия Фишера и подтверждена на возможность описывать взаимосвязь подачи топлива в зоны на температуру греющей среды в соседние зоны.

5) Разработанная модель может быть использована в системах поиска оптимальных топливосберегающих режимов используя механизм прогнозирования процесса нагрева заготовок.

ЛИТЕРАТУРА

1) Diego Jhovanny Mariños Rosado, Samir Boset Rojas Chávez at al. Reheating furnaces in the steel industry: utilization of combustion gases for load preheating and combustion air preheating using cog, ldg and bfg as process gases // Conference: 18th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering Conference Paper · November 2020 DOI: 10.26678/ABCM.ENCIT2020.CIT20-0017 18th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering November 16-20, 2020 (Online)

2) Б.Н.Парсункин, С.М. Андреев, В.Ю.Жадинский Оптимальные топливосберегающие режимы нагрева непрерывнолитых заготовок в методических печах // Вестник МГТУ им. Г.И.Носова –2015 – №3 – С. 89-96.

3) Парсункин Б.Н., С.М. Андреев, В.Ю.Жадинский Универсальный топливосберегающий спобок оптимального нагрева распределения тепловых нагрузок по зонам методических печей // Сталь. – 2015 – №9 – С. 76-80.

4) Ахметов Т.У. Совершенствование системы управления несимметричным нагревом непрерывнолитых заготовок в методических печах: автореф. дис. канд наук. – Оренбург, 2017. – стр. 8.

5) Андреев С.М., Ахметов Т.У., Нужин Д.В. Автоматизированная система управления топливосберегающим несимметричным нагревом непрерывнолитых заготовок перед прокаткой // Электротехнические системы и комплексы – 2016 – №3(32) – С. 60-66.

6) Рябчиков М.Ю., Барков Д.С.-Х., Е.С.Рябчикова Управление нагревом металла в методических печах с учетом распределения внешних тепловых потерь по длине печи // Обработка металлов давления – 2016 – №6(96) – С. 38-49.

7) Рябчиков М.Ю., Кокорин И.Д. Сравнение вариантов детерминированных моделей для прогноза температуры стальной полосы на выходе из нагревательной печи при оцинковании// Известия ТулГУ. Технические науки – 2021 – Вып.6 – С. 335-345.

8) Панферов В.И., Панферов С.В. К решению задачи контроля температуры металла в АСУ ТП методических печей // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2021 – Т.21 - №4 – С. 63-75.

9) Jae Hyuck Chang, Jinwoo Oh, Hoseong Lee Development of a roller hearth furnace simulation model and performance investigation // International Journal of Heat and Mass Transfer – 2020 – №160 (120222) – С. 1-7.

10) Sang Heon Han, Seung Wook Baek, Man Young Kim Transient radiative heating characteristics of slabs in a walking beam type reheating furnace // International Journal of Heat and Mass Transfer– 2009 – №52 (1005–1011) – С. 1-7.

11) Zaaquib Ahmed, Steven Lecompe Teun de Raad, Michel De Paepe Steady State model of a Reheating for determining slab boundary conditions // 10th International Conference on Applied Energy (ICAE2018) 22-25 August 2018, Hong Kong, China – С. 5844-5849.

12) Bernhard Mayr, Rene Prieler, Martin Demuth, Luca Moderer CFD modeling and performance increase of a pusher type reheating furnace using oxy-fuel burners Steady State model of a Reheating for determining slab boundary conditions // 11th European Conference on Industrial Furnaces and Boilers INFUB-11 Energy Procedia 120 (2017) – С. 462-468.

13) Румшинский Л.З. Математическая обработка результатов эксперимента (справочное пособие).– М.:Наука, 1971. –стр. 192.

14) Под редакцией Г.Л.Громыко Теория статистики – Москва ИНФРА-М, 2005 –стр. 476.

15) Банди., Методы оптимизации. Вводный курс: Пер. с англ. – М.:Радио и связь, 1988. –стр. 128.

16) Р.А. Фишер Статические методы для исследования Москва, Госстатиздат, 1958. –стр. 266

RESEARCH OF THE INFLUENCE OF NEIGHBORING ZONES ON THE HEATING MEDIUM TEMPERATURES OF THE FIFTH ZONE OF THE METHODOLOGICAL FURNACE OF THE ROLLING MILL

D.V. Nuzhin, S.M. Andreev

Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov, Magnitogorsk, Russia

Nuzhin83@mail.ru

Abstract: Statistical data on the distribution of the temperature of the heating medium and fuel supply to the zones of the heating furnace of mill 2000 of “ММК” are collected. Statistical data for the fifth zone were processed by grouping and removing gross errors of the experiment using the Student coefficient comparison. An empirical formula is found reflecting the change in the temperature of the heating medium in the fifth zone, depending on the fuel consumption supplied to the current zone and neighboring zones. The coefficients of the empirical formula are found using the Nelder-Mead simplex method. The adequacy of the regression model was verified by comparing the calculated and tabular Fisher coefficient. According to the results of the check, it was found that the equation describes the dynamics of the distribution of the temperature of the heating medium not only of the fuel supplied to the current zone, but also of the fuel supplied to neighboring zones and the current rate of movement of workpieces in the furnace with an acceptable probability.

Keywords: heating furnace, statistical data, influence of zones, Nelder-Meade simplex method, reproducibility of statistical data, adequacy test, regression model.

REFERENCES

1) Diego Jhovanny Reheating furnaces in the steel industry: utilization of combustion gases for load preheating and combustion air preheating using cog, ldg and bfg as process gasses

/ Diego Jhovanny, Mariños Rosado, Samir Boset Rojas Chávez at al. // Conference: 18th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering Conference Paper · November 2020 DOI: 10.26678/ABCM.ENCIT2020.CIT20–0017 18th

Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering November 16-20, 2020 (Online)

2) Parsunkin B.N., Andreev S.M., Zhadinsky V.Yu., Akhmetova A.Yu. Optimal fuel-saving modes of heating continuously cast billets in process furnaces [Optimal'nyye toplivosberegayushchiye rezhimy nagreva nepreryvnolykh zagotovok v metodicheskikh pechakh] // *Vestnik MGTU im. G.I.Nosova* [Bulletin of MSTU im. G.I. Nosova]–2015–No. 3–p. 89–96.

3) Parsunkin B.N., Andreev S.M., Zhadinsky V.Yu., Akhmetova A.Yu. Universal fuel-saving method for optimal heating of the distribution of heat loads over the zones of process furnaces [Universal'nyy toplivosberegayushchiy spobok optimal'nogo nagreva raspredeleniya teplovykh nagruzok po zonam metodicheskikh pechey] // *Stal* [Steel] –2015–No. 9–p. 76–80.

4) Akhmetov T.U. Improvement of the control system for asymmetric heating of continuously cast billets in method furnaces [Sovershenstvovaniye sistemy upravleniya nesimmetrichnym nagrevom nepreryvnolykh zagotovok v metodicheskikh pechakh: avtoref. dis. kand nauk]: abstract of the thesis. dis. Candidate of Sciences. - Orenburg, 2017.–p. 8.

5) Andreev S.M., Akhmetov T.U., Nuzhin D.V. Automated control system for fuel-saving asymmetric heating of continuously cast billets before rolling [Avtomatizirovannaya sistema upravleniya toplivosberegayushchim nesimmetrichnym nagrevom nepreryvnolykh zagotovok pered prokatkoy] / *Elektrotehnicheskiye sistemy i komplekсы* Electrical systems and complexes–2016–No. 3 (32) –p.60–66.

6) Ryabchikov M.Yu., Barkov D.S. –Kh., Ryabchikova E.S. Control of metal heating in continuous furnaces, taking into account the distribution of external heat losses along the length of the furnace [Upravleniye nagrevom metalla v metodicheskikh pechakh s uchetom raspredeleniya vneshnikh teplovykh poter' po dline pechi]// *Obrabotka metallov davleniya Treatment of pressure metals*–2016–No. 6 (96) –p. 38–49.

7) Ryabchikov M.Yu., Kokorin I.D. Comparison of variants of deterministic models for forecasting the temperature of a steel strip at the outlet of a heating furnace during galvanizing [Sravneniye variantov determinirovannykh modeley dlya prognoza temperatury stal'noy polosy na vykhode iz nagrevatel'noy pechi pri otsinkovanii]// *Izvestiya TulGu*.

Tekhnicheskkiye nauki Izvestiya TulGu. Engineering Sciences - 2021–Issue 6–p. 335–345.

8) V.I. Panferov, S.V. Panferov On solving the problem of metal temperature control in process control systems for process furnaces [K resheniyu zadachi kontrolya temperatury metalla v asu tp metodicheskikh pechey]// *Vestnik YUUrGU. Seriya «Metallurgiya»* Bulletin of the South Ural State University. Series "Metallurgy".–2021–V.21–No. 4–p. 63–75.

9) Jae Hyuck Chang Development of a roller hearth furnace simulation model and performance investigation/ Jae Hyuck, Jinwoo Oh, Hoseong Lee // *International Journal of Heat and Mass Transfer*–2020–№160 (120222) –p.1–7.

10) Sang Heon Han Transient radiative heating characteristics of slabs in a walking beam type reheating furnace / Sang Heon Han, Seung Wook Baek, Man Young Kim // *International Journal of Heat and Mass Transfer*– 2009–№52 (1005–1011) –p.1–7.

11) Zaaquib Ahmed State model of a Reheating for determining slab boundary conditions / Zaaquib Ahmed, Steven Lecompe Teun de Raad, Michel De Paepe Steady // 10th International Conference on Applied Energy (ICAE2018) 22–25 August 2018, Hong Kong, China – p.5844–5849.

12) Bernhard Mayr CFD modeling and performance increase of a pusher type reheating furnace using oxy-fuel burners Steady State model of a Reheating for determining slab boundary conditions / Bernhard Mayr, Rene Prieler, Martin Demuth, Luca Moderer // 11th European Conference on Industrial Furnaces and Boilers INFUB–11 Energy Procedia 120 (2017) –p.462–468.

13) Rumshinsky L.Z. *Matematicheskaya obrabotka rezul'tatov eksperimenta (spravochnoye posobiye)*. [Mathematical processing of experimental results (reference guide)].–M.: Nauka, 1971.–192 p.

14) Edited by Gromyko G.L. *Teoriya statistiki* [Theory of Statistics] –Moscow INFRA–M, 2005–476 p.

15) Bandi., *Metody optimizatsii. Vvodnyy kurs* [Methods of optimization. Introductory course]: Per. from English.–M.: Radio and communication, 1988.–128. p.

16) Fisher R.A. *Sticheskiye metody dlya issledovaniya* [Static Methods for Research] Moscow, Gosstatizdat, 1958.–266p.

Нужин Д.В. Исследование влияния соседних зон на температуру греющей среды пятой зоны методической печи прокатного стана / Д.В. Нужин, С.М. Андреев // *Автоматизированные технологии и производства*. 2023. №1(27). С.3-10.

D.V. Nuzhin, S.M. Andreev Research of the influence of neighboring zones on the heating medium temperatures of the fifth zone of the methodical furnace of the rolling mill. *Avtomatizirovannyye tehnologii i proizvodstva* [Automation of technologies and production], 2023, no.1(27), pp.3-10. (In Russian).

УЧЕТ МГНОВЕННЫХ ЗНАЧЕНИЙ МОМЕНТА СИНХРОННОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ ПРИ РЕАКТИВНОЙ НАГРУЗКЕ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ САПР АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРИВОДА

И.П. Попов

Курганский государственный университет, Курган, Россия

e-mail: uralakademia@kurganstalmost.ru

Аннотация. Цель настоящего исследования – показать, что момент сил, развиваемый синхронной электрической машиной при реактивной нагрузке, не равен нулю. При этом речь идет о мгновенном значении момента сил. В настоящей работе применяются методы математического моделирования и традиционные электротехнические расчеты. Для сформулированной в статье теоремы представлены три независимых друг от друга доказательства – для любой реактивной нагрузки, для индуктивной нагрузки и для емкостной нагрузки. Таким образом, вопреки возможному интуитивному предположению, у индуктивной синхронной электрической машины с реактивной нагрузкой развиваемый момент не равен нулю. Из этого необходимо следует, что механическая мощность, развиваемая машиной, также не равна нулю. Полученные результаты рекомендуется использовать при проектировании автоматизированных электрических приводов.

Ключевые слова: синхронная машина, индуктивная, емкостная нагрузка, ЭДС, ток, момент.

В последнее время выяснилось, что многие специалисты в области электромеханики убеждены в том, что момент, развиваемый синхронной электрической машиной при реактивной нагрузке, равен нулю. При этом речь идет о мгновенном значении момента.

Цель исследования – показать, что такое представление не соответствует действительности.

Задачи работы – получить доказательные на уровне теоремы результаты.

ЭДС идеализированной синхронной машины. ЭДС одного витка обмотки в соответствии с законом электромагнитной индукции равна

$$e_1 = -Blv \sin \varphi.$$

Для n витков

$$e_n = -Blnv \sin \varphi.$$

Скорость v равна

$$v = \frac{D_r}{2} \frac{d\varphi}{dt}.$$

Таким образом, ЭДС идеализированной синхронной машины [1–4] равна

$$e = -Bln \frac{D_r}{2} \frac{d\varphi}{dt} \sin \varphi.$$

Момент

Теорема. Момент синхронной электрической машины при реактивной нагрузке не равен нулю.

Доказательство 1. При реактивной нагрузке развивается реактивная мощность

$$q = ui = U \sin \omega t \cdot I \sin \left(\omega t \pm \frac{\pi}{2} \right) = \pm \frac{1}{2} UI \sin 2\omega t.$$

Она не равна нулю.

Механическая мощность равна

$$p = m\omega.$$

В соответствии с законом сохранения энергии механическая мощность равна электрической мощности. Из этого следует формула для момента

$$m = \frac{p}{\omega} = \frac{q}{\omega} = \pm \frac{UI}{2\omega} \sin 2\omega t.$$

Также как и реактивная мощность, момент не равен нулю.

Теорема доказана.

Замечание. Речь не идет о среднем значении момента за период колебаний.

Доказательство 2. Пусть нагрузка является индуктивной. При этом

$$u_L = -L \frac{di}{dt}.$$

В соответствии с законом Кирхгофа

$$e = u_L.$$

Или

$$Bln \frac{D_r}{2} \frac{d\varphi}{dt} \sin \varphi = L \frac{di}{dt}.$$

Интегрирование этого выражения дает

$$i = -\frac{Bln D_r}{L 2} \cos \varphi + I_0 = -I_m \cos \varphi + I_0.$$

Начальный ток I_0 можно положить равным нулю.

В соответствии с законом Ампера

$$f = Blni \sin \varphi.$$

Отсюда момент равен

$$m = Blni \frac{D_r}{2} \sin \varphi = -Bl \frac{Bl n D_r}{L} \cos \varphi \frac{D_r}{2} \sin \varphi =$$

$$= -\frac{(Bl n)^2 D_r^2}{L} \sin 2\varphi.$$

Очевидно, что момент не равен нулю.

Теорема доказана.

Доказательство 3. Пусть нагрузка является емкостной.

При этом

$$Bl n \frac{D_r}{2} \omega \sin \omega t = \frac{1}{C_0} \int i dt.$$

Дифференцирование этого выражения дает

$$i = Bl n C \frac{D_r}{2} \omega^2 \cos \omega t$$

Момент равен

$$\mu = Blni \frac{D_r}{2} \sin \varphi = Bl n Bl n C \frac{D_r}{2} \omega^2 \cos \varphi \frac{D_r}{2} \sin \varphi =$$

$$= (Bl n)^2 C \frac{D_r^2}{8} \omega^2 \sin 2\varphi.$$

Очевидно, что момент не равен нулю.

Теорема доказана.

Заключение. Таким образом, вопреки возможному интуитивному предположению, у индуктивной синхронной электрической машины с реактивной нагрузкой развиваемый момент не равен нулю. Из этого необходимо следует, что механическая мощность, развиваемая машиной, также не равна нулю.

Полученные результаты могут использоваться при проектировании автоматизированных электрических приводов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лицин К.В. Обоснование выбора частоты переменной составляющей сигнала возбуждения при определении углового положения ротора синхронного двигателя методом высокочастотной инжекции сигнала // Автоматизированные технологии и производства. 2015. № 4 (10). С. 41–43.
2. Давыдкин М.Н., Коньков А.С., Басков С.Н. Применение микроконтроллера LPC2148 в системах управления плавного пуска синхронных электродвигателей компрессорных установок металлургического производства // Автоматизированные технологии и производства. 2009. № 3. С. 177–182.
3. Лицин К.В. Механизм высокочастотной инжекции при электрическом определении углового положения ротора синхронного двигателя // Автоматизированные технологии и производства. 2014. № 6. С. 110–116.
4. Попов И.П. Учет амплитудно-частотных особенностей режимов нагрузки синхронной электрической машины в составе автоматизированного привода // Автоматизированные технологии и производства. 2021. № 1 (23). С. 12–15.

ACCOUNT OF INSTANT VALUES OF TORQUE OF SYNCHRONOUS ELECTRIC MACHINE UNDER REACTIVE LOAD FOR THE PURPOSES OF CAD AUTOMATED DRIVE

I.P. Popov

Kurgan State University, Kurgan, Russia

e-mail: uralakademia@kurganstalmost.ru

Abstract. The purpose of this study is to show that the moment of forces developed by a synchronous electric machine with a reactive load is not equal to zero. In this case, we are talking about the instantaneous value of the moment of forces. In this work, mathematical modeling methods and traditional electrical calculations are used. For the theorem formulated in the article, three independent proofs are presented - for any reactive load, for an inductive load, and for a capacitive load. Thus, contrary to a possible intuitive assumption, in an inductive synchronous electric machine with a reactive load, the developed torque is not equal to zero. It necessarily follows from this that the mechanical power developed by the machine is also non-zero. The results obtained are recommended to be used in the design of automated electrical drives.

Keywords: synchronous machine, inductive, capacitive load, EMF, current, torque.

REFERENCES

1. Litsin K.V. Justification of the choice of the frequency of the variable component of the excitation signal when determining the angular position of the rotor of a synchronous motor by the method of high-frequency signal injection [Obosnovaniye vybora chastoty peremennoy sostavlyayushchey signala vzbuzhdeniya pri opredelenii ugloвого polozheniya rotora

sinkhronnogo dvigatelya metodom vysokochastotnoy inzhektionsii signala]. *Avtomatizirovannye tehnologii i proizvodstva [Automation of technologies and production]*, 2015, no. 4 (10), pp. 41–43. (In Russian)

2. Davydkin M.N., Konkov A.S., Baskov S.N. The use of the LPC2148 microcontroller in soft start control systems for synchronous electric motors of compressor plants in metallurgical production [Primeneniye mikrokontrollera LPC2148 v

sistemakh upravleniya pлавного puska sinkhronnykh elektrodvigateley kompres-sornykh ustanovok metallurgicheskogo proizvodstva]. *Avtomatizirovannye tehnologii i proizvodstva [Automation of technologies and production]*, 2009, no. 3, pp. 177–182. (In Russian)

3. Litsin K.V. The mechanism of high-frequency injection in the electrical determination of the angular position of the rotor of a synchronous motor [Mekhanizm vysokochastotnoy inzhetskii pri elektricheskom opredelenii uglovogo polozheniya rotora sinkhronnogo dvigatelya]. *Avtomatizirovannye*

tehnologii i proizvodstva [Automation of technologies and production], 2014, no. 6, pp. 110–116. (In Russian)

4. Popov I.P. Accounting for the amplitude-frequency features of the load modes of a synchronous electric machine as part of an automated drive [Uchet amplitudno-chastotnykh osobennostey rezhimov nagruzki sinkhronnoy elektricheskoy mashiny v sostave avtomatizirovannogo privoda]. *Avtomatizirovannye tehnologii i proizvodstva [Automation of technologies and production]*, 2021, no. 1 (23), pp. 12–15. (In Russian)

Попов И.П. Учет мгновенных значений момента синхронной электрической машины при реактивной нагрузке для целей САПР автоматизированного привода / И.П. Попов // Автоматизированные технологии и производства. 2023. №1(27). С.11-13.

I.P. Popov Account of instant values of torque of synchronous electric machine under reactive load for the purposes of CAD automated drive. *Avtomatizirovannye tehnologii i proizvodstva [Automation of technologies and production]*, 2023, no.1(27), pp.11-13. (In Russian).

УДК 662.869:65.011.056

СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В МЕТОДИЧЕСКОЙ ПЕЧИ МЕЛКОСОРТНОГО СТАНА 250

А.А. Дубровская, К.В. Абрамкин, И.Г. Самарина

ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»,
Магнитогорск, Российская Федерация

e-mail dubrovskay576@gmail.com, ig.samarina@magtu.ru

Аннотация. В статье рассмотрена система автоматического регулирования температуры в зоне с максимальной тепловой нагрузкой методической печи стана 250. Регулирование температуры рабочего пространства осуществляется с использованием контура регулирования соотношения газ-воздух. Важен точный контроль температуры, так как температура в печи определяет теплопередачу к заготовке, скорость его нагрева, распределение температуры в заготовке, интенсивность окалинообразования и другие параметры, которые характеризуют процесс тепловой обработки заготовки и работу самого агрегата.

Ключевые слова: методическая печь, нагрев, температура, регулирование.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из наиболее значимых этапов прокатного производства является нагрев заготовки, происходящий с целью повышения ее внутреннего теплосодержания. Это важная операция, необходимая для придания заготовке необходимых пластических свойств, обеспечения высокого качества стали и минимизации сопротивления деформации.

Для нагрева используются методические печи непрерывного действия.

В работе рассмотрена печь шагающего типа, предназначенная для одностороннего нагрева заготовок, которые располагаются на футерованных шагающих балках.

В печи заготовки нагреваются до температуры 1100 - 1250 °С [1].

В печи используется система сводового отопления, обеспечивающая высокую интенсивность нагрева, поскольку струи ударяются о металл, создавая на его поверхности высокотемпературный поток продуктов сгорания, движущийся с большой скоростью у движущейся заготовки [2].

Рабочее пространство печи разделено на 8 зон: зону подогрева (1, 2), нагрева (3, 4) и томильную зону (5, 6, 7, 8). Заготовки нагреваются постепенно, перемещаясь, сначала через зону подогрева, где температура достаточно низкая, затем через зоны нагрева, зоны с максимальной температурой, где происходит быстрый нагрев металла, и зону томления, в которой осуществляется томление.

В зоне подогрева производится постепенный нагрев металла, обеспечивающий необходимую скорость нагрева,

при которой не возникает недопустимого перепада температур по сечению заготовки.

В зоне нагрева температура металла достигает максимальных значений от 1000 до 1250 °С. При этом до высокой температуры нагревается только поверхность металла, что может привести к неравномерному нагреву по поперечному сечению заготовки.

В зоне томления происходит выравнивание температуры по сечению заготовки, где одна должна быть на 50 – 70 °С выше необходимой конечной температуры. В этой зоне поверхностная температура практически не изменяется и поддерживается на том же уровне, что и в зоне нагрева [3].

Процесс нагрева заготовок осуществляется путем сжигания топлива, которое состоит из природного газа и воздуха.

Воздух подогревается рекуператором печи до температуры 350 – 450 °С, и затем нагнетается в горелки. В горелки поступает смешанный газ в холодном виде. Соотношение объема, поступающего к горелкам природного газа к объему воздуха регулируется в соответствии с маркой стали, из которой изготовлены заготовки, и от температурного режима печи [2].

РЕАЛИЗАЦИЯ САР ТЕМПЕРАТУРЫ В ЗОНЕ С МАКСИМАЛЬНОЙ ТЕПЛОЙ НАГРУЗКОЙ МЕТОДИЧЕСКОЙ ПЕЧИ СТАНА 250

Система разработана для методической печи мелко-сортного стана 250 АО «НЛМК-Урал» в Нижних Серьгах, где из квадратной непрерывной заготовки производят арматуру.

Регулирование температуры рабочего пространства осуществляется за счет регулирования соотношения газ-воздух.

Далее пусковое устройство, условие срабатывания которого следующее:

$$\sigma = \begin{cases} +1, & \text{если } U'(t) > Z_H, \\ 0, & \text{если } \Delta Z_H < U'(t) < Z_H, \\ -1, & \text{если } U'(t) < Z_H \end{cases}$$

Сигнал σ переключающей функции, определяет текущее направление изменение параметра $X(\tau)$ в соответствии с условием:

$$X(\tau) = \begin{cases} X_{ИМ}^{min}, X_{ИМ}^{min} > X_{ИМ} \\ K_{ИМ} \int_0^E \sigma d\tau, X_{ИМ}^{min} \leq X_{ИМ} \leq X_{ИМ}^{man}, \\ X_{ИМ}^{man}, X_{ИМ}^{man} < X_{ИМ} \end{cases}$$

На элементе сравнения ЭСЗ осуществляется сравнение текущего значения расхода воздуха V_B и теоретическое значение, и формируется сигнал рассогласования, аналогично описанному выше [5, 2].

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ САР ТЕМПЕРАТУРЫ

Контуры регулирования реализованы в MS Excel [5], посредством моделирования выходного сигнала каждого элемента структурной схемы с начальными параметрами и получен переходный процесс, представленный на рис. 4:

Коэффициент передачи объекта $K_{ОБ} = 49,78 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{М}^3/\text{ч}$.

Постоянная времени объекта $T_{ОБ} = 100 \text{ с}$.

Время запаздывания $\tau_3 = 18 \text{ с}$.

Коэффициент передачи регулятора:

$k_p = 0,056 \text{ } \%$ хода ИМ/ $^\circ\text{C}$.

Скорость ИМ $k_{ИМ} = 1 \text{ } \%$ хода ИМ/с.

Шаг дискретизации $\Delta\tau = 1 \text{ с}$.

Время изодрома $T_{ИЗ} = 100 \text{ с}$.

Зона нечувствительности $Z_H = 1 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Стехиометрический коэффициент $L = 10, \text{ м}^3$.

Начальное положение ИМ $X(t_0) = 20 \text{ } \%$ хода ИМ.

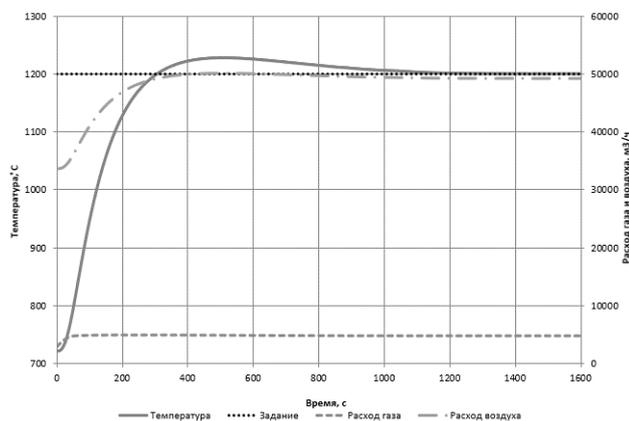
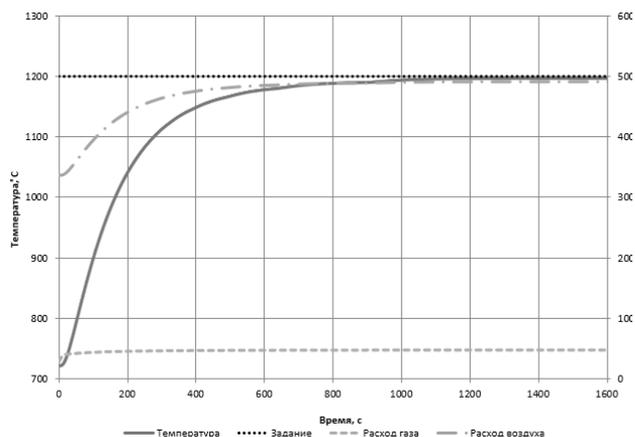


Рис. 4. Переходный процесс контура регулирования температуры при начальных параметрах

Выполнено исследование влияния скорости исполнительного механизма $k_{ИМ}$, $T_{ИЗ}$ и k_p на показатели качества переходного процесса в контуре регулирования температуры рабочего пространства методической печи, в ходе которого получен переходный процесс на рис. 5 при следующих параметрах: $T_{ИЗ} = 120 \text{ с}$, $k_{ИМ} = 1,5 \text{ } \%$ хода ИМ/с, $k_p = 0,036 \text{ } \%$ хода ИМ/ $^\circ\text{C}$

Рис. 5. Переходный процесс оптимальный



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Качественный нагрев – это такой процесс, при котором достигаются заданные температурные параметры, а также исключается возникновение брака металла.

Для обеспечивать качественный нагрев заготовки благодаря точному соблюдению температуры в печи необходима САР температуры.

Для обеспечения высокого качества регулирования температуры необходимо выбрать представительную точку контроля, правильно установить датчик температуры, выбрать подходящий регулятор и правильно настроить его, а также выбрать соответствующий регулирующий орган.

ЛИТЕРАТУРА

1. Жильцов А.П. Анализ энергоэффективности при эксплуатации методических многозонных печей для нагрева слябов по показателю теплопроизводительности / А.П. Жильцов, А.А. Харитоненко, А.В. Бочаров, А.Л. Челябинина // Современные наукоемкие технологии. – 2022. – №10(1). – С. 69-73.
2. Снижение удельного расхода топлива при управлении тепловым режимом по температуре поверхности нагреваемого металла / Б. Н. Парсункин, С. М. Андреев, Т. Г. Обухова, Т. У. Ахметов // Автоматизированные технологии и производства. – 2013. – № 5. – С. 302-309.
3. Определение заданий зонным регуляторам температуры при реализации энергосберегающего управления нагревом металла / Б.Н. Парсункин, С.М. Андреев, Т.У. Ахметов [и др.] // Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах. – 2015. – №1(6). – С. 16-19. – EDN UKTNHZ.
4. Парсункин, Б. Н. Автоматизированное энергосберегающее управление сжиганием смешанного газа в проходных печах листопрокатных станков / Б. Н. Парсункин, С. М. Андреев, И. Г. Самарина // Электротехнические системы и комплексы. – 2022. – № 1(54). – С. 68-74. – DOI 10.18503/2311-8318-2022-1(54)-68-74. – EDN НОТРОГО.
5. Системы автоматизации и управления: Электронный ресурс / Б. Н. Парсункин, С. М. Андреев, Е. С. Рябчикова, Т.Г. Сухонослова. – 2-е издание. – Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2021.

TEMPERATURE CONTROL SYSTEM IN THE HEATING FURNACE OF THE ROLLING MILL 250

A.A. Dubrovskaya, K.V. Abramkin, I.G. Samarina

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract. The article discusses the system of automatic temperature control in the zone with maximum heat load of the continuous furnace of the 250 plant. The temperature regulation of the working space is carried out using a control loop of the gas-air ratio. Accurate temperature control is important because the temperature in the furnace determines the heat transfer to the workpiece, the rate of its heating, the temperature distribution in the workpiece, the intensity of scale formation, and other parameters that characterize the heat treatment process of the workpiece and the operation of the unit itself.

Keywords: continuous furnace, heating, temperature, regulation.

REFERENCES

1. Zhiltsov A.P., Kharitonenko A.A., Bocharov A.V., Chelyadina A.L. Analysis of energy efficiency in the operation of methodical multi-zone furnaces for heating slabs in terms of heat output *Modern science-intensive technologies*. 2022, no 10(1), pp. 69-73.

2. Parsunkin B.N., Andreev S.M., Akhmetov T.U., Obukhova T.G. Reduction of the specific fuel consumption during control of thermal condition by the surface temperature of the heated metal [Snizhenie udel'nogo rashoda topliva pri upravlenii teplovym rezhimom po temperature poverhnosti nagrevaemogo metalla], *Avtomatizirovannye tehnologii i proizvodstva* [Automation of technologies and production], 2013, no.5, pp.302-309

3. Parsunkin B.N., Andreev S.M., Akhmetov T.U., Akhmetova A.U., Zhadinskiy D.Yu. Opredelenie zadaniy zonnym regulyatoram temperature pri realizatsii

energoberegayushichego upravleniya nagrevom metalla. *Matematicheskoe i programmnoe obespechenie system v promyshlennoy i sotsialnoy sferakh*. 2015. № 1 (6). S. 16–19

4. Parsunkin, B.N., Andreev S.M., Samarina I.G. Energysaving automated control of mixed gas combustion in heating through-type furnaces of sheet rolling mills [Avtomatizirovannoe energoberegayushchee upravlenie szhiganiem smeshannogo gaza v prokhodnykh pechakh listoprokatnykh stanov], *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы*, [Electrotechnical Systems and Complexes], Vol. 54, no. 1, p. 68-74

5. Parsunkin B.N., Andreev S.M., Rybchikova E.S., Sukhonosova T.G. *Sistemy avtomatizatsii i upravleniya* [Automation and control systems] Magnitogorsk, NMSTU Publ., 2021. <https://elibrary.ru/item.asp?id=47969127>. (In Russian)

Дубровская, А.А. Система автоматического регулирования температуры в методической печи мелкосортного стана 250/ А.А. Дубровская, К.В. Абрамкин, И.Г. Самарина // *Автоматизированные технологии и производства*. 2023. №1(27). С.14-17.

A.A. Dubrovskaya, K.V. Abramkin, I.G. Samarina Temperature control system in the heating furnace of the rolling mill 250. *Avtomatizirovannye tehnologii i proizvodstva* [Automation of technologies and production], 2023, no.1(27), pp.14-17. (In Russian).

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОБЪЕКТА В КОНТУРЕ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ С ИСПОЛНИТЕЛЬНЫМ МЕХАНИЗМОМ ПОСТОЯННОЙ СКОРОСТИ

Т.Г. Сухоносова, М.А. Бузмаков, В.В. Чернов, Д.Д. Филатов

ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»,
Магнитогорск, Российская Федерация

tgobuhova@gmail.com

Аннотация. В статье рассмотрено несколько практических методов определения динамических параметров объекта с S-образной кривой разгона. Показано, что для малоинерционных объектов в контуре регулирования с исполнительным механизмом постоянной скорости, использование классических графических и интерполяционных методик не позволяет точно описать динамику объекта управления. Для синтеза адекватной реальному процессу модели требуется учитывать скорость изменения управляющего воздействия. Были рассчитаны постоянная времени, время запаздывания и коэффициент передачи малоинерционного объекта управления. Точность определения полученных динамических параметров модели была проверена с помощью численного расчета выходного сигнала объекта методом Эйлера при подаче на вход импульсного воздействия. Эксперименты проводились на виртуальном лабораторном стенде САУ технологическим параметром. Полученная модель объекта управления может быть использована для синтеза и расчета оптимальных настроек регулятора.

Ключевые слова: идентификация объекта, моделирование контура регулирования, инерционность, динамические параметры объекта, кривая разгона, контур регулирования.

ВВЕДЕНИЕ

Задача идентификации управляемого технологического процесса, или построение математической модели объекта управления по экспериментальным данным, относится к одной из основных задач теории и практики автоматического управления [1-3].

Чем более точно выходные переменные математической модели совпадают с выходными параметрами реального процесса при одинаковых входных воздействиях, тем точнее подобрана структура и параметры модели. Точная и адекватная модель позволяет провести подробный анализ свойств и характеристик реального объекта с помощью вычислительных экспериментов над его моделью [2].

Моделирование объектов управления необходимо также для подбора оптимального закона регулирования и численных значений его параметров в соответствии с техническим заданием.

На практике широко применяются методы определения параметров объекта по кривой разгона или реакции объекта на импульсное входное воздействие [4-6].

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОБЪЕКТА ПО КРИВОЙ РАЗГОНА

Идентификация параметров объектов состоит из двух этапов: выбор структуры объекта и определение значений параметров по выбранной структурной схеме. Наилучшие результаты моделирования достигаются при анализе экспериментальных данных. В самом простейшем случае, анализ входного воздействия и выходного сигнала объекта [6, 7].

Для оценки динамических свойств процесса принято исследовать их реакцию на типовые входные воздействия, которые отражают особенности реальных производственных возмущений. Самыми распространенными типовыми воздействиями являются: ступенчатое, импульсное и гармоническое воздействия. Особенно важное значение придают единичному ступенчатому воздействию $1(t)$, т.к. все остальные воздействия могут быть сведены к нему. На практике вместо единичного воздействия подают однократное ступенчатое воздействие такой амплитуды, чтобы с помощью автоматических средств контроля было возможно было с необходимой точностью зафиксировать реакцию выходного сигнала объекта на изменение входного.

Динамические характеристики статических промышленных объектов обычно описываются инерционным звеном с запаздыванием или без запаздывания при экспоненциальной кривой разгона (1), или последовательным соединением двух инерционных звеньев первого порядка при S-образной кривой разгона (2), или колебательным звеном, если кривая разгона имеет вид затухающих колебаний (3) [1].

$$W(p) = \frac{1}{Tp+1} e^{-\tau_3 p}, \quad (1)$$

$$W(p) = \frac{1}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)}, \quad (2)$$

$$W(p) = \frac{1}{(T^2 p^2 + 2T\xi p + 1)}, \quad (3)$$

где T, T_1, T_2 – постоянные времени, τ_3 – время запаздывания, ζ – коэффициент демпфирования, p – дифференциальный преобразователь Лапласа.

Далее рассматриваются методы определения значений параметров объекта для S-образной кривой разгона с передаточной функцией (2). Методика определения параметров модели по экспериментальной кривой разгона графическим методом представлены в работах [6, 8].

К динамическим параметрам объекта относят следующие параметры. Время запаздывания τ_3 это отрезок времени от начала возмущения t_0 до момента пересечения касательной к траектории изменения выходной величины в точке максимальной скорости с осью времени. Постоянная времени (инерционность или время разгона) объекта $T_{об}$ это время, в течение которого выходная величина переходит из одного установившегося состояния в другое, при условии изменения этой величины с постоянной максимально возможной скоростью при подаче на вход ступенчатого воздействия. Скорость разгона ε также характеризует инерционные свойства объекта $\varepsilon = K_{об}/T_{об}$, где $K_{об}$ – коэффициент передачи объекта.

Если время перемещения ИМ из начального значения в конечное t_x при снятии кривой разгона значительно в сравнении с инерционностью объекта, то рекомендуется заменять входной сигнал на скачкообразный $1(t)$, сдвинутый по оси времени вперед на время $0,5t_x$. Время запаздывания в этом случае корректируют, уменьшая его на величину $\tau_3^* = \tau_3 - 0,5 t_x$ [8].

В структурную схему объекта, описываемого передаточной функцией вида (2), введено функциональное звено $y = f(x)$ для моделирования коэффициента передачи на рабочем участке статической характеристики объекта, рис. 1.

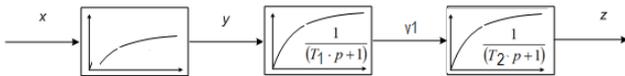


Рис. 1. Структурная схема объекта с самовыравниванием и нелинейной статической характеристикой

В работе также применялся метод Орманса, описанный в [8, 9] для расчета постоянных времени T_1 и T_2 в передаточной функции (2).

Для расчета выходного сигнала инерционных звеньев объекта, см. рис. 1, использовался один из самых распространенных численных методов – метод Эйлера [6, 10,11]:

$$\begin{aligned} \Delta y_1(t) &= [y(t) - y_1(t - \Delta t)] \frac{\Delta t}{T_1}, \\ y_1(t + \Delta t) &= y_1(t) + \Delta y_1(t); \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \Delta z(t) &= [y_1(t) - z(t - \Delta t)] \frac{\Delta t}{T_2}, \\ z(t + \Delta t) &= z(t) + \Delta z(t); \end{aligned} \quad (5)$$

где Δt – шаг дискретизации расчёта, в начальный момент наблюдается установившийся режим и в соответствии с экспериментальными данными для $x(t_0)$ рассчитываем $y(x(t_0)) = y_1(t_0) = z(t_0)$.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ

Эксперимент по снятию характеристик объекта проводился на виртуальном лабораторном стенде САУ технологического параметра [12]. На рассматриваемом рабочем

участке статическая характеристика имеет нелинейный вид, рис. 2.

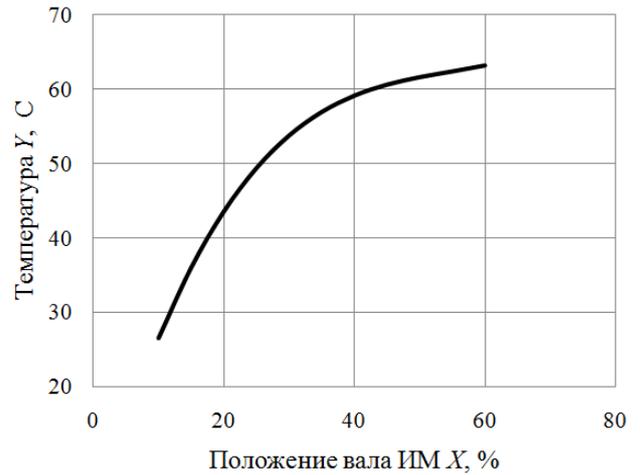


Рис. 2. Статическая характеристика объекта $y(x) = 32,9 \cdot 10^{-5}x^3 - 0,0539x^2 + 3,0937x + 0,5989$

Было снято три кривых разгона, одна из которых представлена на рис. 3. Траекторию изменения входного сигнала (положение вала ИМ) с постоянной скоростью, см. рис. 3, обозначим далее $x = v(t)$, а скачкообразное изменение положения вала ИМ будем обозначать $x = 1(t)$.

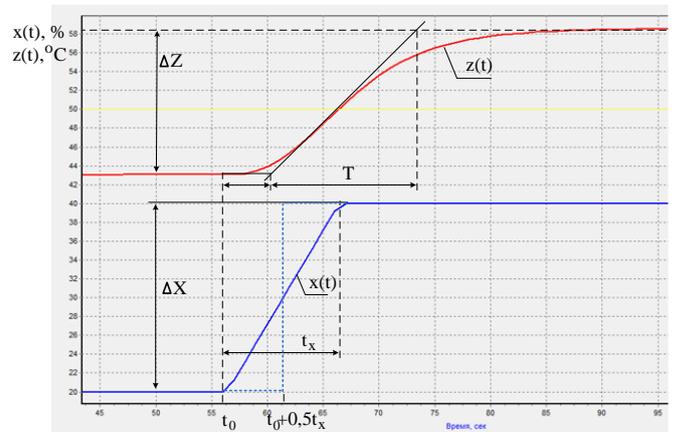


Рис. 3. Экспериментальные данные объекта: входное воздействие $x(t)$ и кривая разгона $z(t)$

Результаты определения параметров объекта графическим методом представлены в табл. 1. Для модели $z_1(t)$ были использованы средние значения, рассчитанные в табл. 1.

Таблица 1

Результаты эксперимента

№ опыта	Изменение положения вала ИМ, %	Время движения ИМ t_x , с	Δx , %	Δy , °C	τ_3 , с	$T_{об}$, с	$K_{об}$, °C/%	ε , °C/%/с
1	20-65	22,5	45	20,5	3,25	16,62	0,46	0,03
2	20-40	10,0	20	15,5	4,37	13,13	0,78	0,06
3	40-65	12,5	25	5,0	4,25	16,25	0,20	0,01
Среднее	–	15,0	30	13,67	3,96	15,33	0,48	0,03

Численным методом Эйлера по формулам (4)-(5) был рассчитан выходной сигнал модели объекта $z_1(t)$ при скачкообразном изменении положения вала на 45 % хода вала

ИМ. Выбранный первоначально шаг дискретизации расчёта $\Delta t = 2,5$ с оказался слишком велик, что привело к искажению выходного сигнала и волнообразному движению, поэтому шаг дискретизации был уменьшен до $\Delta t = 0,2$ с. Уменьшение шага дискретизации расчёта не привело к существенному приближению расчетной траектории к экспериментальной.

Для более точной аппроксимации модели объекта воспользовались методом Орманса и определили параметры модели $z_2(t)$: $T_1 = 8,9$ с и $T_2 = 5,69$ с. Результаты моделирования представлены на рис. 4.

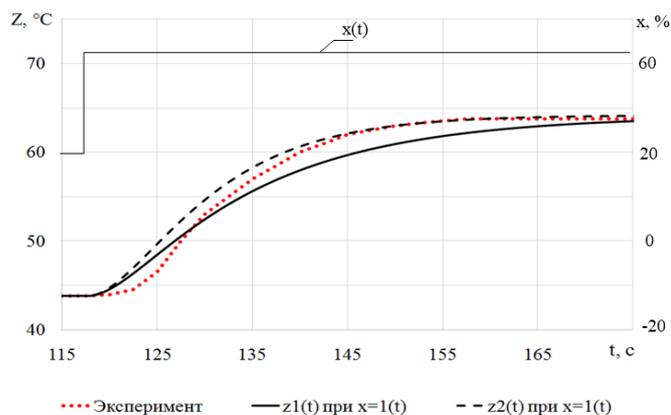


Рис. 4. Сравнение экспериментальной кривой разгона с расчетными траекториями при подаче на вход объекта скачкообразно изменяющегося сигнала

Параметры, рассчитанные методом Орманса, на первый взгляд подходят лучше, чем параметры определенные графическим методом. Можно предположить, что модель $z_2(t)$ при дополнении её звеном с транспортным запаздыванием 1-1,5 с будет достаточно точно отражать действительную динамику процесса. Но это не так, поскольку графики z_1 и z_2 на рис. 4 получены при подаче на вход скачкообразного входного сигнала с 20 до 65 % хода вала ИМ. В действительности скорость ИМ составляет $K_{им} = 2$ %/с, см. рис. 3, и изменение входного сигнала с 20 до 65 % занимает 22,5 с, что даже больше суммы двух инерционностей объекта $T_{об} + \tau_3 = 19,2$ с. Поэтому скорость ИМ оказывает существенное влияние на динамику процесса, что необходимо учитывать в математической модели. На рис. 5 представлены траектории изменения выходного сигнала тех же моделей z_1 и z_2 , но с учётом движения ИМ.

Сравнение экспериментальной кривой разгона с расчётными траекториями с учётом скорости ИМ на рис. 5 показывают, что найденные по классическим методикам параметры объекта не соответствуют действительной динамике процесса.

Примем, что отношение времени запаздывания к постоянной времени объекта $m = \tau/T = 0,26$ найденное графическим методом было определено верно. Тогда для новой модели $z_3(t)$ постоянную времени выразим $T_2 = m \cdot T_1$, а единственная неизвестная инерционность T_1 была подобрана с помощью надстройки MS Excel «поиск решения». При поиске решения указывались ограничения $\tau_3 < T_1 < 2T_{об}$.

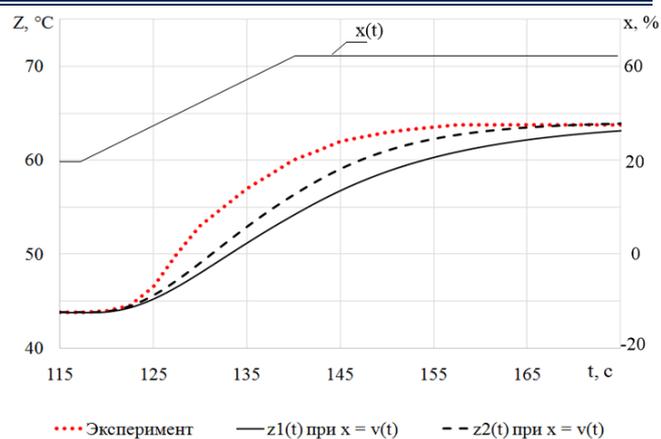


Рис. 5. Сравнение экспериментальной кривой разгона $Z(t)$ с расчетными траекториями при подаче на вход объекта изменяющегося с постоянной скоростью сигнала

Целевая функция I должна принимать минимальное значение:

$$I = \frac{1}{n-1} \sum \left[z \left(t_i \right) - Z_i \right]^2 \rightarrow \min, \quad (6)$$

где Z_i – экспериментальные значения по кривой разгона в моменты времени t_i , n – количество экспериментальных точек.

В результате были получены параметры модели $z_3(t)$: $T_1 = 7,04$ с и $T_2 = 1,82$ с, см. рис. 6. Целевая функция $I = 0,11$. Полученная постоянная времени объекта $T_1 = 7,04$ с оказалась в два раза меньше инерционности, определенной графическим методом.

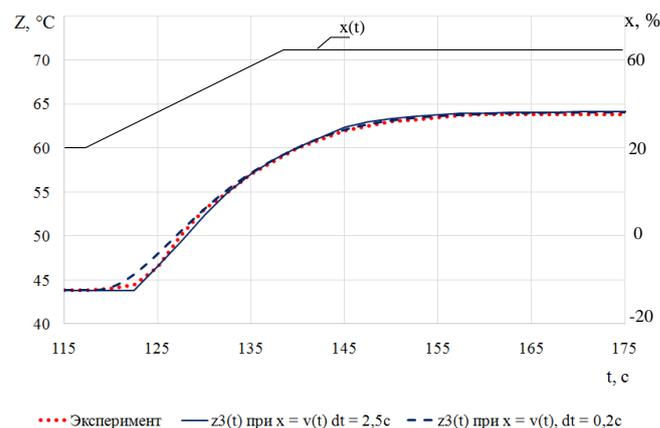


Рис. 6. Сравнение экспериментальной кривой разгона с расчетными траекториями

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Полученные при моделировании результаты были проверены на произвольном входном сигнале в виде импульса амплитудой 20 % и продолжительностью около 10 с, см рис. 7. По графикам видно, что модель z_3 , при расчете параметров которой учитывалось линейно нарастающее изменение входного сигнала наиболее близко подходит к экспериментальным данным, что подтверждает адекватность модели z_3 .

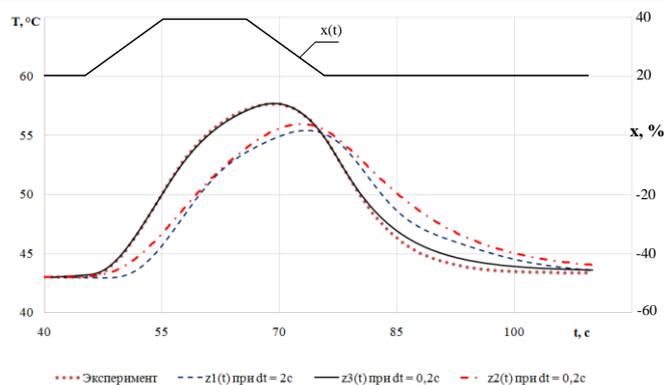


Рис. 7. Сравнение экспериментальных данных с расчетными траекториями

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены несколько практических методов расчета динамических параметров малоинерционного объекта в контуре регулирования с исполнительным механизмом постоянной скорости. Малоинерционным назовем такой объект, для которого постоянная времени определяемая по кривой разгона сопоставима с временем изменения управляющего воздействия.

Для объектов с большой инерционностью время движения ИМ пренебрежимо мало и не оказывает существенного влияния на вид кривой разгона. Чем меньше инерционность объекта, тем большее влияние на скорость изменения выходного параметра оказывает ИМ постоянной скорости, что необходимо учитывать при идентификации и составлении математической модели процесса.

Продemonстрировано, что для малоинерционных процессов плохо применимы классические графические и интерполяционные методики определения динамических параметров объекта. Обязательным для таких объектов является учет скорости перемещения вала ИМ. Наиболее простым способом корректировки инерционности объекта авторами работы предлагается формула $T^* = T_{об}/K_{им}$, где $T_{об}$ – графически определенная постоянная времени без учета времени движения ИМ. Но последнее утверждение требует экспериментальной проверки на других объектах.

Полученная модель объекта управления может быть использована для синтеза и расчета оптимальных настроек регулятора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ким Д.П. Теория автоматического управления: учебник и практикум для вузов. – Москва: Издательство Юрайт, 2020. – 276 с.
2. Тавокин Е.П. Теория управления: учеб. пособие / Е.П. Тавокин. – Москва: ИНФРА-М, 2023. – 202 с.
3. Свитек А.С. Разработка алгоритма идентификации параметров моделей объектов на примере системы управления температурой // Инженерный вестник Дона. – 2021. – № 8(80). – С. 140-150.
4. Безяев В.С., Макарычев П.П. Идентификация параметров моделей объектов методом регрессионного анали-

за // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2020. – № 1(53). – С. 19-27.

5. Адамбаев М.Д. Обоснование возможности использования кривых разгона промышленных объектов управления для их идентификации / М.Д. Адамбаев, Т.Ж. Калкабекова, Б. А. Жапаров, Н. М. Кумис // Norwegian Journal of Development of the International Science. – 2023. – № 109. – С. 52-55.

6. Парсункин Б.Н. Системы автоматизации и управления: Электронный ресурс / Б.Н. Парсункин, С. М. Андреев, Е. С. Рябчикова, Т.Г. Сухонослова. – 2-е издание. – Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2021. – URL: <https://magtu.informsystema.ru/uploader/fileUpload?name=2248.pdf&show=dcatalogues/1/1129743/2248.pdf&view=true> (дата обращения: 01.06.2023).

7. Нестеров С.В. Определение параметров математической модели пароперегревательного участка барабанного котла по экспериментальным данным / С. В. Нестеров, А.В. Нестеров, Т.А. Леонова // Техника и технологии: пути инновационного развития: сб. научн. трудов 10-й Международной науч.-практ. конф. (Курск, 30 июня 2021 г.). – Курск: Юго-Западный государственный университет, 2021. – С. 150-153.

8. Парсункин Б.Н. Системы автоматизации и управления. Лабораторный практикум: электронный ресурс / Б. Н. Парсункин, С. М. Андреев, Е. С. Рябчикова, Т. Г. Сухонослова. – Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2013. – URL: <https://magtu.informsystema.ru/uploader/fileUpload?name=1061.pdf&show=dcatalogues/1/1119471/1061.pdf&view=true> (дата обращения: 01.06.2023).

9. Сухонослова Т.Г. Идентификация динамических свойств параметра давления в рабочем пространстве методической печи / Т.Г. Сухонослова, А.Р. Яруллин, В.С. Новак // Теория и технология металлургического производства. – 2023. – № 1(44). – С. 39-44.

10. Ильичева М.Н. Использование современных численных методов для моделирования распространения импульсного воздействия на основе уравнений Эйлера / М.Н. Ильичева, Л.Ю. Катаева, Д.А. Масленников., А.А. Лощилов // Актуальные проблемы пожарной безопасности: материалы XXXI Международной науч.-практ. конф. Международный салон «Комплексная безопасность» (05-07 июня 2019 г.) – М., 2019. – С. 180-193.

11. Андреев С.М. Разработка и моделирование сложных систем автоматизации с учетом специфики технологических процессов / С.М. Андреев, Б.Н. Парсункин. – М.: Издательский центр «Академия». – 2016. – 272 с.

12. Андреев С.М., Обухова Т.Г. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013612340 РФ. Виртуальный стенд системы автоматического управления (САУ) технологическим параметром: № 2013612340: заявл. 19.09.2012: опубл. 26.01.2013.

DETERMINATION OF THE DYNAMIC PARAMETERS OF AN OBJECT IN THE CONTROL LOOP WITH CONSTANT-SPEED ACTUATOR

T.G. Sukhonosova, M.A. Buzmakov, V.V. Chernov, D.D. Filatov
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation

Abstract. The paper considers several practical methods for determining the dynamic parameters of an object with an S-shaped acceleration curve. It is shown that for low-inertia objects in a control loop with a constant-speed actuator, the use of classical graphical and interpolation techniques does not allow us to accurately describe the dynamics of the control object. The synthesis of an adequate model for the real process requires taking into account the rate of change of the controlling action. Time constant, lag time and transfer coefficient of low-inertia control object were calculated. The accuracy of definition of obtained dynamic parameters of the model was verified by means of numerical calculation of the object output signal by Euler's method when pulse action is applied at the input. The experiments were carried out on the virtual laboratory bench of ACS technological parameter. The obtained model of the control object can be used for synthesis and calculation of optimal controller settings.

Keywords: process identification, control loop simulation, inertia, dynamic process parameters, acceleration curve, control loop.

REFERENCES

1. Kim D.P. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya: uchebnik i praktikum dlya vuzov* [Theory of automatic control: textbook and workshop for universities], Moscow: Publishing house Yurait, 2020, 276 p.
2. Tavokin E.P. *Teoriya upravleniya: uchebnoe posobie* [Control Theory: Study Guide], Moscow: INFRA-M, 2023, 202 p.
3. Svitek A.S. Development of an algorithm for identifying the parameters of object models using the example of a temperature control system [Razrabotka algoritma identifikatsii parametrov modelej objektov na primere sistemy upravleniya temperaturoj], *Inzhenernyy vestnik Dona [Engineering Journal of Don]*, 2021, no.8 (80), pp. 140-150.
4. Bezyaev V. S., Makarychev P. P. Identification of object model parameters by the method of regression analysis [Identifikatsiya parametrov modelej objektov metodom regressionnogo analiza], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]*, 2020, no.1 (53), pp. 19-27.
5. Adambaev M.D., Kalkabekova T.J., Zhaparov B.A., Kumis N.M. Justification on the Possibility of the Using Acceleration Curves of Industrial Control Objects for Their Identification [Obosnovanie vozmozhnosti ispolzovaniya krivykh razgona promyshlennykh obektov upravleniya dlya ikh identifikatsii], *Norwegian Journal of Development of the International Science*, 2023, no.109. pp. 52-55.
6. Parsunkin B.N., Andreev C. M., Ryabchikova E. S., Sukhonosova T.G. *Sistemy avtomatizatsii i upravleniya* [Automation and control systems], Magnitogorsk, Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2021, URL: <https://magtu.informsistema.ru/uploader/fileUpload?name=2248.pdf&show=dcatalogues/1/1129743/2248.pdf&view=true> (accessed 01.06.2023).
7. Nesterov, S.V., Nesterov A.V., Leonova T.A. Determination of the Parameters of the Mathematical Model of the Superheating Section of the Drum Boiler According to Experimental Data [Opredelenie parametrov matematicheskoy modeli paroperegrevatel'nogo uchastka barabannogo kotla po eksperimentalnym dannym], *Proc. "Engineering and Technology: Ways of Innovative Development: Proceedings of the 10th International Scientific and Practical Conference. Kursk, June 30, 2021"*, Kursk, 2021, pp. 150-153.
8. Parsunkin B.N., Andreev C. M., Ryabchikova E. S., Sukhonosova T.G. *Sistemy avtomatizatsii i upravleniya. Laboratornyy praktikum* [Automation and control systems. Laboratory workshop], Magnitogorsk, Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2021, URL: <https://magtu.informsistema.ru/uploader/fileUpload?name=1061.pdf&show=dcatalogues/1/1119471/1061.pdf&view=true> (accessed 01.06.2023).
9. Sukhonosova, T. G. Yarullin A.R., Novak V.S. Identification of Dynamic Properties of the Pressure Parameter in the Working Space of a Heating Furnace [Identifikatsiya dinamicheskikh svoystv parametra davleniya v rabochem prostranstve metodicheskoy pechi], *Teoriya i tekhnologiya metallurgicheskogo proizvodstva [The Theory and Process Engineering of Metallurgical Production]*, 2023, vol. 44, no.1, pp. 39-44.
10. Ilyicheva M.N., Kataeva L.Y., Maslennikov D.A., Loschilov A.A. The use of modern numerical methods for modeling the propagation of impulsive action based on the Euler equations [Ispolzovanie sovremennykh chislennykh metodov dlya modelirovaniya rasprostraneniya impulsnogo vozdeystviya na osnove uravneniy Eylera], *"Aktualnye problemy pozharnoy bezopasnosti: materialy XXXI Mezhdunarodnoy nauch.-prakt. konf. Mezhdunarodnyy salon "Kompleksnaya bezopasnost" 05-07 iyunya 2019"* [Proc. "Current problems of fire safety"], Moscow, 2019, pp. 180-193.
11. Andreev S.M., Parsunkin. B.N. *Razrabotka i modelirovanie neslozhnykh sistem avtomatizatsii s uchetom specifiki tekhnologicheskikh processov* [Development and modeling of simple automation systems taking into account the specifics of technological processes], Moscow: Publishing Center "Academy", 2016, 272 p.
12. Andreev S.M., Obukhova T.G.. Virtual stand of an automatic control system (ACS) with a technological parameter [Virtual'nyy stand sistemy avtomaticheskogo upravleniya (SAU) tekhnologicheskim parametrom], Certificate of state registration of a computer program no. 2013612340, Russian Federation, 2013.

Сухоносова Т.Г. Определение динамических параметров объекта в контуре автоматического регулирования с исполнительным механизмом постоянной скорости / А. Т.Г. Сухоносова, М.А. Бузмаков, В.В. Чернов, Д.Д. Филатов // Автоматизированные технологии и производства. 2023. №1(27). С.18-22.

T.G. Sukhonosova, M.A. Buzmakov, V.V. Chernov, D.D. Determination of the dynamic parameters of an object in the control loop with constant-speed actuator. *Avtomatizirovannye tekhnologii i proizvodstva* [Automation of technologies and production], 2023, no.1(27), pp.18-22. (In Russian).

УДК62-533/666.362

СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ПЕЧЬЮ

В.А. Максимов, Е.Ю. Мухина

ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»,
Магнитогорск, Российская Федерация

vitaliy.maksimov.2002@list.ru, mukhinaeu@mail.ru

Аннотация. В современных вращающихся печах используется автоматизированная система подачи топлива – смесь коксового газа и воздуха. Преимущества и особенности предлагаемой системы автоматического контроля представлены в работе. Внедрение системы автоматического регулирования температуры в зоне обжига вращающейся печи позволяет повысить качество производимого шамота, исключить пережог топлива, а также снизить риск пересушки шамота путем поддержания определенного значения температуры в зоне обжига. В работе представлена система автоматического управления вращающейся печью, приведен комплекс технических средств для обеспечения бесперебойной работы печи, а также рассмотрено оборудование для поддержания качественного и безаварийного технологического процесса.

Ключевые слова: температура, вращающаяся печь, шамот, управление, автоматизация, регулирование

ВВЕДЕНИЕ

Автоматизация технологических процессов является одним из ключевых факторов повышения производительности, обеспечения оптимальных режимов работы оборудования, повышения безопасности работы персонала и надежности системы. Все существующие и разрабатываемые промышленные агрегаты в той или иной степени оснащаются средствами автоматизации и контроля.

Задача автоматического регулирования температуры в зоне обжига вращающейся печи состоит в надежном поддержании определенного соотношения между количеством подаваемого воздуха и коксового газа, необходимого для обжига шамота.

Поддержание оптимальной температуры обжига является непременным условием для получения максимальной температуры факела, а следовательно, повышения экономичности процесса горения и качества технологического процесса.

ТЕХНОЛОГИЯ ОБЖИГА МАТЕРИАЛА ВО ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ПЕЧИ

Обжиг материала происходит за счет горения факела коксового газа, направленного в печь. Подача газа в печь производится газовыми горелками с регулируемой длиной факела. Температура в печи достигает 1500°C.

Газовая горелка вращающейся печи является системой из трех труб, имеющих коаксиальное расположение. По центральному каналу подается сжатый атмосферный воздух, по среднему – коксовый газ, по наружному каналу – подача вентиляторного воздуха. Механизм изменения ориентации горелки во вращающихся печах позволяет

отклонять ее на угол до трех градусов от оси монтажа. Внутри трубы сжатого воздуха установлено устройство для изменения кинетической энергии подачи сжатого воздуха. Для эффективного ведения технологического режима обжига необходимо измерить температуру обжигаемого материала. Определить качество сырья можно измерив температуру в зоне обжига. Температура в зоне обжига достигает 1600°C. Чтобы защитить термопару, находящуюся в пространстве печи, от износа в футеровке выполнены специальные «полости». При вращении барабана печи в «полость» засыпается обжигаемый материал и термопара нагревается до температуры материала [1].

СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ПЕЧЬЮ

Производство огнеупорных изделий является сложным технологическим процессом, для которого характерно большое количество параллельно работающих элементов оборудования. Поэтому цеха снабжают соответствующим оборудованием для реализации автоматического контроля.

В соответствии с объемом и сложностью решаемых задач предусматривается широкая структура управления огнеупорными процессами.

АСУ ТП вращающейся печи предназначено для управления, регулирования, защиты, сигнализации и теплотехнического контроля основных параметров процесса обжига в печи. Система обеспечивает безопасность труда, оснащает производственный процесс необходимыми элементами блокировки и защиты, предусматривающими остановку работы печи при отклонении параметров технологического процесса от нормы [2].

АСУ ТП выполнена на базе комплекса технических средств (КТС), включающих в себя multifunctional контроллеры для решения задач контроля и управления объектом, а также набор средств КИПиА, обеспечивающий полное управление из автоматизированного рабочего места (АРМ) технолога и детальное отслеживание показателей температуры в процессе обжига материала [3].

КТС АСУ ТП имеет централизованную трехуровневую систему управления, структурная схема которой представлена на рис. 1.

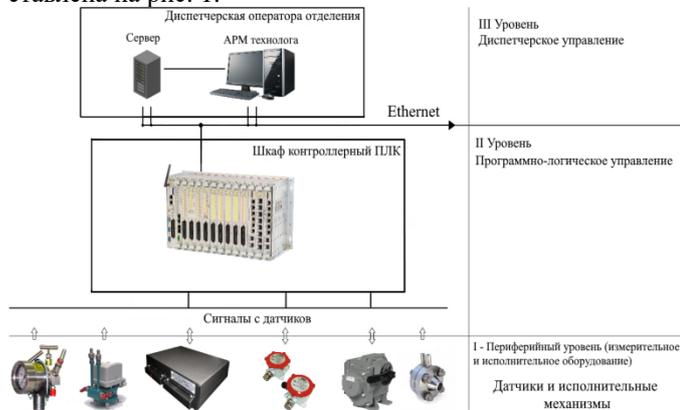


Рис. 1. Трехуровневая структурная схема КТС АСУ ТП

Все технические средства объединены промышленной информационной сетью Ethernet, обеспечивающей скоростной непрерывный обмен данными, повышая надежность функционирования системы.

ТЕХНИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ КОНТУРА УПРАВЛЕНИЯ ПЕЧЬЮ

Функциональная схема автоматизации (ФСА) является основным техническим документом, по которому определяют структуру и функциональные связи между технологическим процессом, приборами, средствами контроля и управления. ФСА также отражает характер автоматизации технологических процессов [4, 5]. ФСА представлена на рис. 2.

Назначение САУ – поддержание заданной температуры в зоне обжига вращающейся печи. Это необходимо для обеспечения нормальной работы печи и уменьшения брака готовой продукции.

В зоне обжига вращающейся печи №1 измеряют температуру радиационным пирометром (поз. 17а), текущее значение которого поступает на электронный потенциометр ЭПП-120/с (поз. 17б). Преобразованная величина в виде унифицированного выходного сигнала поступает на вход multifunctional контроллера МФК 3000 (поз. МФК) [6].

Для контроля давления коксового газа и воздуха на трубопроводах установлены напорометры мембранные показывающие НМ-П1 (поз. 11а, 12а), текущее значение которых поступает на вход МФК 3000 (поз. МФК).

Для измерения расхода коксового газа и воздуха в трубопроводах установлены сужающие устройства (диафрагмы расходомерные) Ду 140 (поз. 18а) и Ду 160 (поз. 19а). С сужающими устройствами связаны измерительные преобразователи расхода дифманометры-расходомеры

ДМЭР-МИ (поз. 18б, 19б), сигнал с которых поступает на вход МФК 3000 (поз. МФК) [7].

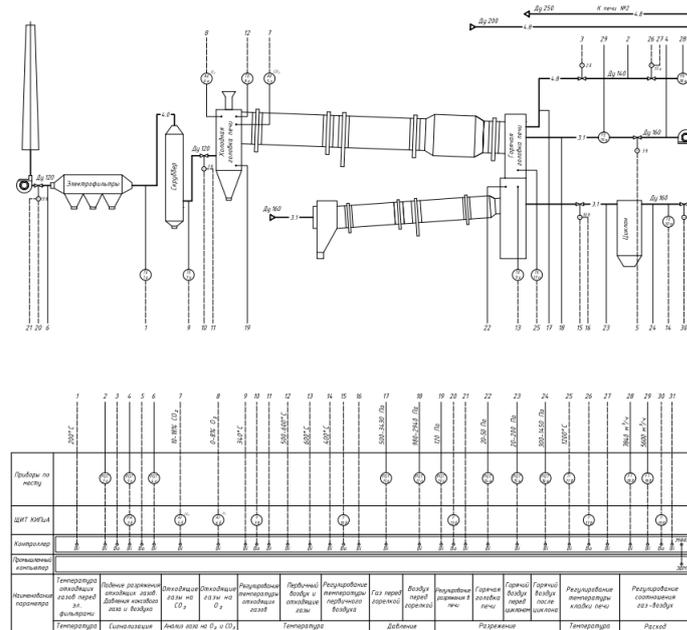


Рис. 2. Функциональная схема автоматизации

Сигналы в контроллере МФК 3000 преобразуются в цифровую форму, удобную для восприятия процессором ЭВМ в диспетчерской автоматизированного рабочего места технолога. Текущий сигнал температуры в зоне обжига вращающейся печи №1 сравнивается с заданием и рассчитывается управляющее воздействие. Если между ними имеется разница (отклонение), то контроллер вырабатывает управляющее воздействие, и передает аналоговый сигнал на пускатели бесконтактные реверсивные ПБР-2М (поз. 17в, 19в), где сигнал усиливается по мощности. Пускатели приводят в действие исполнительные механизмы МЭО-250/63-0,25 (поз. 17г, 19г), которые, в соответствии с управляющим сигналом, увеличивают или уменьшают процент открытия заслонок в трубопроводе коксового газа и воздуха.

Соотношение расходов коксового газа и воздуха, необходимых для процесса горения материала в печи, вычислено заранее в зависимости от необходимой температуры в печи.

С помощью автоматизированного рабочего места (поз. ЭВМ) технолог может вести наблюдение за состоянием технологического процесса посредством программы визуализации PcVue V9.0, а также устанавливать необходимый уровень подачи коксового газа и атмосферного воздуха вручную [8].

Спецификация оборудования, заявленного в схеме автоматизации, представлена в табл. 1.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Внедрение системы автоматического регулирования температуры в зоне обжига вращающейся печи позволяет повысить качество производимого шамота, исключить пережог топлива, а также снизить риск пересушки шамота путем поддержания определенного значения температуры

в зоне обжига. Использование рассматриваемого метода контроля подачи газа во вращающуюся печь позволяет оптимизировать расход топлива, свести к минимуму вмешательство сотрудников цеха в технологический процесс, а также минимизировать количество брака готовой продукции посредством точного расчета и поддержания заданных параметров печи современными контроллерами.

Таблица 1

Поз.	Наименование	Кол.	Примечание
1а, 7а, 8а, 9а, 10а	Термопреобразователь сопротивлений, ТСПУ 9313	5	
2а, 3а, 4а, 1а, 12а	Напоромер мембранный показывающий, НМ-П1	5	
2б	Мембранный привод клапана без-опасности, ПМКБ	1	
3б	Сигнализатор падения разрежения, СПРМ	1	
3в	Клапан соленоидный электромагнитный, КСЭ	1	
5а, 6а	Датчик газоанализатора, ГА-2500	2	
5б, 6б	Вторичный прибор газоанализа, ЭЛР-82	2	
7б, 10б, 13б, 17б, 19б	Пускатель бесконтактный реверсивный, ПБР-2М	5	
7в, 10в, 13в, 17в, 19в	Исполнительный механизм, МЭО 250/63-0,25	5	
13а, 14а	Дифманометр-тягомер мембранный показывающий, ДТММП-100-М1	2	
15а, 16а	Тягомер мембранный показывающий, ТМ-П1	2	
17а	Радиационный пирометр, Рапир	1	
17б	Электронный потенциометр самопишущий, ЭПП-120/с	1	
18а	Диафрагма расходомерная, Ду140	1	
18б, 19б	Дифманометр-расходомер, ДМЭР-МИ	2	
19а	Диафрагма расходомерная, Ду160	1	
МФК	Многофункциональный контроллер, МФК 3000	1	
ЭВМ	АРМ технолога на базе Windows XP	1	

ЛИТЕРАТУРА

1. Сеченов, П.А. Моделирование сложных металлургических систем: сборник / П.А. Сеченов. – Новокузнецк, 2017. – 85-90 с.: ил., – ISBN 2542-1670. – Текст: непосредственный.
2. Солнцева, Е.Д. Разработка горелки с регулируемой длиной факела для вращающихся печей / Е.Д. Солнцева, Н.Б. Лошкарев // Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве: сборник докладов ТИМ 2019. Екатеринбург, 2019. – С. 150-157.3.
3. ALL-Pribors: [сайт]. – Москва, 2020. – URL: <https://all-pribors.ru/opisanie/45216-10-mfk3000-mfk1500-47619> (дата обращения: 01.07.2023). – Текст: Изображение: электронные.
4. Перри, Р.Х. Справочник инженера-технолога: справочник / Р.Х. Перри, К.Х. Чилтон. – 7-е изд., – Хаскелл, 1997. – 60 с.: ил., табл. – ISBN 978-0-07-049841-9. – Текст: непосредственный.
5. Селевцов, Л.И. Автоматизация технологических процессов: учебник, 5-е изд. / Л.И. Селевцов, А.П. Селевцов, Москва: Академия, 2019. – 350 с. ISBN 978-5-4468-7586-3. – Текст: непосредственный.
6. Андреев, С.М. Разработка и моделирование несложных систем автоматизации с учетом специфики и технологических процессов: учебное пособие / С.М. Андреев, Б.Н. Парсункин, Москва: Изд. центр «Академия», 2016. – 272 с.
7. Андреев, С.М. Оптимизация управления технологическими процессами в металлургии: учебное пособие / С.М. Андреев, Б.Н. Парсункин, Магнитогорск: МГТУ, 2009. – 576 с. – Текст: непосредственный.
8. Самарина, И. Г. Метрология и технические измерения: практикум / И. Г. Самарина, Е. Ю. Мухина, А. Р. Бондарева. – Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2021. – 57 с.

AUTOMATIC CONTROL SYSTEM OF THE ROTATING FURNACE

V.A. Maksimov, E.Yu. Mukhina

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation

vitaliy.maksimov.2002@list.ru, mukhinaeu@mail.ru

Abstract. Modern rotating furnaces use an automated fuel supply system - a mixture of coke oven gas and air. The advantages and features of the proposed automatic control system are presented in the work. The introduction of an automatic temperature control system in the firing zone of a rotating furnace makes it possible to improve the quality of the fireclay produced, eliminate fuel overburning, and reduce the risk of fireclay overdrying by maintaining a certain temperature in the firing zone. The paper presents an automatic control system for a rotating furnace, provides a set of technical means to ensure the uninterrupted operation of the furnace, and also considers equipment to maintain a high-quality and trouble-free process.

Keywords: temperature, rotating furnace, fireclay, control, automation, regulation

REFERENCES

1. Sechenov, P.A. Modeling of complex metallurgical systems [Modelirovaniye slozhnykh metallurgicheskikh sistem]: collection / P.A. Sechenov. - Novokuznetsk, 2017. - 85-90 p.: Ill., - ISBN 2542-1670. – Text: direct.
2. Solntseva, E.D. Development of a burner with adjustable flame length for rotating furnaces [Razrabotka gorelki s reguliruyemoy dlinoy fakela dlya vrashchayushchikhsya pechey] / E.D. Solntseva, N.B. Loshkarev // Heat engineering and informatics in education, science and production: collection of reports TIM 2019. Ekaterinburg, 2019. - P. 150-157.3.
3. ALL-Pribors: [website]. Moscow, 2020 – URL: <https://all-pribors.ru/opisanie/45216-10-mfk3000-mfk1500-47619> (date of access: 01/07/2023) - Text. Image: electronic.
4. Perry, R.H. Handbook of a process engineer [Spravochnik inzhenera-tehnologa]: a handbook / R.Kh. Perry, K.H. Chilton. - 7th ed., - Haskell, 1997. - 60 p.: ill., tab. – ISBN 978-0-07-049841-9. – Text: direct.
5. Selevtsov, L.I. Automation of technological processes [Avtomatizatsiya tekhnologicheskikh protsessov]: textbook, 5th ed. / L.I. Selevtsov, A.P. Selevtsov, Moscow: Academy, 2019. - 350 p. ISBN 978-5-4468-7586-3. – Text: direct.
6. Andreev, S.M. Development and modeling of simple automation systems, taking into account the specifics and technological processes [Razrabotka i modelirovaniye neslozhnykh sistem avtomatizatsii s uchetom spetsifiki i tekhnologicheskikh protsessov]: study guide / S.M. Andreev, B.N. Parsunkin, Moscow: Ed. Center "Academy", 2016. - 272 p. – Text: direct.
7. Andreev, S.M. Optimization of control of technological processes in metallurgy [Optimizatsiya upravleniya tekhnologicheskimi protsessami v metallurgii]: textbook / S.M. Andreev, B.N. Parsunkin, Magnitogorsk: MSTU, 2009. - 576 p. – Text: direct.
8. Samarina, I. G. Metrology and technical measurements [Metrologiya i tekhnicheskiye izmereniya]: workshop / I. G. Samarina, E. Yu. Mukhina, A. R. Bondareva. – Magnitogorsk: Magnitogorsk State Technical University. G.I. Nosova, 2021. - 57 p.

Максимов, В.А. Система автоматического управления вращающейся печью / В.А. Максимов, Е.Ю. Мухина // Автоматизированные технологии и производства. 2023. №1(27). С.23-26.

V.A. Maksimov, E.Yu. Mukhina Automatic control system of the rotating furnace *Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva* [Automation of technologies and production], 2023, no.1(27), pp.23-26. (In Russian).

УДК 531.351

АВТОСТАБИЛИЗАЦИЯ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ: КИНЕМАТИКА

И.П. Попов

Курганский государственный университет, Курган, Россия

e-mail: uralakademia@kurganstalmost.ru

Аннотация. Установлено, что из ключевого обстоятельства, определяющего возможность обобщения циклотронного движения на механику, заключающегося в том, что лагранжиан электрона вдвое больше его кинетической энергии, что применительно к механическому устройству ротатору следует трактовать как равенство кинетической и потенциальной энергий, необходимо следует, что в состав стабилизированного ротатора должны входить элементы, которые в состоянии запастись оба этих вида энергии, а именно, груз и пружина. Собственная частота вращения стабилизированного ротатора строго фиксирована (не зависит ни от момента инерции, ни от момента импульса) и замечательным образом совпадает с собственной частотой колебаний маятника с идентичными параметрами. При изменении момента импульса изменяется радиус и тангенциальная скорость (частота вращения при этом не меняется и равна собственной).

Ключевые слова: ротатор, маятник, частота, стабилизация, выбег, энергия, момент импульса, циклотронное движение.

Механические и электромагнитные явления и процессы во многих случаях математически изоморфны [1, 2]. Это дает возможность обобщать достижения одной научной специальности на другую. В этом смысле представляет интерес циклотронное движение электрического заряда [3], которое характеризуется *фиксированной частотой вращения*. Это следует из баланса сил.

$$F = qvB = \frac{mv^2}{r} \Rightarrow v = \frac{qB}{m}r = \omega r \Rightarrow \omega = \frac{qB}{m}.$$

Здесь q – величина электрического заряда, v – тангенциальная скорость заряда, B – магнитная индукция, m – масса заряженной частицы, r – радиус циклотронного движения, ω – частота вращения.

Частота действительно не зависит ни от скорости, ни от радиуса.

Ключевым обстоятельством для возможности обобщения циклотронного движения на механику является то, что лагранжиан электрона, движущегося поперек постоянного магнитного поля, вдвое больше его кинетической энергии.

$$L = \frac{mv^2}{2} + e(\mathbf{v}, \mathbf{A}).$$

Векторный потенциал магнитного поля равен

$$\mathbf{A} = \frac{1}{2}[\mathbf{B}, \mathbf{r}].$$

При этом $\mathbf{v} = [\boldsymbol{\omega}, \mathbf{r}]$. Таким образом,

$$L = \frac{mv^2}{2} + \frac{q^2 B^2 r^2}{2m}.$$

Второе слагаемое равно

$$\frac{q^2 B^2 r^2}{2m} = \frac{q^2 B^2}{2m} \frac{m^2 v^2}{q^2 B^2} = \frac{mv^2}{2}.$$

$$L = 2 \frac{mv^2}{2}.$$

Целью работы является нахождение механического аналога циклотронного движения и определение схемы соответствующего устройства, которое уместно назвать стабилизированным ротатором.

Синтез стабилизированного ротатора. Из ключевого обстоятельства, определяющего возможность обобщения циклотронного движения на механику, заключающегося в том, что лагранжиан электрона вдвое больше его кинетической энергии, что применительно к стабилизированному ротатору следует трактовать как равенство кинетической и потенциальной энергий, необходимо следует, что в состав стабилизированного ротатора должны входить элементы, которые в состоянии запастись оба этих вида энергии, а именно, *груз* (массой m) и *пружина* (с коэффициентом упругости k).

В соответствии с характером циклотронного движения и, соответственно, ротатора, необходимо имеет место *радиус* вращения (r) и *циклическая частота* (ω).

Из равенства энергий следует

$$\frac{k(\Delta x)^2}{2} = \frac{mv^2}{2} = \frac{mr^2 \omega^2}{2} \Rightarrow \omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \frac{\Delta x}{r}.$$

Здесь Δx – величина абсолютной деформации пружины.

Неизменность циклической частоты обеспечивается очевидным ключевым условием

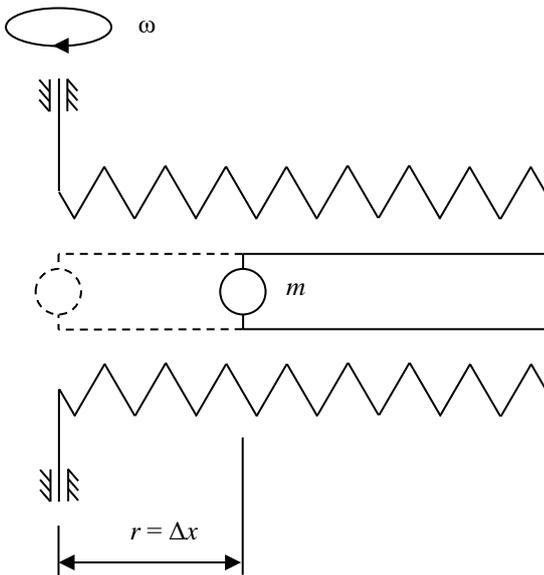
$$\Delta x = r.$$

Установленные необходимые обстоятельства определяют принципиальную схему стабилизированного ротатора, которая представлена на рисунке.

Собственная частота вращения стабилизированного ротатора

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (1)$$

строго фиксирована (не зависит ни от момента инерции, ни от момента импульса) и замечательным образом совпадает с собственной частотой колебаний маятника с идентичными параметрами [4].



Стабилизированный ротатор

Кинематика стабилизированного ротатора. Момент импульса стабилизированного ротатора равен

$$L = J\omega_0 = mr^2\omega_0 = mr^2\sqrt{\frac{k}{m}} = r^2\sqrt{mk}.$$

Здесь J – момент инерции,

$$x_\omega = \sqrt{mk}$$

– волновой реактанс.

$$r = \frac{v}{\omega_0}.$$

$$L = r^2 x_\omega = \frac{v^2}{\omega_0^2} x_\omega = v^2 \frac{m}{k} \sqrt{mk} = \frac{m}{\omega_0} v^2,$$

При изменении момента импульса изменяется радиус и тангенциальная скорость (частота вращения при этом не меняется и равна собственной).

Положению груза, при котором его центр масс совпадает с осью вращения, соответствует состояние неопределенного равновесия. При вращении груз равновероятно может отклониться в любую из двух сторон и, соответственно, может развиваться как сжатие, так и растяжение пружины.

Состояние неопределенного равновесия можно исключить, обеспечив начальное (статическое) смещение груза r_0 и равную ему начальную деформацию пружины.

Заключение. Заявленная цель работы достигнута. Механический аналог циклотронного движения определен. Им является стабилизированный ротатор, обладающий фиксированной частотой вращения, не зависящей от момента импульса и момента инерции.

Это означает, что при нулевом вращающем моменте в стационарном режиме частота вращения стабилизированного ротатора не может быть произвольной и принимает единственное значение.

Другими особенностями стабилизированного ротатора являются идентичность формулы частоты вращения формуле частоты пружинного маятника, равенство кинетической и потенциальной энергий и вытекающее из этого равенство радиуса вращения груза величине деформации пружины.

ЛИТЕРАТУРА

1. Попов И.П. Реактансы и сассептансы механических систем // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2021. № 70. С. 64–75. DOI 10.17223/19988621/70/6
2. Кочержинская Ю.В., Прохоров И.Е. Современное состояние проблемы моделирования сложных технологических процессов // Автоматизированные технологии и производства. 2009. № 3. С. 25–29.
3. Опарина Ю.С., Савилов А.В. Спонтанное циклотронное излучение плотного электронного сгустка // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2018. Т. 82. № 12. С. 1771–1774. DOI: 10.1134/S0367676518120311
4. Гладков С.О., Богданова С.Б. Хаотическая динамика взаимодействующих маятников (решение проблемы синхронизации) // Инженерная физика. 2019. № 1. С. 49–61.

AUTOSTABILIZATION OF ANGULAR VELOCITY: KINEMATICS

I.P. Popov

Kurgan State University, Kurgan, Russia

e-mail: uralakademia@kurganstalmost.ru

Abstract. It has been established that from the key circumstance that determines the possibility of generalizing cyclotron motion to mechanics, which consists in the fact that the Lagrangian of an electron is twice its kinetic energy, which, as applied to a mechanical device rotator, should be interpreted as the equality of kinetic and potential energies, it necessarily follows that the composition of a stabilized The rotator must include

elements that are able to store both of these types of energy, namely, a load and a spring. The natural rotation frequency of a stabilized rotator is strictly fixed (it does not depend on either the moment of inertia or the moment of momentum) and remarkably coincides with the natural frequency of the pendulum with identical parameters. When the angular momentum changes, the radius and tangential velocity change (the rotation frequency does not change and is equal to its own).

Keywords: rotator, pendulum, frequency, stabilization, run-out, energy, angular momentum, cyclotron motion.

REFERENCES

1. Popov I.P. Reactances and susceptances of mechanical systems [Reaktansy i sasseptansy mekhanicheskikh sistem], *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika [Tomsk State University Bulletin. Mathematics and mechanics]*, 2021, no. 70, pp. 64–75. DOI 10.17223/19988621/70/6 (In Russian)

2. Kocherzhinskaya Yu.V., Prokhorov I.E. The current state of the problem of modeling complex technological processes [Sovremennoye sostoyaniye problemy modelirovaniya slozhnykh tekhnologi-cheskikh protsessov]. *Avtomatizirovannye tehnologii i proizvodstva [Automation of technologies and production]*, 2009, no. 3, pp. 25–29. (In Russian)

3. Oparina Yu.S., Savilov A.V. Spontaneous cyclotron radiation of a dense electron bunch [Spontannoye tsiklotronnoye izlucheniye plotnogo elektronnoogo sgustka]. *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Seriya fizicheskaya [News of the Russian Academy of Sciences. Physical series]*, 2018, vol. 82, no. 12, pp. 1771-1774. DOI: 10.1134/S0367676518120311 (In Russian)

4. Gladkov S.O., Bogdanova S.B. Chaotic dynamics of interacting pendulums (solution of the synchronization problem) [Khaoticheskaya dinamika vzaimodeystvuyushchikh mayatnikov (resheniye problemy sin-khronizatsii)]. *Inzhenernaya fizika [Engineering Physics]*, 2019, no. 1, pp. 49–61. (In Russian)

Попов И.П. Автостабилизация угловой скорости: кинематика / И.П. Попов // Автоматизированные технологии и производства. 2023. №1(27). С.27-29.

I.P. Popov Autostabilization of angular velocity: kinematics. *Avtomatizirovannye tehnologii i proizvodstva [Automation of technologies and production]*, 2023, no.1(27), pp.27-29. (In Russian).

УДК 378.4

ИТОГИ УНИВЕРСИАДЫ «ПУТЬ К УСПЕХУ» ПО МЕТРОЛОГИИ И СРЕДСТВАМ ИЗМЕРЕНИЯ ПО НАПРАВЛЕНИЮ «УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ» 2023

Т.Г. Сухоносова

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

tgobuhova@gmail.com

Аннотация. На кафедре автоматизированных систем управления института энергетики и автоматизированных систем ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И.Носова» весной 2023 года прошла Универсиада «Путь к успеху» по направлению «Управление в технических системах (метрология и средства измерения)». Участие в Универсиаде приняли более 170 студентов из разных регионов России.

Ключевые слова: универсиада, метрология, измерения, управление в технических системах.

На базе кафедры автоматизированных систем управления ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И.Носова» была проведена вторая Всероссийская Универсиада «Путь к успеху» по направлению 27.03.04 «Управление в технических системах» по метрологии и средствам измерения (далее Универсиада).

Универсиада проводилась с января по апрель 2023 года и включала в себя два этапа. Первый (отборочный) этап проводился дистанционно и включал 20 тестовых вопросов и задач. Второй (заключительный) этап проходил в очном формате в лаборатории кафедры АСУ 16 марта 2023 г и содержал теоретические и практические задания, см. рис. 1 и рис. 2.



Рис. 1. Выполнение теоретической части заданий заключительного этапа Универсиады



Рис. 2. Выполнение практической части заданий заключительного этапа Универсиады

Под руководством заведующего кафедрой АСУ Сергея Михайловича Андреева преподавателями кафедры Ириной Геннадьевной Самариной, Альбиной Робертовной Бондаревой и Татьяной Геннадьевной Сухоносовой был разработан комплект заданий для проведения универсиады.

Участникам заключительного этапа необходимо было провести поверку прибора и заполнить соответствующие документы, а также выполнить задания на лабораторной установке для получения градуировочной характеристики термоэлектрического преобразователя [1, 2].

Работы участников заключительного этапа оценивали члены жюри: д.т.н., доцент, заведующий кафедрой АСУ Сергей Михайлович Андреев, к.т.н., доцент кафедры АСУ Михаил Юрьевич Рябчиков, инженер отдела пусконаладочных работ АСУ ТП ЗАО «Консом СКС» Александр Сергеевич Прасолов.

Общее количество участников Универсиады составило 171 обучающихся вузов и выпускников прошлых лет, из

них более 40 студентов, проживающих в других городах России, среди которых Москва, Санкт-Петербург, Балаково, Иваново, Екатеринбург, Челябинск, Сибай, Пермь, Белорецк, Учалы, Зилаир и Новый Уренгой.

По итогам Универсиады было присуждено пять призовых мест.



Рис. 3. Заведующий кафедры АСУ Андреев С.М., победитель Универсиады 2023 Богдан Гавриленко, координатор Универсиады ст.преподаватель Сухоносова Т.Г.

Победителем Универсиады стал студент третьего курса Гавриленко Богдан Алексеевич, гр. АНб-20-1. Второе место разделили студенты четвертого курса Сниткин Данил Олегович и Абрамкин Кирилл Вадимович из гр. АТСб-19-1. Третье призовое место заняли студенты третьего курса Бузмаков Максим Алексеевич и Трунилова Любовь

Андреевна из гр. АТСб-20-1. Победителю и призерам Универсиады вручены почетные дипломы, призы и сувениры с символикой вуза, а также предоставлены дополнительные баллы при поступлении в магистратуру МГТУ им. Г.И. Носова по профилю «Цифровые системы управления технологическими комплексами».

Подробную информацию об Универсиаде можно узнать на сайте Универсиады «Путь к успеху» <http://univer.magtu.ru> или странице кафедры АСУ [3, 4].

ЛИТЕРАТУРА

1. Самарина, И. Г. Метрология и технические измерения: практикум / И. Г. Самарина, Е. Ю. Мухина, А. Р. Бондарева. – Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2021. – 57 с.

2. Бондарева, А. Р. Электрические измерения: Практикум / А. Р. Бондарева, И. Г. Самарина. – Магнитогорск : Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2022. – 95 с.

3. Интернет-страница кафедры АСУ МГТУ им. Г.И. Носова. – URL: <https://www.magtu.ru/sveden/struct/instituty-fakultety-kafedry/institut-energetiki-i-avtomatizirovannykh-sistem/kafedry-instituta/napravlenie-avtomatizirovannye-sistemy/kafedra-avtomatizirovannykh-sistem-upravleniya.html> (дата обращения 01.06.2023).

4. Сухоносова, Т.Г. Итоги Универсиады 2022 года «Путь к успеху» по метрологии и средствам измерения по направлению «Управление в технических системах» // Автоматизированные технологии и производства. 2022. №1(25), С. 26-27.

RESULTS OF THE UNIVERSIADE «WAY TO SUCCESS» IN METROLOGY AND MEASURING MEANS IN THE DIRECTION «MANAGEMENT IN TECHNICAL SYSTEMS» 2023

T.G. Sukhonosova

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation

Abstract. At the Department of Automated Control Systems of the Institute of Energy and Automated Systems of the Nosov Magnitogorsk State Technical University in the spring of 2023 «Way to Success» was held in the direction «Control in technical systems (metrology and measuring means)». More than 170 students from different regions of Russia participated in the Universiade.

Keywords: universiade, metrology, measuring, control in technical systems.

REFERENCES

1. Samarina, I. G., Mukhina E. Yu., Bondareva A. R. *Metrologiya i tekhnicheskie izmereniya: praktikum* [Metrology and technical measuring: workshop], Magnitogorsk, Publ. Magnitogorsk State Technical University G.I. Nosova, 2021, p. 57.

2. Bondareva A. R., Samarina, I. G. *Elektricheskie izmereniya: praktikum* [Electrical Measurements: Workshop], Magnitogorsk, Publ. Magnitogorsk State Technical University G.I. Nosova, 2022, p. 95.

3. *Internet-stranica kafedry ASU MGTU im. G.I. Nosova* [Page of the department of Automated Control Systems of

Nosov Magnitogorsk State Technical University], URL: <https://www.magtu.ru/sveden/struct/instituty-fakultety-kafedry/institut-energetiki-i-avtomatizirovannykh-sistem/kafedry-instituta/napravlenie-avtomatizirovannye-sistemy/kafedra-avtomatizirovannykh-sistem-upravleniya.html> (accessed 1 June 2023).

4. Sukhonosova T.G. Results of the Universiade 2022 «Way to success» in metrology and measuring means in the direction «Control in technical systems». *Avtomatizirovannye tehnologii i proizvodstva* [Automation of technologies and production], 2022, no. 1(25), pp. 26-27.