

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПРОИЗВОДСТВА

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПРОИЗВОДСТВА

№1 (25) июнь 2022 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 автоматики, 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

Председатель редакционной коллегии

Парсункин Борис Николаевич – доктор технических наук, профессор

Главный редактор:

Андреев Сергей Михайлович – доктор технических наук, доцент

Контакты

Главный редактор: Андреев Сергей Михайлович
Тел.: (3519) 29-85-27
Редакционная коллегия: Парсункин Борис Николаевич
Тел.: (3519) 29-84-32
E-mail: atp@magtu.ru

Адрес редакции: 455000, г. Магнитогорск,
пр. Ленина, 38.
E-mail: atp@magtu.ru
Выходит в свет 06.2022.

СОДЕРЖАНИЕ

Системы автоматизации и управления

А.Ю. Корчагин, Е.Ю. Мухина

Система автоматической оптимизации управления расходом природного газа с целью минимизации удельного количества кокса

4

Д.Р. Ан, А.Р. Бондарева

Система автоматического регулирования расхода кислорода на продувку конвертера с целью предотвращения выбросов.....

9

Математическое моделирование технологических систем и объектов управления

В.Д. Павлов

Математическая модель высокоточного метода короткого замыкания для определения рассеяния обмоток трансформатора по отдельности.....

14

И.П. Попов

Механическая реактивная инерционная мощность для целей мониторинга энергосберегающих технологий.....

17

Технические средства автоматизации

В.Д. Павлов

Управляемая искусственная упругость в мехатронных системах

20

И.П. Попов

Инертно-индуктивные колебания в мехатронных системах

23

Краткие сообщения

Т.Г. Сухоносова

Итоги универсиады 2022 года «Путь к успеху» по метрологии и средствам измерения по направлению «Управление в технических системах»

26

CONTENTS

Control System

A. Yu. Korchagin, E. Yu. Mukhina

System for automatic optimization of natural gas flow control to minimize the specific amount of coke

4

D.R. An, A.R. Bondareva

System of automatic control of oxygen flow for converter blowing to prevent emissions.....

9

Mathematic and simulation of control systems and objects

V.D. Pavlov

Mathematical model of the high precision short circuit method for determining the scattering of transformer windings separately.....

14

I.P. Popov

Mechanical reactive inertia power for the purposes of monitoring energy saving technologies.....

17

Automation equipment

V.D. Pavlov

Controlled artificial elasticity in mechatronic systems

20

I.P. Popov

Inert-inductive oscillations in mechatronic systems

23

Summary statement

T.G. Sukhonosova

Results of the Universiade - 2022 «Way to success» in metrology and measuring means in the direction «Control in technical systems».....

26

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 странице 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; кратко 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

²tgobuhova@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 формировать такие планы 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

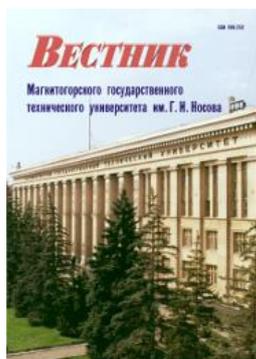
Например, кривые разгона по температуре поверхности нагреваемой заготовки в первой сварочной зоне методической печи №1 стана 2500 ОАО «ММК» (до реконструкции) при различных величинах расхода природного газа во второй сварочной зоне представлены на рис. 1 [2]. Динамические параметры, полученные при обработке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

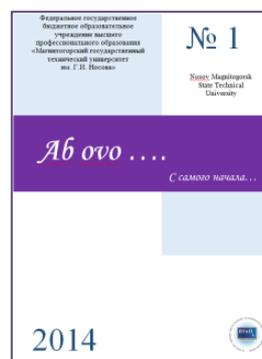
Другие рекомендуемые периодические издания



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 681.5.043/681.513.5

СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ РАСХОДОМ ПРИРОДНОГО ГАЗА С ЦЕЛЬЮ МИНИМИЗАЦИИ УДЕЛЬНОГО КОЛИЧЕСТВА КОКСА

А.Ю. Корчагин, Е.Ю. Мухина

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

korchagin_2000@mail.ru, mukhinaeu@mail.ru

Аннотация. В современных доменных печах принято компенсировать часть затрачиваемого дорогого и дефицитного кокса, путем подачи совместно горячим дутьем в фурмы доменной печи. Этот процесс имеет ряд специфических особенностей, описанных в работе. Применение специальной системы автоматической оптимизации управления позволяет снизить себестоимость выплавки чугуна в доменной печи без потери общей производительности. В работе представлена система автоматической оптимизации управления подачей природного газа с учетом специфических особенностей доменного производства, выполнен подбор технических средств для физической реализации рассмотренной системы управления.

Ключевые слова: доменная печь, кокс, автоматизация, оптимизация, регулирование, исполнительный механизм, природный газ

ВВЕДЕНИЕ

Основным источником необходимой тепловой энергии и одним из источников восстановительной способности доменного процесса является дефицитный дорогостоящий кокс, поэтому актуальной и приоритетной проблемой для повышения эффективности доменного процесса является снижение удельного количества кокса при сохранении или даже увеличении часовой производительности доменной печи. Самым эффективным, технически просто реализуемым способом замены кокса, как части альтернативного источника необходимой тепловой энергии, является подача природного газа через фурмы печи совместно с горячим дутьем [1]. Данный метод с экономической точки зрения не вызывает сомнений, так как кубометр природного газа стоит в 2-3 раза дешевле, чем тонна кокса. Управление данным параметром имеет специфические особенности, такие как экстремальная статическая характеристика и ее дрейф [2]. В работе предложен способ автоматической оптимизации управления с учетом дрейфа статической характеристики.

СИСТЕМА ЦИФРОВОЙ РЕАЛИЗАЦИИ ПОИСКОВО-ДИНАМИЧЕСКОГО МЕТОДА МИНИМИЗАЦИИ УДЕЛЬНОГО КОЛИЧЕСТВА КОКСА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПРИРОДНОГО ГАЗА

Экспериментально определено наличие экстремального вида зависимости удельного количества кокса от удельного количества природного газа. Вид статической характеристики объясняется тем, что при больших объемах подаваемого в печь природного газа, происходит конверсия (разложение) природного газа с поглощением теп-

ла, вследствие чего соответственно увеличиваются затраты подаваемого в печь кокса, что недопустимо, поэтому для достижения стабильного и оптимального состояния печи необходимо поддерживать значение подаваемого в печь природного газа на таком уровне, чтобы затраты кокса были минимальны и печь не охлаждалась [3]. Оптимальное количество подаваемого в печь природного газа соответствует точке экстремума по статической характеристике (рис. 1).

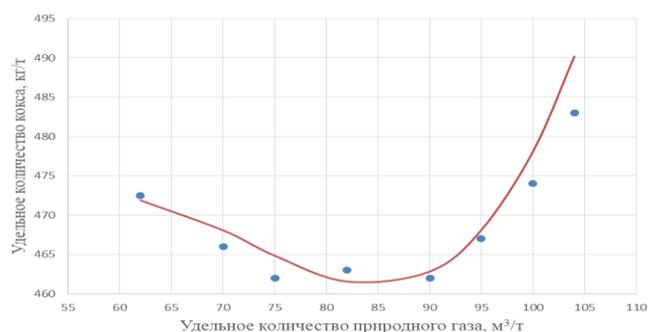


Рис. 1 - Статическая характеристика

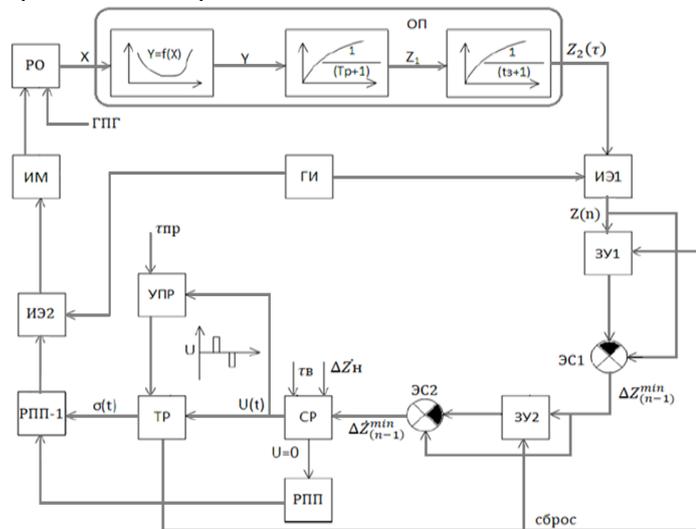
В работе предложена система автоматической оптимизации поискового типа, принцип работы которой основан на главном эвристическом правиле:

1) на вход оптимизируемого технологического процесса (объекта управления – ОУ) подается дискретное (ступенчатое) управляющее воздействие (расход природного газа, м³/ч);

2) затем через заданный интервал времени определяется реакция (отклик) оптимизируемого процесса на внешнее управляющее воздействие;

3) если изменение оптимизируемого параметра соответствует приближению к цели оптимизации управления (удельное количество кокса уменьшается), то принятое направление изменения расхода природного газа считается правильным и должно быть сохранено на последующем шаге управления, в противном случае на следующем шаге направление управляющего воздействия следует изменить на противоположное.

Структурная схема системы оптимизации управления представлена на рис. 2.



ОП – оптимизируемый процесс; ГИ – генератор импульсов; ЗУ – запоминающее устройство; СР – сигнал (логическое) реле; ЭС – элемент сравнения; РПП – реле прерывания поиска; РПП-1 – контакт реле; ТР – триггер реверс нормально разомкнутый; ИМ – исполнительный механизм расхода природного газа; ИЭ – импульсный элемент; РО – регулирующий орган (клапан); УПР – устройство остановки и принудительного реверса; ГПГ – газопровод природного газа

Рис. 2 - Структурная схема системы цифровой реализации поисково-динамического метода минимизации удельного количества кокса при использовании природного газа

Система работает в дискретном режиме, который обеспечивается наличием ГИ, воздействующим на ИЭ1, преобразующий аналоговый выходной сигнал объекта оптимизации в последовательность импульсов Z(n), которые поступают одновременно на входы ЗУ1 и ЭС1. Программно реализованное запоминающее устройство ЗУ1 запоминает только минимальное значение, достигнутое в прошедший n-1 момент времени.

Второй комплект ЗУ2 и ЭС2 использован для исключения срабатывания автоматической системы на неизбежные при поиске локальные экстремумы.

Логический элемент СР – сигнал реле формирует текущее значение знаковой управляющей функции в соответствии с заданной зоной нечувствительности ΔZn.

В системе предусмотрена возможность остановки поиска при достижении минимально возможного значения оптимизируемого параметра. Для этого в системе предусмотрено реле прерывания поиска, контакт которого включен в цепь ИМ, и устройство остановки и принудительного реверса УПР, которое совершает принудительный реверс по истечении таймера для учета возможности дрейфа статической характеристики.

Остановка поиска на заданное время происходит в том случае, когда положительное значение приращения будет

меньше принятой зоны нечувствительности, а реверс произойдет при условии, когда величина будет больше чем зона нечувствительности [4].

На выходе ТР формируется переключающая функция, увеличивающая или уменьшающая количество подаваемого природного газа ΔX.

ПЕРЕХОДНЫЙ ПРОЦЕСС ПРИ ДРЕЙФЕ СТАТИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ

В производственных условиях статическая характеристика подвержена дрейфу, это связано с наличием внешних возмущений, в частности с нестабильностью работы блока воздушонагревателей. Поисковый режим работы системы оптимизации, обеспечивает непрерывный поиск экстремума даже со сложным смещением характеристики по уравнению:

$$Y(x, \tau) = 0,001368 \cdot (x - \alpha\tau)^3 - 0,296 \cdot (x - \alpha\tau)^2 + 20,696 \cdot (x - \alpha\tau) + 0,527 - \beta\tau \quad (1)$$

Расчетные данные представлены в табл. 1, траектория переходного процесса представлена на рис. 3, динамика изменения параметров представлена на рис. 4.

Таблица 1

α	-1,5
β	-1,1
ΔZ_n , кг/т	6
ΔX , м ³ /т	7

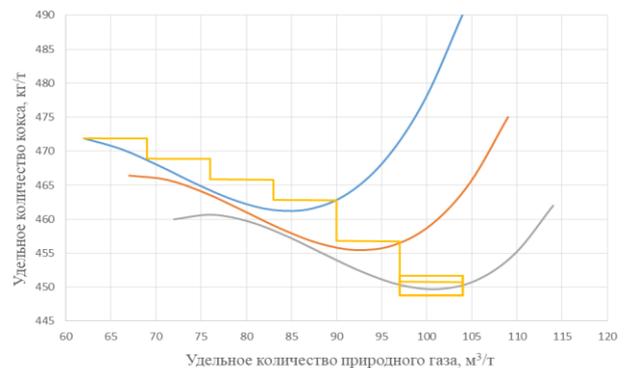


Рис. 3 - Поисковой процесс оптимального удельного количества природного газа при дрейфе статической характеристики

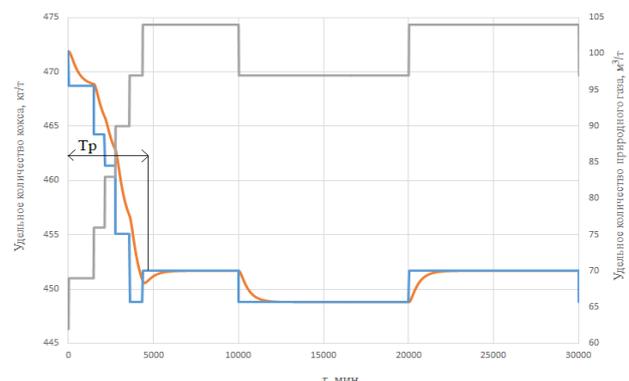


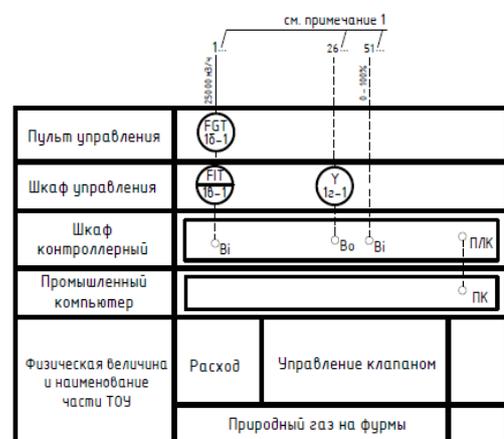
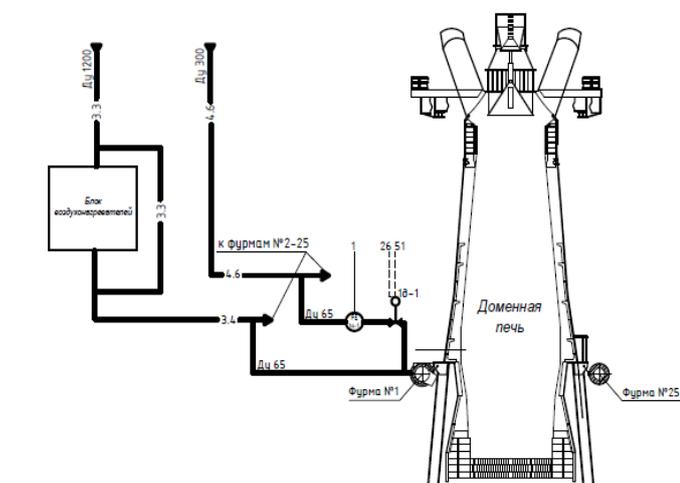
Рис. 4 – Динамика изменения параметров

Полученный переходный процесс характеризуется

приемлемым временем регулирования (4750 мин), так как имеет большой шаг исполнительного механизма, система успешно достигает глобального экстремума и через время $\tau_{пр}$ совершает принудительный реверс в поисках возможного смещения глобального экстремума. Данный переходный процесс является приемлемым.

ТЕХНИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ КОНТУРА УПРАВЛЕНИЯ

Функциональная схема автоматизации контура управления представлена на рис. 5.



Примечание 1 - схема выполнена для фурмы 1. Для фурм №2-25 схема аналогична. Оборудование заказано

Рис. 5 – Функциональная схема автоматизации

В предложенной схеме замер расхода природного газа осуществляется на измерительной диафрагме ДБС-08-70, поз. 1а-1, которая соединена с датчиком разности давлений Метран 100-ДД-70, поз. 1б-1. Далее с датчика разности давлений сигнал 0-5 мА поступает на блок разветвления и преобразования сигналов БРИС-М, поз. 1в-1. Данный прибор преобразует входной сигнал в 4-20 мА. Также данный прибор имеет встроенный сигнализирующий элемент и может комплектоваться цифровыми индикатором входного сигнала, имеющим возможность установки двух уровней срабатывания порогового устройства с помощью кнопочной панели управления. Управляющим контроллером выступает SIMATIC S7-400, поз. ПЛК, предназначенный для построения систем автоматизации средней и высокой степени сложности, обеспечивающий высокий уровень надежности, обусловленный модульной

конструкцией, работой с естественным охлаждением, возможностью применения структур локального и распределенного ввода-вывода, широкие коммуникационные возможности, множество функций, поддерживаемых на уровне операционной системы [5]. Контроллер через шину соединен с промышленным компьютером SIMATIC RACK PC T7400, поз. ПК.

Спецификация оборудования, заявленного в схеме автоматизации, представлена в табл. 2.

Таблица 2

Поз.	Наименование	Кол.	Примечание
1а-1..1а-25	Диафрагма, ДБС-06-70	25	
1б-1..1б-25	Датчик разности давлений, Метран-100-ДД-70	25	
1в-1..1в-25	Блок питания и преобразования сигналов, БРИС-М	25	
1г-1..1г-25	Электронный реверсивный пускатель, ELR W3-24DC	25	
1д-1..1д-25	Механизм исполнительный, МЭО-40/63-0,63У-99К-ЦА2	25	
ПЛК	Микропроцессорный контроллер, Simatic S7-400	1	
ПК	Промышленный компьютер, Simatic RACK E3-1275	1	

В контроллере аналоговые показания проходят RC-фильтр и далее через мультиплексор попадают на АЦП частотой 1600 Гц. Далее вновь пропускаются через цифровой фильтр и приходят на блок приведения к физической величине. После взаимодействия сигнала задания и текущего сигнала с датчика и выработки контроллером управляющего воздействия сигнал поступает на электронный реверсивный пускатель ELR W3-24DC, поз. 1г-1. Пускатель усиливает поступающий на исполнительный механизм сигнал, изменяя фазировку трехфазного питания величиной 380 В и питается из сети 220 В. Усиленный сигнал поступает на исполнительный механизм МЭО-40/63-0,63У-99К-ЦА2, поз. 1д-1. Механизм исполнительный электрический однооборотный постоянной скорости предназначен в схеме для перемещения регулирующего органа в соответствии с командными сигналами, поступающими от регулирующих и управляющих устройств, т.е. обеспечивает регулирование расхода природного газа в соответствии с принятым законом управления [6].

Использование природного газа в доменной плавке позволило значительно сократить удельный расход кокса и несколько повысить производительность печей, но в ходе работ было установлено ухудшение технико-экономических показателей плавки при чрезмерном повышении расхода природного газа, причем возможная оптимальная величина была неодинакова для различных условий плавки.

Лучшее, с энергетической точки зрения, использование природного газа в доменной печи может быть получено при неполном его сжигании в условиях предварительного перемешивания с кислородом до монооксида углерода и водорода, т.е. при организации диффузионно-кинетического принципа сжигания газа. При этом количество восстановительных компонентов в печи возрастает, а эффект охлаждения горна уменьшается до минимума.

Предложенная схема управления и выбранный комплекс технических средств позволяет реализовать рассмотренную выше систему оптимизации и может применяться в современных доменных печах для увеличения показателя производительности печи и экономии денежных средств.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Справедливо следует отметить, по рассмотренному методу возможна и целесообразна реализация адаптивного управления подачей природного газа с целью достижения максимально возможной текущей часовой производительности доменной печи, поскольку необходимые и достаточные условия для эффективного использования рассмотренного метода очевидны и имеют экспериментальное подтверждение.

Применительно для параметров доменной печи, рассмотренной в работе с учетом дрейфа статической характеристики удельного количества кокса в результате оптимизации, было снижено на более чем 15 кг/т. Для рассматриваемого случая этот факт является дополнительным источником влияния технологических возмущений на определяемую величину минимального удельного количества кокса.

Математическое моделирование поискового режима представленной системы цифровой реализации адаптивно поисково-динамического метода минимизации удельного количества кокса при использовании природного газа позволило установить следующие закономерности:

- при более высоких порядках шага исполнительного механизма и зоны нечувствительности увеличивается точность, но и увеличивается время регулирования (высокая нагрузка на исполнительный механизм, но высокая точность);
- при более низких порядках шага исполнительного механизма и зоны нечувствительности уменьшается точность, и также уменьшается время регулирования (более низкая нагрузка на исполнительный механизм, но снижается точность).
- при постоянном шаге управляющего воздействия увеличение значения паузы пропорционально увеличивает время выхода на режим минимального количества потребляемого кокса;
- при постоянном значении паузы увеличение величины управляющего воздействия приводит к уменьшению времени выхода на минимум удельного количества кокса;
- при значительном увеличении шага управляющего воздействия Δx возникает опасность перехода поискового процесса в нежелательный автоколебательный режим.

Это безусловно и безоговорочно обеспечит реальное повышение эффективности управления доменным процессом за счет улучшения интеллектуальности и целесообразности принятия и реализации управляющих решений в реальных производственных условиях.

Применение рассмотренного метода цифрового адаптивного поисково-динамического управления подачей природного газа в доменную печь обеспечивает реальную возможность оптимизации автоматического управления этим важным технологическим параметром.

Использование предлагаемого метода автоматической оптимизации позволяет свести к минимуму вмешатель-

ство технологического персонала в режим управления процессом и ориентирован на программную реализацию в современных микропроцессорных контроллерах [7].

ЛИТЕРАТУРА

1. Парсункин, Б.Н. Автоматизация и оптимизация управления процессом выплавки чугуна в доменных печах: учеб. пособие / Б.Н. Парсункин, С.М. Андреев, Т.Г. Сухоносова. — Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2018. — 215 с. — ISBN 978-5-9967-1208-3. — Текст: непосредственный.
2. Парсункин, Б. Н. Снижение удельного количества кокса при оптимизации управления подачей природного газа в доменную печь: статья / Б. Н. Парсункин, С. М. Андреев, Б. К. Сеничкин, О. С. Логунова. ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет имени Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия, 2014. — 354 - 363 с. УДК 669.042. — Текст: электронный.
3. Смирнов, Ю. А. Технические средства автоматизации и управления: учебное пособие для вузов / Ю. А. Смирнов. — 4-е изд. стер. — Санкт-Петербург: Лань, 2021. — 456 с. — ISBN 978-5-8114-8290-0. — Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/174286> (дата обращения: 01.06.2022). — Режим доступа: для авториз. пользователей.
4. Салихов, З. Г. АСУ технологическими процессами металлургии: интеллектуальные системы управления горно-металлургическими процессами: учебно-методическое пособие / З. Г. Салихов, И. Т. Кимяев, К. З. Салихов. — Москва: МИСИС, 2019. — 165 с. — Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/116690> (дата обращения: 01.06.2022). — Режим доступа: для авториз. пользователей.
5. Хиврин, М. В. Аппаратное и программное обеспечение управления технологическими процессами. Разделы: Автоматизированные системы управления предприятием. Применение сетей во взрывоопасных зонах. Аппаратные и программные средства программируемых контроллеров: учебно-методическое пособие / М. В. Хиврин. — Москва: МИСИС, 2018. — 95 с. — Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/116790> (дата обращения: 01.06.2022). — Режим доступа: для авториз. пользователей.
6. Ленский, М. С. Автоматические регуляторы и системы управления: учебное пособие / М. С. Ленский. — Москва: РТУ МИРЭА, 2020. — 44 с. — Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/163894> (дата обращения: 01.06.2022). — Режим доступа: для авториз. пользователей.
7. Дадаян, Л. Г. Автоматизированные системы управления технологическими процессами: учебное пособие / Л. Г. Дадаян. — Уфа: УГНТУ, 2018. — 241 с. — ISBN 978-5-7831-1676-6. — Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/166886> (дата обращения: 01.06.2022). — Режим доступа: для авториз. пользователей.

8. Парсункин, Б.Н. Автоматизация технологических процессов производств в металлургии. Курс лекций: учебное пособие / Б.Н. Парсункин, С.М. Андреев, Е.С. Рябчикова. –Магнитогорск: МГТУ, 2011. – 151 с.

SYSTEM FOR AUTOMATIC OPTIMIZATION OF NATURAL GAS FLOW CONTROL TO MINIMIZE THE SPECIFIC AMOUNT OF COKE

A.Yu. Korchagin, E.Yu. Mukhina

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation

Korchagin_2000@mail.ru, mukhinaeu@mail.ru

Abstract. In modern blast furnaces, it is customary to compensate for part of the costly and scarce coke consumed by jointly supplying hot blast to the tuyeres of the blast furnace. This process has a number of specific features described in the work. The use of a special automatic control optimization system makes it possible to reduce the cost of iron smelting in a blast furnace without losing overall productivity. The paper presents a system for automatic optimization of natural gas supply control, taking into account the specific features of blast-furnace production, the selection of technical means for the physical implementation of the considered control system.

Keywords: blust furnace, coke, automation, optimization, regulation, actuator, natural gas

REFERENCES

1. Parsunkin, B.N. Automation and optimization of process control of iron smelting in blast furnaces [*Avtomatizatsiya i optimizatsiya protsessov vyplavki chuguna v domennykh pechakh*]: textbook. allowance / B.N. Parsunkin, S.M. Andreev, T.G. Sukhonosov. - Magnitogorsk: Magnitogorsk Publishing House. state tech. un-ta im. G.I. Nosova, 2014. - 215 p. - ISBN 978-5-9967-1208-3. – Text: direct.

2. Parsunkin, B. N. Reducing the specific amount of coke when optimizing the control of natural gas supply to the blast furnace [*Snizhenie udel'nogo kolichestva koksa pri optimizatsii upravleniya podachey prirodnogo gaza v domennuyu pech'*]: article / B. N. Parsunkin, S. M. Andreev, B. K. Senichkin, O. S. Logunova. FSBEI HPE “Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov”, Magnitogorsk, Russia, 2017. - 354 - 363 p. UDC 669.042. – Text: electronic.

3. Smirnov, Yu. A. Technical means of automation and contro [*Tekhnicheskie sredstva avtomatizatsii i upravleniya*]: a textbook for universities / Yu. A. Smirnov. - 4th ed. erased - St. Petersburg: Lan, 2021. - 456 p. - ISBN 978-5-8114-8290-0. — Text: electronic // Doe: electronic library system. — URL: <https://e.lanbook.com/book/174286> (date of access: 06/01/2022). — Access mode: for authorization. users.

4. Salikhov, Z. G. Salikhov, I. T. Kimyaev, K. Z. Salikhov, ACS for technological processes in metallurgy [*ASU tekhnologicheskimi protsessami metallurgii: intellektual'nye sistemy upravleniya gorno-metallurgicheskimi protsessami*]: intelligent control systems for mining and metallurgical processes: a teaching aid. - Moscow: MISIS, 2019. - 165 p. — Text: electronic // Doe: electronic library system. — URL:

<https://e.lanbook.com/book/116690> (date of access: 06/01/2022). — Access mode: for authorization users.

5. Khivrin, M. V. Hardware and software for managing technological processes. Sections: Automated enterprise management systems. The use of networks in explosive areas. Hardware and software of programmable controllers [*Apparatnoe i programnoe obespechenie upravleniya tekhnologicheskimi protsessami*.]: teaching aid / M. V. Khivrin. - Moscow: MISIS, 2018. - 95 p. — Text: electronic // Doe: electronic library system. — URL: <https://e.lanbook.com/book/116790> (date of access: 06/01/2022). — Access mode: for authorization users.

6. Lensky, M. S. Automatic regulators and control systems [*Avtomaticheskie regulatory i sistemy upravleniya*]: textbook / M. S. Lensky. - Moscow: RTU MIREA, 2020. - 44 p. — Text: electronic // Doe: electronic library system. — URL: <https://e.lanbook.com/book/163894> (date of access: 06/01/2022). — Access mode: for authorization users.

7. Dadayan, L. G. Automated control systems for technological processes [*Avtomatizirovannye sistemy upravleniya tekhnologicheskimi protsessami*]: study guide / L. G. Dadayan. - Ufa: UGNTU, 2018. - 241 p. - ISBN 978-5-7831-1676-6. — Text: electronic // Doe: electronic library system. — URL: <https://e.lanbook.com/book/166886> (date of access: 06/01/2022). — Access mode: for authorization users.

8. Parsunkin, B.N. Automation of technological processes of production in metallurgy: study guide / B.N. Parsunkin, S.M. Andreev, E.S. Ryabchikova. -Magnitogorsk: NMSTU, 2011. - 151 p.

Корчагин, А.Ю. Система автоматической оптимизации управления расходом природного газа с целью минимизации удельного количества кокса / А.Ю. Корчагин, Е.Ю. Мухина // Автоматизированные технологии и производства. 2022. №1(25). С.4-8.

A. Yu. Korchagin, E.Yu.Mukhina System for automatic optimization of natural gas flow control to minimize the specific amount of coke. *Avtomatizirovannye tehnologii i proizvodstva* [Automation of technologies and production], 2022, no.1(25), pp.4-8. (In Russian).

СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ РАСХОДА КИСЛОРОДА НА ПРОДУВКУ КОНВЕРТЕРА С ЦЕЛЬЮ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ВЫБРОСОВ

Д.Р. Ан, А.Р. Бондарева

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

kzvdv22052000@gmail.com, a.bondareva@magtu.ru

Аннотация. Одной из актуальных проблем автоматизации кислородно-конвертерного способа выплавки стали остается отсутствие надежных и оперативных способов прямого измерения параметров продуваемого металла. Поэтому целесообразным является применение косвенных методов измерения параметров, характеризующих процессы, протекающие в ванне конвертера. Перспективным направлением развития технологии конвертерной плавки является оптимизация процессов, направленная на снижение времени продувки, а также снижение интенсивного испарения железа и исключение выбросов через горловину шлака и металла во время продувки конвертера.

Ключевые слова: конвертер, выплавка стали, кислород, автоматизация, отходящие газы, выбросы

ВВЕДЕНИЕ

Выплавка стали в кислородном конвертере является наиболее быстрым и высокопроизводительным способом переплавки чугуна. При этом необходимо обеспечивать требуемую интенсивность продувки и, что немаловажно, эффективное усвоение кислорода ванной расплава [1]. Продувка является основной технологической операцией конвертерного процесса, призванной обеспечить окислительное рафинирование и нагрев металла. Из-за высокой скорости протекания процессов и большого объема текущей информации, поступающей с датчиков, которые имеют запаздывание сигнала (расход, давление и состав отходящих газов), задача определения момента зарождения выброса весьма трудоемка [2]. В работе предложен способ автоматической коррекции расхода кислорода на продувку по информации о текущем составе отходящих конвертерных газов.

СИСТЕМА РЕГУЛИРОВАНИЯ РАСХОДА КИСЛОРОДА С ЦЕЛЬЮ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ВЫБРОСОВ

Рассмотрим условия возникновения критической ситуации. В рассмотренном ниже примере плавка «зажглась» на четвертой минуте и проходила спокойно без выбросов. Изменение величин скорости изменения отношения $CO/(CO+CO_2)$ представлено на рис. 1.

В этом случае не происходит сильного охлаждения ванны при подаче сыпучих, и кислород успевает усваиваться ванной, окисляя углерод металла, и не накапливается в шлаке [3]. Колебание скорости изменения отношения $CO/(CO+CO_2)$ не превышают $15c^{-1}$ по ходу всей плавки.

Изменение величины скорости отношения $CO/(CO+CO_2)$ в процессе плавки, в которой после присадки охладителей по ходу плавки произошло резкое охла-

ждение ванны, приведшей к выбросу из конвертера, представлено на рис. 2.

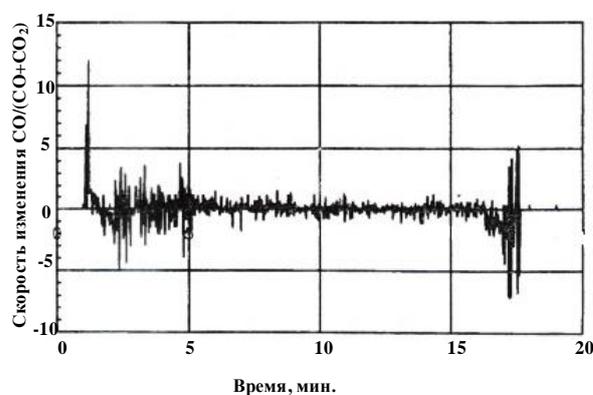


Рис. 1. Скорость изменения соотношения $CO/(CO+CO_2)$ при нормальном протекании плавки

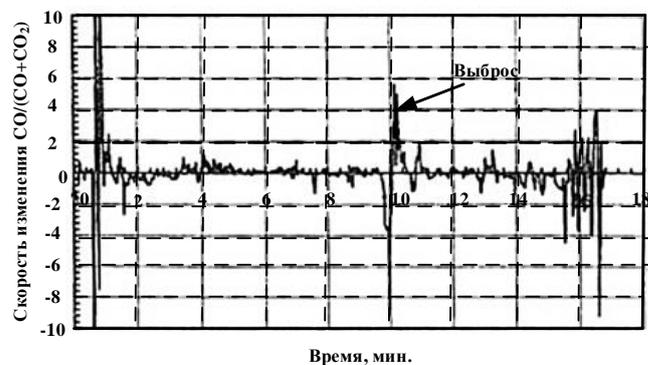


Рис.2. Скорость изменения соотношения $CO/(CO+CO_2)$ при выбросе шлакометаллической эмульсии из конвертера.

На этом примере видно, что перед вспениванием ванны в начале 10-й минуты продувки скорость изменения отношения $CO/(CO+CO_2)$ сначала уменьшается до $9,1 \text{ c}^{-1}$, а в момент выброса она резко увеличивается. При этом отрицательный пик опережает развитие процесса на 6-7 с, что дает возможность принять меры для уменьшения расхода [4].

В работе предложена система автоматической коррекции расхода, принцип работы которой основан на главном эвристическом правиле:

1) если на вход системы подается значение скорости изменения соотношения выше определённого порога, то система начинает корректировать расход

2) затем система анализирует поступающие сигналы от дифференцирующего устройства и если сигнал становится оптимальным, то система перестает вносить коррекцию;

Структурная схема системы регулирования расхода представлена на рис. 3.

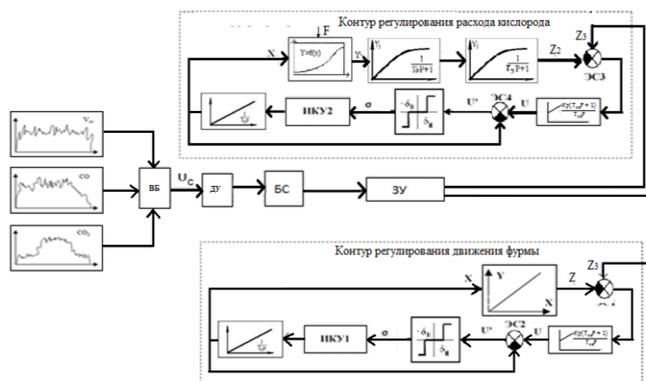


Рис. 3. Структурная схема управления объектом с использованием ПИ – регулятора

Значения концентраций CO и CO_2 , а также объема отходящих газов поступают в вычислительный блок ВБ, где по введенной формуле рассчитывается скорость окисления углерода. Затем значение поступает на дифференцирующее устройство ДУ, и полученное значение скорости поступает в блок сравнения БС, который сравнивает текущее значение с величиной скорости, при которой выброс наиболее вероятен.

В зависимости от того, насколько велика вероятность выброса, задающее устройство изменяет расхода кислорода и выдает управляющее воздействие в виде корректировки задания в стандартный контур регулирования расхода кислорода. Таким образом, по заранее заложенной программе меняется значение ΔJ – изменение расхода кислорода на продувку конвертера.

Установлено, что в качестве управляющих воздействий по ходу плавки используются изменение как положения фурмы, так и расхода кислорода на продувку [2]. Предлагаемая система управления позволяет контролировать ход плавки и исключить появление выбросов, что увеличивает выход годного металла, за счет снижения риска выхода из строя дорогостоящего оборудования и сокращения продолжительности плавки.

ПЕРЕХОДНЫЙ ПРОЦЕСС ПРИ ПОЯВЛЕНИИ ВЕРОЯТНОСТИ ВЫБРОСА

Переходный процесс, в котором возникает угроза выброса и реакция системы на эту ситуацию, представлен на рис. 5, а скорости изменения соотношения $CO/(CO+CO_2)$ на рис. 4.

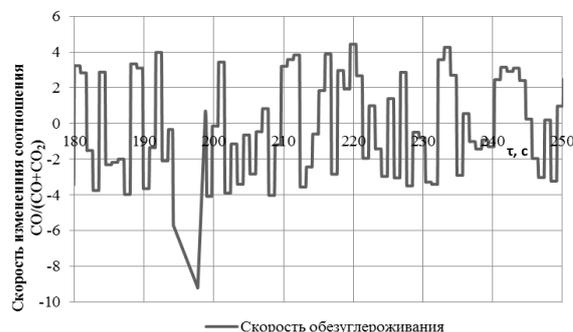


Рис. 4. Изменение скорости соотношения $CO/(CO+CO_2)$

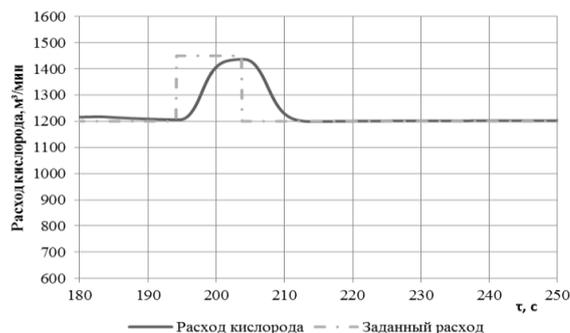


Рис. 5. Работа системы при обнаружении критической ситуации перед выбросом

На графиках видно, что система обнаружила (в момент времени $\approx 194 \text{ с}$) резкое снижение скорости изменения соотношения $CO/(CO+CO_2)$. Так как скорость продолжает убывать, система принимает решение о кратковременном увеличении интенсивности продувки, увеличивая задание расхода на продувку для системы регулирования.

Согласно теоретическим данным данные действия помогут избежать выброса из конвертера [5], а благодаря тому, что информация об изменении скорости обезуглероживания предвещает начало взрывной реакции на 6-7 секунд – система успевает внести корректировки в текущее значение расхода и воздействовать на ванну, предотвращая либо сводя к минимуму выброс шлакометаллической эмульсии из конвертера.

ТЕХНИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ КОНТУРА УПРАВЛЕНИЯ РАСХОДОМ КИСЛОРОДА

Функциональная схема автоматизации контура управления представлена на рис. 6.

Заданием является оптимальный расход кислорода, поступающий с промышленного компьютера Simatic Rack

РС, поз. ЭВМ. С его помощью производится визуализация текущих параметров, выбор режима (автоматический или дистанционный), а также осуществляется управление в дистанционном режиме.

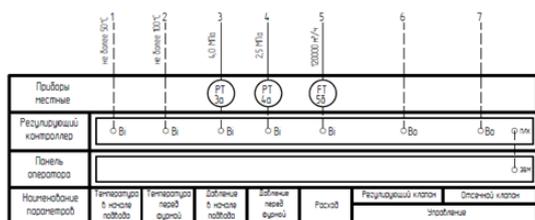
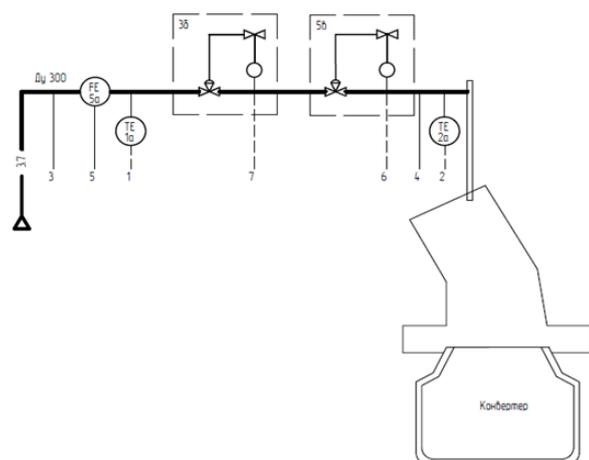


Рис. 6. Функциональная схема автоматизации контура управления

В схеме осуществляется измерение расхода кислорода на каждую фурму (всего их две – левая и правая, схемы для которых аналогичны) с помощью чувствительного элемента – камерной диафрагмы ДКС-10-300-А/Б-1, поз. 5а. Информация с диафрагмы поступает в нормирующий преобразователь Метран-100-ДД-1430, поз. 5б. Далее уже электрический сигнал поступает на регулирующий контроллер SimaticS7-400, поз. ПЛК. Регулирующий контроллер формирует сигнал рассогласования, представляющий собой величину отклонения текущего расхода от заданного, и выдает, в соответствии с принятым законом регулирования, управляющее воздействие [6].

Ведется контроль параметров кислорода на продувку на подводе и перед фурмой, в частности: температура контролируется по показаниям термопреобразователей ТСП-0193-02, поз. 1а и поз. 2а; давление контролируется по показаниям преобразователя давления (на подводе) – Метран-100-ДИ-1160, поз. 3а, а также преобразователя давления (перед фурмой) – Метран-100-ДИ-1150, поз. 4а.

Непосредственное регулирование производится с помощью регулирующего клапана Т556, поз. 5в. Отсечка кислорода при этом осуществляется клапаном с пневматическим электромагнитным распределителем 23кч802р, поз. 3б.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование метода прогнозирования выбросов по анализу отходящих газов (в особенности СО и СО₂) не требует большого количества вычислений и позволяет

спрогнозировать выброс за 6-7 с до его появления. Внедрение системы прогнозирования выбросов позволит увеличить выход годного и уменьшить опасность выбросов. Одним из ключевых преимуществ данного метода является его избыточность, то есть отсутствие необходимости в установке дополнительных датчиков, которые будут использоваться только для работы конкретной системы [7,8,9].

Применение системы газового анализа для прогнозирования, контроля и управления процесса плавки приведет к увеличению эффективности работы агрегата за счет:

- увеличения количества продувок из-за отсутствия простоев на очистку конвертера;
- уменьшения количества промежуточных скачиваний шлака;
- снижения наносимого выбросами ущерба промышленному оборудованию;
- снижения времени работы конвертера в аварийных режимах;
- снижение нагрузки на обслуживающий персонал и рисков получения травм;
- сведение к минимуму участие обслуживающего персонала при проведении продувки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Основы металлургического производства: учебник для вузов / В. А. Бигеев, В. М. Колокольцев, В. М. Салганик [и др.]. — 3-е изд., стер. — Санкт-Петербург: Лань, 2021. — 616 с. — ISBN 978-5-8114-8178-1. — Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/173100> (дата обращения: 12.05.2022). — Режим доступа: для авториз. пользователей.
2. Парсункин, Б.Н. Автоматизация технологических процессов и производств. Производство стали в мартеновских и двухванных агрегатах и кислородных конвертерах: учебное пособие / Б.Н. Парсункин, Т.Г. Сухоносова, А.Р. Бондарева; Магнитогорский гос. технический ун-т им. Г.И. Носова. — Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та, 2012. — 264 с. — ISBN 978-5-9967-0790-4. — Текст: непосредственный.
3. Смирнов, Ю. А. Технические средства автоматизации и управления: учебное пособие для вузов / Ю. А. Смирнов. — 4-е изд. стер. — Санкт-Петербург: Лань, 2021. — 456 с. — ISBN 978-5-8114-8290-0. — Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/174286> (дата обращения: 01.06.2022). — Режим доступа: для авториз. пользователей.
4. Салихов, З.Г. АСУ технологическими процессами металлургии: интеллектуальные системы управления горно-металлургическими процессами: учебно-методическое пособие / З. Г. Салихов, И. Т. Кимяев, К. З. Салихов. — Москва: МИСИС, 2019. — 165 с. — Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/116690> (дата обращения: 01.06.2022). — Режим доступа: для авториз. пользователей.
5. Сухих, А.А. Прогнозирование выброса шлаков из конвертера по анализу отходящих газов. Автоматизация

технологических процессов и производственных процессов в металлургии: учебное пособие / А.А. Сухих, А.И. Блохин, А.А. Заровнятных. –Магнитогорск: МГТУ, 2004. – 230с. – Текст: непосредственный.

6. Парсункин, Б.Н. Автоматизация технологических процессов производств в металлургии. Курс лекций: учебное пособие / Б.Н. Парсункин, С.М. Андреев, Е.С. Рябчикова. –Магнитогорск: МГТУ, 2011. – 151 с.

7. Дадаян, Л. Г. Автоматизированные системы управления технологическими процессами: учебное пособие / Л. Г. Дадаян. — Уфа: УГНТУ, 2018. — 241 с. — ISBN 978-5-7831-1676-6. — Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/166886> (дата обращения: 01.06.2022). — Режим доступа: для авториз. пользователей.

8. Самарина, И. Г. Программирование и основы алгоритмизации : практикум / И. Г. Самарина, Е. Ю. Мухина, А. Р. Бондарева. – Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2021. – 47 с. – EDN ITAXMN.

9. Парсункин, Б. Н. Автоматизированное энергосберегающее управление сжиганием смешанного газа в проходных печах листопрокатных станов / 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 HOTPGO.

SYSTEM OF AUTOMATIC CONTROL OF OXYGEN FLOW FOR CONVERTER BLOWING TO PREVENT EMISSIONS

D.R. An, A.R. Bondareva

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation

kzvdv22052000@gmail.com, a.bondareva@magtu.ru

Abstract. One of the urgent problems of automating the oxygen-converter method of steelmaking is the lack of reliable and efficient methods for direct measurement of the parameters of the blown metal. Therefore, it is advisable to use indirect methods for measuring parameters that characterize the processes occurring in the converter bath. A promising direction in the development of converter melting technology is the optimization of processes aimed at reducing the blowdown time, as well as reducing the intense evaporation of iron and eliminating emissions through the neck of slag and metal during the blowdown of the converter.

Keywords: converter, steelmaking, oxygen, automation, waste gases, emissions

REFERENCES

1. Basics of metallurgical production: a textbook for universities / V. A. Bigeev, V. M. Kolokoltsev, V. M. Salganik [and others]. - 3rd ed., revised. - St. Petersburg: Lan, 2021. - 616 p. - ISBN 978-5-8114-8178-1. — Text: electronic // Doe: electronic library system. — URL: [HTTPS://E.LANBOOK.COM/BOOK/173100](https://e.lanbook.com/book/173100) (date of access: 05/12/2022). — Access mode: for authorization. users.

2. Parsunkin, B.N. Automation of technological processes and productions. Steel production in open-hearth and two-bath units and oxygen converters: textbook / B.N. Parsunkin, T.G. Sukhonosov, A.R. Bondareva; Magnitogorsk state. technical un-t im. G.I. Nosov. - Magnitogorsk: Publishing House of Magnitogorsk State. tech. un-ta, 2012. - 264 p. – ISBN 978-5-9967-0790-4. – Text: direct.

3. Smirnov, Yu. A. Technical means of automation and control: a textbook for universities / Yu. A. Smirnov. - 4th ed. revised - St. Petersburg: Lan, 2021. - 456 p. - ISBN 978-5-8114-8290-0. — Text: electronic // Doe: electronic library system. — URL: [HTTPS://E.LANBOOK.COM/BOOK/174286](https://e.lanbook.com/book/174286) (date of access: 06/01/2022). — Access mode: for authorization. users.

4. Salikhov, Z. G. Salikhov, I. T. Kimyaev, K. Z. Salikhov, ACS for technological processes in metallurgy: intelligent control systems for mining and metallurgical processes: a

teaching aid. - Moscow: MISIS, 2019. - 165 p. — Text: electronic // Doe: electronic library system. — URL: [HTTPS://E.LANBOOK.COM/BOOK/116690](https://e.lanbook.com/book/116690) (date of access: 06/01/2022). — Access mode: for authorization. users.

5. Sukhikh, A.A. Forecasting the release of slag from the converter for the analysis of off-gases. Automation of technological processes and production processes in metallurgy: study guide / A.A. Sukhikh, A.I. Blokhin, A.A. Zarovnyatnykh. -Magnitogorsk: MSTU, 2004. - 230p. – Text: direct.

6. Parsunkin, B.N. Automation of technological processes of production in metallurgy: study guide / B.N. Parsunkin, S.M. Andreev, E.S. Ryabchikova. -Magnitogorsk: NMSTU, 2011. - 151 p.

7. Dadayan, L. G. Automated control systems for technological processes: study guide / L. G. Dadayan. - Ufa: UGNTU, 2018. - 241 p. - ISBN 978-5-7831-1676-6. — Text: electronic // Doe: electronic library system. — URL: [HTTPS://E.LANBOOK.COM/BOOK/166886](https://e.lanbook.com/book/166886) (date of access: 06/01/2022). — Access mode: for authorization. Users.

8. Samarina I.G., Mukhina E.YU., Bondareva A.R. Programirovanie i osnovy algoritimizatsii : praktikum [Programming and the basics of algorithms], Magnitogorsk, NMSTU, 2012. - 264 p. – ISBN 978-5-9967-0790-4.

9. Parsunkin, B.N., Andreev S.M., Samarina I.G Energy-saving automated control of mixed gas combustion in heating through-type furnaces of sheet rolling mills [Avtomatizirovannoe energosberegayushchee upravlenie szhiganiem sme-

shannogo gaza v prokhodnykh pechakh listoprokatnykh stanov], *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы*, [Electrotechnical Systems and Complexes], Vol. 54, no. 1, p. 68-74.

Ан, Д.Р. Система автоматического регулирования расхода кислорода на продувку конвертера с целью предотвращения выбросов / Д.Р. Ан, А.Р. Бондарева // Автоматизированные технологии и производства. 2022. №1(25). С.9-13.

D.R. An, A.R. Bondareva System of automatic control of oxygen flow for converter blowing to prevent emissions. *Avtomatizirovannye tehnologii i proizvodstva* [Automation of technologies and production], 2022, no.1(25), pp.9-13. (In Russian).

УДК 621.314.21.042.52

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЫСОКОТОЧНОГО МЕТОДА КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАССЕЯНИЯ ОБМОТОК ТРАНСФОРМАТОРА ПО ОТДЕЛЬНОСТИ

В.Д. Павлов

Владимирский электромеханический завод, Владимир, Россия

e-mail: pavlov.val.75@mail.ru

Аннотация. Цель исследования состоит в обосновании возможности экспериментального определения реактивных сопротивлений рассеяния для каждой обмотки трансформатора в отдельности, которые могут быть установлены высокоточным методом короткого замыкания.

Ключевые слова: трансформатор, обмотка, рассеяние, индуктивный, емкостной, потокосцепление, магнитный поток.

В работе [1] представлен способ экспериментального определения реактивных сопротивлений рассеяния трансформатора для каждой обмотки по отдельности.

До этого считалось, что такая операция невозможна, и поэтому измерялось суммарное сопротивление обеих обмоток, а результат делился пополам и приписывался каждой обмотке [2–4]. Это приводило к существенным ошибкам, поскольку почти в любом случае эти сопротивления различаются. При этом цилиндрические концентрические обмотки даже имеют противоположный характер реактивности [5].

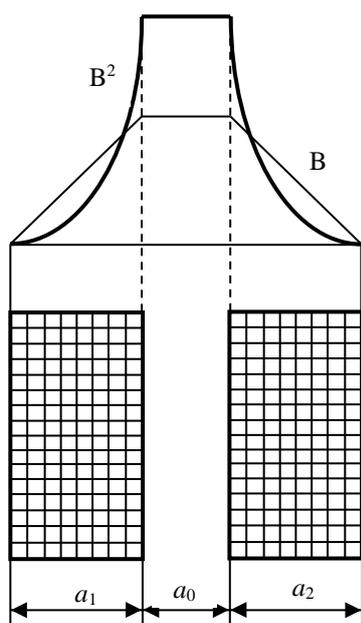


Рис. 1. Распределение поля рассеяния

На рис. 1 представлено распределение поля рассеяния в радиальном направлении (магнитной индукции B (B^2)) для этого случая.

Отрицательное (емкостное) сопротивление характерно для внутренней цилиндрической обмотки. Оно обусловлено тем, что для нее собственный поток рассеяния меньше потока поглощения от внешней обмотки (разница отрицательная). Отрицательным (емкостным) сопротивлением могут обладать не только конденсаторы.

Для других видов обмоток, например, отдельных (расположенных на разных стержнях), сопротивление рассеяния носит индуктивный характер для обеих обмоток. Исследование имеет своей целью обоснование определения реактивных сопротивлений рассеяния трансформатора для каждой обмотки в отдельности экспериментальным высокоточным методом короткого замыкания. Из Т-образной схемы замещения трансформатора (рис. 2) следует, что

$$\dot{U}_0 = \dot{I}_0 Z_0 = \dot{I}'_2 z'_2,$$

$$Z_0 = \frac{\dot{I}'_2}{\dot{I}_0} z'_2.$$

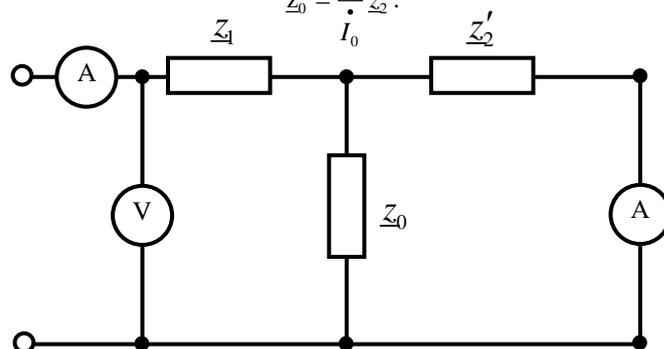


Рис. 2. Схема замещения трансформатора

Полное сопротивление при коротком замыкании равно

$$\begin{aligned} \underline{z} &= z_1 + \frac{\underline{z}_0 \underline{z}'_2}{\underline{z}_0 + \underline{z}'_2} = \underline{z}_1 + \frac{\dot{I}'_2 / \dot{I}_0 \underline{z}_2'^2}{\dot{I}'_2 / \dot{I}_0 \underline{z}'_2 + \underline{z}'_2} = \\ &= \underline{z}_1 + \frac{\dot{I}'_2}{\dot{I}'_2 + \dot{I}_0} \underline{z}'_2 = \underline{z}_1 + \frac{\dot{I}'_2}{\dot{I}'_2 + \dot{I}_1 - \dot{I}'_2} \underline{z}'_2 = \underline{z}_1 + \frac{\dot{I}'_2}{\dot{I}_1} \underline{z}'_2, \\ \underline{z} &= \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1} = \underline{z}_1 + \frac{\dot{I}'_2}{\dot{I}_1} \underline{z}'_2. \end{aligned}$$

Отсюда следует, что

$$\underline{z}_1 = \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1} - \frac{\dot{I}'_2}{\dot{I}_1} \underline{z}'_2.$$

Из обратимости трансформатора следует

$$\begin{aligned} \underline{z}'_2 &= \frac{{}^2\dot{U}'_2}{\dot{I}'_2} - \frac{{}^2\dot{I}_1}{\dot{I}'_2} \underline{z}_1, \\ \underline{z}_1 &= \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1} - \frac{\dot{I}'_2}{\dot{I}_1} \left(\frac{{}^2\dot{U}'_2}{\dot{I}'_2} - \frac{{}^2\dot{I}_1}{\dot{I}'_2} \underline{z}_1 \right) = \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1} - \frac{\dot{I}'_2}{\dot{I}_1} \frac{{}^2\dot{U}'_2}{\dot{I}'_2} + \frac{\dot{I}'_2}{\dot{I}_1} \frac{{}^2\dot{I}_1}{\dot{I}'_2} \underline{z}_1, \\ \underline{z}_1 \left(1 - \frac{\dot{I}'_2}{\dot{I}_1} \frac{{}^2\dot{I}_1}{\dot{I}'_2} \right) &= \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1} - \frac{\dot{I}'_2}{\dot{I}_1} \frac{{}^2\dot{U}'_2}{\dot{I}'_2}, \\ \underline{z}_1 &= \frac{\dot{U}_1 \dot{I}'_2 - {}^2\dot{U}'_2 \dot{I}_1}{\dot{I}_1 \dot{I}'_2 - \dot{I}'_2 \dot{I}_1}, \end{aligned}$$

Из обратимости трансформатора следует

$$\underline{z}'_2 = \frac{{}^2\dot{U}'_2 \dot{I}_1 - \dot{U}_1 \dot{I}'_2}{\dot{I}_1 \dot{I}'_2 - \dot{I}'_2 \dot{I}_1}.$$

Пример. Трансформатор ОСМ-1,00. Измеренные с высокой точностью величины: $\dot{U}_1 = 5,513 \text{ В}$; $\dot{I}_1 = 4,025e^{-j20,50^\circ} \text{ А}$; $\dot{I}'_2 = 4,016e^{-j20,48^\circ} \text{ А}$; ${}^2\dot{U}'_2 = 5,572 \text{ В}$; ${}^2\dot{I}'_2 = 4,061e^{j20,71^\circ} \text{ А}$; ${}^2\dot{I}_1 = 5,660e^{-j19,29^\circ} \text{ А}$.

$$\begin{aligned} \underline{z}_1 &= \frac{\dot{U}_1 \dot{I}'_2 - {}^2\dot{U}'_2 \dot{I}_1}{\dot{I}_1 \dot{I}'_2 - \dot{I}'_2 \dot{I}_1} = \\ &= \frac{5,513 \cdot 4,061e^{j20,71^\circ} - 5,572 \cdot 4,016e^{-j20,48^\circ}}{4,025e^{-j20,50^\circ} \cdot 4,061e^{j20,71^\circ} - 4,016e^{-j20,48^\circ} \cdot 5,660e^{-j19,29^\circ}} = \\ &= 1,072e^{-j4,29^\circ} (\text{Ом}), \\ r_1 &= 1,069 \text{ Ом}, \\ x_1 &= -0,080 \text{ Ом}, \\ \underline{z}'_2 &= \frac{{}^2\dot{U}'_2 \dot{I}_1 - \dot{U}_1 \dot{I}'_2}{\dot{I}_1 \dot{I}'_2 - \dot{I}'_2 \dot{I}_1} = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= \frac{5,572 \cdot 4,025e^{-j20,50^\circ} - 5,513 \cdot 5,660e^{-j19,29^\circ}}{4,025e^{-j20,50^\circ} \cdot 4,061e^{j20,71^\circ} - 4,016e^{-j20,48^\circ} \cdot 5,660e^{-j19,29^\circ}} = \\ &= 0,597e^{j69,42^\circ} (\text{Ом}), \\ r'_2 &= 0,210 \text{ Ом}, \\ x'_2 &= 0,559 \text{ Ом}. \end{aligned}$$

Эти значения хорошо соответствуют результатам высокоточного экспериментального метода холостого хода ($x_1 = -0,081 \text{ (Ом)}$, $x'_2 = 0,562 \text{ (Ом)}$) [1].

Таким образом, реактивное сопротивление рассеяния каждой обмотки трансформатора в отдельности может быть определено экспериментальным высокоточным методом короткого замыкания.

Почти парадоксальный результат – емкостный характер сопротивления рассеяния внутренней обмотки получен лишь для концентрических цилиндрических обмоток. Обобщать его на другие типы обмоток не следует [6, 7]. Этот результат не является беспрецедентным. Индуктивная электрическая машина – синхронный компенсатор в перевозбужденном состоянии тоже имеет емкостный характер.

Представленный экспериментальный метод не привязан к характеру реактивности сопротивлений рассеяния. Он является универсальным – его можно использовать при любых типах обмоток.

ЛИТЕРАТУРА

1. Павлов В.Д. Математическая модель высокоточного метода холостого хода определения рассеяния обмоток трансформатора по отдельности // Автоматизированные технологии и производства. 2021 № 2 (24). С. 11–13.
2. Кантор В.В. К расчёту индуктивности рассеяния обмоток трансформаторов // Электротехника. 2009. № 4. С. 51–55.
3. Иванова Т.Г., Шевцов В.М. Определение по цифrogramмам индуктивности рассеяния обмоток силового трансформатора // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2013. № 1. С. 88–91.
4. Лихачев Д.И. Аналитический расчет индуктивности рассеяния трансформаторов машин контактной сварки // Евразийский союз ученых. 2015. № 12-5 (21). С. 70–72.
5. Марквардт Е. Г. Об электромагнитном рассеянии // Электричество. 1935. № 9. С. 44–51.
6. Лицин К.В., Орехов В.В., Сарманов Т.М. Сравнительный анализ системы управления векторно-импульсного пуска при наличии промежуточных трансформаторов и без них // Автоматизированные технологии и производства. 2016. № 1 (11). С. 74–76.
7. Лицин К.В., Басков С.Н. Пуск высоковольтных электродвигателей с промежуточным трансформатором // Автоматизированные технологии и производства. 2013. № 5 (11). С. 185–187.

MATHEMATICAL MODEL OF THE HIGH PRECISION SHORT CIRCUIT METHOD FOR DETERMINING THE SCATTERING OF TRANSFORMER WINDINGS SEPARATELY

V.D. Pavlov

Vladimir Electromechanical Plant, Vladimir, Russia

e-mail: pavlov.val.75@mail.ru

Abstract. The purpose of the study is to substantiate the possibility of experimental determination of leakage reactances for each winding of the transformer separately, which can be established by a high-precision short circuit method.

Keywords: transformer, winding, scattering, inductive, capacitive, flux linkage, magnetic flux.

REFERENCES

1. Pavlov V.D. Mathematical model of the high-precision no-load method for determining the scattering of transformer windings separately [Matematicheskaya model' vysokotochnogo metoda kholostogo khoda opredeleniya rasseyaniya obmotok transformatora po otdel'nosti]. *Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva [Automated technologies and production]*, 2021, no. 2 (24), pp. 11–13. (in Russian)
2. V. V. Kantor To the calculation of the leakage inductance of transformer windings [K raschotu induktivnosti rasseyaniya obmotok transformatorov]. *Elektrotehnika [Electrical Engineering]*, 2009, no. 4, pp. 51–55. (in Russian)
3. Ivanova T.G., Shevtsov V.M. Determination of the leakage inductance of the windings of a power transformer by digits [Opredeleniye po tsifro-grammam induktivnosti rasseyaniya obmotok silovogo transformatora]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika [Proceedings of higher educational institutions. Electromechanics]*, 2013, no. 1, pp. 88–91. (in Russian)
4. Likhachev D.I. Analytical calculation of the leakage inductance of transformers of resistance welding machines [Analiticheskiy raschet induktivnosti rasseyaniya transformatorov mashin kontaktной svarki]. *Yevraziyskiy soyuz uchenykh [Eurasian Union of Scientists]*, 2015, no. 12-5 (21), pp. 70–72. (in Russian)
5. Marquardt E.G. On electromagnetic scattering [Ob elektromagnitnom rasseyanii]. *Elektrichestvo [Electricity]*, 1935, no. 9, pp. 44–51. (in Russian)
6. Litsin K.V., Orekhov V.V., Sarmanov T.M. Comparative analysis of the vector-pulse start control system with and without intermediate transformers [Sravnitel'nyy analiz sistemy upravleniya vektorno-impul'snogo puska pri nalichii promezhutochnykh transformatorov i bez nikh]. *Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva [Automated technologies and production]*, 2016, no. 1 (11), pp. 74–76. (in Russian)
7. Litsin K.V., Baskov S.N. Start of high-voltage electric motors with an intermediate transformer [Pusk vysokovol'tnykh elektrodvigateley s promezhutochnym transformatorom]. *Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva [Automated technologies and production]*, 2013, no. 5 (11), pp. 185–187. (in Russian)

Павлов, В.Д. Математическая модель высокоточного метода короткого замыкания для определения рассеяния обмоток трансформатора по отдельности / В.Д. Павлов // Автоматизированные технологии и производства. 2022. №1(25). С.14-16.

V.D. Pavlov Mathematical model of the high precision short circuit method for determining the scattering of transformer windings separately. *Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva [Automation of technologies and production]*, 2022, no.1(25), pp.14-16. (In Russian).

МЕХАНИЧЕСКАЯ РЕАКТИВНАЯ ИНЕРЦИОННАЯ МОЩНОСТЬ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ МОНИТОРИНГА ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ

И.П. Попов

Центр высоких технологий, Москва, Россия

e-mail: i.popov@yandex.ru

Аннотация. Используемым базовым понятием является основная аксиома механики. Установлено, что под активной мощностью понимается среднее за полпериода значение мгновенной мощности, а под реактивной – амплитудное значение. В электротехнике все обстоит аналогичным образом. Еще одним обобщением из электротехники является полная механическая мощность. Она примечательна тем, что, с одной стороны, описывается формулой Пифагора, а с другой – равна произведению действующих значений гармонических величин.

Ключевые слова: активная мощность, трение, мгновенная мощность, кинетическая энергия, инертность.

Механическая энергия бывает обратимой – потенциальная и кинетическая, а также необратимой, например, тепловая при трении. В качестве механической мощности принято считать временную производную от последней. В силу необратимости тепловой энергии ее производная принимает только положительные значения.

Вместе с тем, производные могут быть взяты как от потенциальной, так и от кинетической энергии. При этом наиболее интересный случай доставляют гармонические колебания, при которых производные (мгновенные мощности) необходимо являются знакопеременными функциями, что принципиально отличает их от тепловой мощности [1].

Аналогом кинетической энергии в электротехнике является энергия магнитного поля катушки индуктивности, аналогом потенциальной энергии – энергия электрического поля конденсатора, а аналогом механической тепловой энергии – тепловая же энергия, рассеиваемая резистором.

Цель исследования состоит в детализации видов механической мощности при гармонических колебаниях

Актуальность работы обусловлена тем, что механические колебания широко распространены в разнообразных технологических процессах. Поскольку приводы машин и механизмов являются преимущественно электромеханическими [2–4], механическая реактивная мощность трансформируется в электрическую реактивную мощность сети, ухудшая качество электроэнергии. В этой связи учет механической реактивной мощности имеет немаловажное значение, в том числе, для целей мониторинга энергосберегающих технологий [5].

Движение груза (инертного тела) описывается известным выражением

$$x = l \sin \omega t .$$

Соответственно, скорость –

$$v = \dot{x} = l \omega \cos \omega t = V_m \cos \omega t .$$

Для гармонической величины действующее значение меньше амплитудного в $\sqrt{2}$.

$$V = \frac{V_m}{\sqrt{2}} = \frac{l \omega}{\sqrt{2}} . \quad (1)$$

Формула для силы имеет вид:

$$f_a = m \ddot{x} = -l m \omega^2 \sin \omega t . \quad (2)$$

Формула для силы трения –

$$f_\mu = \mu \dot{x} = \mu l \omega \cos \omega t . \quad (3)$$

Результирующая сила –

$$f = f_a + f_\mu = -l m \omega^2 \sin \omega t + \mu l \omega \cos \omega t = \\ = l \omega \sqrt{\mu^2 + m^2 \omega^2} \left(\frac{\mu}{\sqrt{\mu^2 + m^2 \omega^2}} \cos \omega t - \frac{m \omega}{\sqrt{\mu^2 + m^2 \omega^2}} \sin \omega t \right) .$$

Можно обозначить

$$\varphi = \arctg \frac{m \omega}{\mu} . \quad (4)$$

С учетом этого

$$f = l \omega \sqrt{\mu^2 + m^2 \omega^2} (\cos \varphi \cos \omega t - \sin \varphi \sin \omega t) = \\ = l \omega \sqrt{\mu^2 + m^2 \omega^2} \cos(\omega t + \varphi) .$$

Очевидно, что

$$F_m = l \omega \sqrt{\mu^2 + m^2 \omega^2}$$

Действующее значение результирующей силы равно

$$F = \frac{F_m}{\sqrt{2}} = \frac{l \omega \sqrt{\mu^2 + m^2 \omega^2}}{\sqrt{2}} \quad (5)$$

Мгновенная результирующая мощность –

$$s = f v = l \omega \sqrt{\mu^2 + m^2 \omega^2} \cos(\omega t + \varphi) l \omega \cos \omega t = \\ = 0,5 l^2 \omega^2 \sqrt{\mu^2 + m^2 \omega^2} [\cos \varphi + \cos(2\omega t + \varphi)] = \\ = F V [\cos \varphi + \cos(2\omega t + \varphi)] = \\ = F V (\cos \varphi + \cos 2\omega t \cos \varphi - \sin 2\omega t \sin \varphi) = \\ = F V \cos \varphi (1 + \cos 2\omega t) - F V \sin \varphi \sin 2\omega t = \\ = p + q_i \quad (6)$$

В электротехнике есть выражение аналогичное (6) с заменами $F \rightarrow U$ $V \rightarrow I$. Из него определяют активную мощность, а именно:

$$P = UI \cos \varphi.$$

Поэтому активную (тепловую) механическую мощность тоже следует определить как

$$P = FV \cos \varphi. \quad (7)$$

Очевидно, что гармонические сила и скорость совершают колебания со сдвигом фаз, равным φ .

Из вышеназванной формулы электротехники определяют реактивную мощность, а именно:

$$P = UI \sin \varphi.$$

Поэтому реактивную (инерционную) механическую мощность тоже следует определить как

$$Q_i = FV \sin \varphi. \quad (8)$$

Из формулы (6) следует, что под активной мощностью понимается среднее за полпериода значение мгновенной мощности, а под реактивной – амплитудное значение. В электротехнике все обстоит аналогичным образом.

Еще одним обобщением из электротехники является полная механическая мощность

$$S = FV = \sqrt{Q_i^2 + P^2}. \quad (9)$$

Она примечательна тем, что, с одной стороны, описывается формулой Пифагора, а с другой – равна произведению действующих значений гармонических величин.

Имея в виду (1), (5) и (8),

$$Q_i = FV \sin \varphi = \frac{l\omega\sqrt{\mu^2 + m^2\omega^2}}{\sqrt{2}} \frac{l\omega}{\sqrt{2}} \frac{m\omega}{\sqrt{\mu^2 + m^2\omega^2}} = \frac{ml^2\omega^3}{2}. \quad (10)$$

При этом

$$f_a v = -lm\omega^2 \sin \omega t l\omega \cos \omega t = -0,5l^2 m\omega^3 \sin 2\omega t = -F_a V \sin 2\omega t = -Q_i \sin 2\omega t. \quad (11)$$

Это соответствует выражениям (6) и (10).

Имея в виду (1), (5) и (7),

$$P = FV \cos \varphi = \frac{l\omega\sqrt{\mu^2 + m^2\omega^2}}{\sqrt{2}} \frac{l\omega}{\sqrt{2}} \frac{\mu}{\sqrt{\mu^2 + m^2\omega^2}} = \frac{\mu l^2 \omega^2}{2}.$$

При этом (12)

$$f_\mu v = \mu l \omega \cos \omega t l \omega \cos \omega t = 0,5\mu l^2 \omega^2 (1 + \cos 2\omega t) = F_\mu V (1 + \cos 2\omega t) = P(1 + \cos 2\omega t).$$

Это соответствует выражениям (6) и (12).

Имея в виду (9), (10) и (12),

$$S = FV = \frac{l\omega\sqrt{\mu^2 + m^2\omega^2}}{\sqrt{2}} \frac{l\omega}{\sqrt{2}} = \frac{l^2 \omega^2 \sqrt{\mu^2 + m^2\omega^2}}{2}.$$

Таким образом, при колебаниях груза развивается знакопеременная реактивная мощность, характеризующая обратимость кинетической энергии, которую полезно учитывать для целей мониторинга энергосберегающих технологий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хайдаров С.Д., Солиев А.Г., Рустамова Ш.Ш. Анализ электромеханических колебаний в регулируемой электрической системе // Автоматизированные технологии и производства. 2016. № 2 (12). С. 48–52.
2. 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.
3. Петрякова Е.С., Идрисов И.Н., Лымарь А.Б., Вечеркин М.В. Компьютерная модель для исследования пусковых процессов в асинхронных электроприводах // Автоматизированные технологии и производства. 2015. № 2 (8). С. 14–16.
4. 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.
5. Щелоков Я.М., Лисиенко В.Г. Энергетические исследования в металлургии // Автоматизированные технологии и производства. 2012. № 4. С. 13–21.

MECHANICAL REACTIVE INERTIA POWER FOR THE PURPOSES OF MONITORING ENERGY SAVING TECHNOLOGIES

I.P. Popov

Center of High Technologies, Moscow, Russia

e-mail: i.popow@yandex.ru

Abstract. The basic concept used is the basic axiom of mechanics. It has been established that the active power is understood as the average value of the instantaneous power over half a period, and the reactive power is the amplitude value. In electrical engineering, things are the same. Another generalization from electrical engineering is total mechanical power. It is remarkable in that, on the one hand, it is described by the Pythagorean formula, and on the other hand, it is equal to the product of the effective values of harmonic quantities.

Keywords: active power, friction, instantaneous power, kinetic energy, inertia.

REFERENCES

1. Khaydarov S.D., Soliev A.G., Rustamova Sh.Sh. Analysis of electromechanical oscillations in a controlled electrical system [Analiz elektromekhanicheskikh kolebaniy v reguliruyemoy elektricheskoy sisteme], *Avtomatizirovannye tehnologii i proizvodstva [Automation of technologies and production]*, 2016, no. 2 (12), pp. 48–52. (In Russian)

2. 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)

3. Petryakova E.S., Idrisov I.N., Lyman A.B., Vecherkin M.V. Computer model for the study of starting processes in asynchronous electric drives [Komp'yuternaya model' dlya issledovaniya puskovykh protsessov v asinkhronnykh elektro-

privodakh], *Avtomatizirovannye tehnologii i proizvodstva [Automation of technologies and production]*, 2015, no. 2 (8), pp. 14–16. (In Russian)

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

5. Shchelokov Ya.M., Lisienko V.G. Energy surveys in metallurgy [Energeticheskiye obsledovaniya v metallurgii], *Avtomatizirovannye tehnologii i proizvodstva [Automation of technologies and production]*, 2012, no. 4, pp. 13–21. (In Russian)

Попов, И.П. Механическая реактивная инерционная мощность для целей мониторинга энергосберегающих технологий / И.П. Попов // Автоматизированные технологии и производства. 2022. №1(25). С.17-19.

I.P. Popov Mechanical reactive inertia power for the purposes of monitoring energy saving technologies. *Avtomatizirovannye tehnologii i proizvodstva [Automation of technologies and production]*, 2022, no.1(25), pp.17-19. (In Russian).

УДК 537.311.6

УПРАВЛЯЕМАЯ ИСКУССТВЕННАЯ УПРУГОСТЬ В МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМАХ

В.Д. Павлов

Владимирский электромеханический завод, Владимир, Россия

e-mail: pavlov.val.75@mail.ru

Аннотация. Предложена схема устройства, обладающего искусственной или электромагнитной упругостью. Искусственная упругость может быть компонентом мехатронных систем, в том числе, механического линейного гармонического осциллятора и колебательных устройств с однородными элементами.

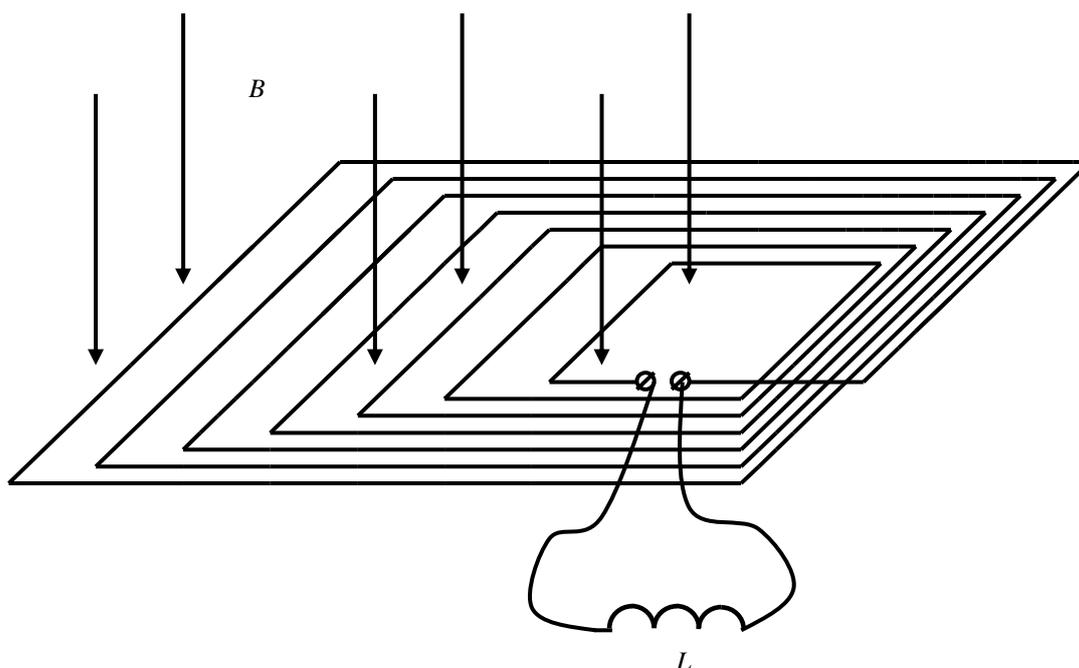
Ключевые слова: упругость, индуктивность, балансировка, регулирование, маятник, контур.

В классической механике механическая величина коэффициент упругости k определяется законом Гука. «Натуральная» упругость обуславливается свойствами вещества упругого объекта, под которым обычно имеется в виду пружина, и его формой.

В отличие от квазиупругих объектов, для которых закон Гука выполняется лишь для малых деформаций $dF = -kdx$, под искусственной упругостью следует понимать величину, удовлетворяющую закону Гука, при любых возможных перемещениях.

Искусственная упругость может быть компонентом мехатронных систем, в том числе, механического линейного гармонического осциллятора и колебательных устройств с однородными элементами.

На рисунке представлено устройство, обладающее свойствами искусственной или индуктивной упругости. Количество проводящих рамок – n , длина их активной части – l , индукция магнитного поля – B , индуктивность катушки – L . Масса, активное сопротивление и индуктивность рамок не учитываются.



Устройство, обладающее искусственной или индуктивной упругостью

При перемещении устройства в рамках возникает ЭДС электромагнитной индукции $e_i = -Bl\dot{x}/dt$. В соответствии со вторым законом Кирхгофа

$$Bl\dot{n} \frac{\partial x}{\partial t} = -L \frac{\partial i}{\partial t}.$$

Здесь $-L \partial i / \partial t$ – напряжение на катушке. Пусть для компактности

$$Bl\dot{n} = y^{0,5}$$

Интеграл исходного выражения

$$y^{0,5} \int_0^t \frac{\partial x}{\partial t} dt = -L \int_0^t \frac{\partial i}{\partial t} dt,$$

$$y^{0,5} x = -Li.$$

С учетом последнего равенства закон Ампера запишется в виде:

$$F = y^{0,5} i = -\frac{y}{L} x = -k_L x.$$

Это запись закона Гука.

$$k_L = \frac{y}{L}$$

– коэффициент индуктивной упругости. В математическом отношении это выражение идентично формуле для упругой индуктивности

$$L_k = \frac{y}{k}.$$

Искусственная или индуктивная упругость в сочетании с инертным грузом может образовывать маятник, частота которого

$$\omega = \sqrt{\frac{k_L}{m}} = \sqrt{\frac{y}{Lm}}.$$

Сравнение этой формулы с выражением для частоты электрического колебательного контура

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

позволяет получить формулу для искусственной или инертной емкости [1]

$$C_m = \frac{m}{y},$$

из которой, в свою очередь, выводится искусственная или емкостная масса

$$m_C = yC$$

Описанный выше $k_L m$ маятник в равной мере можно рассматривать как $C_m L$ электрический колебательный контур.

В рассмотренной электромеханической $k_L m$ ($C_m L$) системе могут возникать свободные гармонические колебания, обусловленные взаимным преобразованием кинетической энергии груза в энергию магнитного поля катушки индуктивности.

Искусственная упругость принципиально отличается от аналогии между коэффициентом упругости и индуктивностью, поскольку электромагнитные аналоги не могут применяться в качестве элементов механических систем.

Искусственная упругость может использоваться в мехатронных системах и устройствах автоматики [2–4].

ЛИТЕРАТУРА

1. Павлов В.Д. Накопитель энергии транспортно-технологической машины с возможностью автоматического управления // Автоматизированные технологии и производства. 2021 № 2 (24). С. 7–10.
2. Ишметьев, Е.Н. Автоматизация процесса вычисления объема металлолома для кислородно-конвертерного процесса с использованием 3D-камеры / Е.Н. Ишметьев, Д.В. Чистяков, А.Н. Панов, Е.Э. Бодров // Автоматизированные технологии и производства. 2017. №2(16). С.4-9.
3. Толстова, Ю.С. Оптимизация параметров процесса непрерывного горячего цинкования с использованием экспериментально-статистической модели / Ю.С. Толстова, В.А. Газизова, И.Г. Самарина // Автоматизированные технологии и производства. 2019. №1(19). С.14-17.
4. Газизова, В.А. Обзор методов и средств измерения уровня металла в кристаллизаторе МНЛЗ / В.А. Газизова, Ю.С. Толстова, Е.Ю. Мухина // Автоматизированные технологии и производства. 2019. №1(19). С.21-24.

CONTROLLED ARTIFICIAL ELASTICITY IN MECHATRONIC SYSTEMS

V.D. Pavlov

Vladimir Electromechanical Plant, Vladimir, Russia

e-mail: pavlov.val.75@mail.ru

Abstract. A scheme of a device with artificial or electromagnetic elasticity is proposed. Artificial elasticity can be a component of mechatronic systems, including a mechanical linear harmonic oscillator and oscillatory devices with homogeneous elements.

Keywords: elasticity, inductance, balancing, regulation, pendulum, contour.

REFERENCES

1. Pavlov V.D. Energy storage of a transport-technological machine with the possibility of automatic control [Накопитель энергии транспортно-технологической машины с

возможностью автоматического управления]. *Автоматизированные технологии и производства [Automation of technologies and production]*, 2021, no.2 (24), pp. 7–10. (In Russian)

2. Ishmetyev E.N., Chistyakov D.V., Panov A.N., Bodrov E.E. automated calculation of scrap-metal's volume in oxygen converter process using 3d-camera [Avtomatizatsiya protsessa vychisleniya ob'yema metalloloma dlya kislorodno-konverternogo protsessa s ispol'zovaniyem 3D-kamery]. *Avtomatizirovannye tekhnologii proizvodstva [Automation of Technologies and Production]*, 2017, no.2(16), pp. 4-9.

3. Tolstova Yu.S., Gazizova V.A., Samarina I.G. Optimization of parameters of process of continuous hot galvanising with use of the experimental statistical model [Optimizatsiya parametrov protsessa nepreryvnogo goryachego tsinkovaniya s ispol'zovaniyem eksperimental'no-statisticheskoy modeli].

Avtomatizirovannye tekhnologii i proizvodstva [Automation of technologies and production], 2019, no.1(19), pp.14-17. (In Russian)

4. Gazizova V.A., Tolstova Yu.S., Mukhina E.Yu. The review of methods and measuring instruments of level of metal in machine continuous-casting machines crystallizer [Obzor metodov i sredstv izmereniya urovnya metalla v kristallizatore MNLZ]. *Avtomatizirovannye tekhnologii i proizvodstva [Automation of technologies and production]*, 2019, no.1(19), pp.21-24. (In Russian)

Павлов, В.Д. Управляемая искусственная упругость в мехатронных системах / В.Д. Павлов // Автоматизированные технологии и производства. 2022. №1(25). С.20-22.

V.D. Pavlov Controlled artificial elasticity in mechatronic systems. *Avtomatizirovannye tekhnologii i proizvodstva [Automation of technologies and production]*, 2022, no.1(25), pp.20-22. (In Russian).

ИНЕРТНО-ИНДУКТИВНЫЕ КОЛЕБАНИЯ В МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМАХ

И.П. Попов

Центр высоких технологий, Москва, Россия

e-mail: i.popow@yandex.ru

Аннотация. Предлагается математическая модель инертно-индуктивного осциллятора, который можно использовать в автоматизированных, в том числе, мехатронных системах. Свободные гармонические колебания происходят за счет взаимного преобразования кинетической энергии инертного элемента в энергию магнитного поля катушки индуктивности.

Ключевые слова: колебания, осциллятор, привод, частота, инертный, индуктивный.

Мехатронные системы включают в себя как элементы, характеризуемые механическими параметрами (масса, жесткость, трение) [1–3], так и электрическими (индуктивность, емкость, сопротивление) [4].

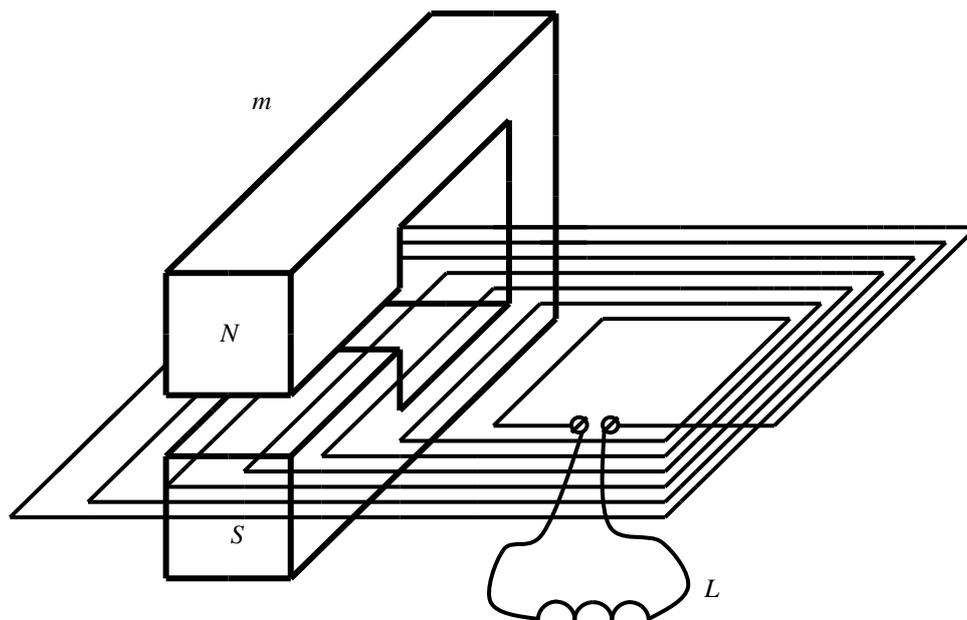
Функционирование механических элементов сопряжено с развитием и преобразованием механических видов энергии – кинетической, потенциальной, тепловой [5]. Работа электрических компонентов системы характеризуется энергией магнитного поля, электрического поля и активной [6].

Механические и электрические составляющие мехатронных систем взаимодействуют между собой, что создает возможность обмена энергией между ними.

При определенных обстоятельствах такой энергообмен может приводить к возникновению электромеханических колебаний, которые могут быть как полезными, так и вредными.

Целью работы является построение математической модели инертно-индуктивных колебаний в мехатронных системах.

На рисунке представлена упрощенная схема инертно-индуктивного осциллятора.



Инертно-индуктивный осциллятор

Приняты следующие обозначения. Масса подвижного инертного элемента, в котором локализован магнитный поток, – m ; магнитная индукция в рабочем зазоре – B ; между полюсами подвижного инертного элемента нахо-

дятся n проводников якорной обмотки с длиной активной части l ; суммарная индуктивность катушки и якорной обмотки – L . Активное сопротивление, потери на трение, и емкость витков обмотки не учитываются.

Пусть начальные условия: $x(0) = 0$; $dx/dt(0) = v_0$; $i(0) = i_0$. Механическое и электрическое состояния mL колебательной системы описываются двумя уравнениями в соответствии со вторыми законами Ньютона и Кирхгофа:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = Blni, \quad (1)$$

$$Bln \frac{dx}{dt} + L \frac{di}{dt} = 0. \quad (2)$$

Здесь x – перемещение подвижного инертного элемента, $Blni$ – сила Ампера, $Bln dx/dt$ – ЭДС электромагнитной индукции, $-L di/dt$ – ЭДС самоиндукции. B , l , n , – параметры, обуславливающие электромеханическое взаимодействие. Их для компактности целесообразно объединить в параметрический коэффициент

$$y = (Bln)^2. \quad (3)$$

Из (2) следует

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = -y^{-0.5} L \frac{d^2 i}{dt^2}.$$

Подстановка этого выражения в (1) дает

$$\frac{d^2 i}{dt^2} + \frac{y}{mL} i = 0.$$

Это классическое уравнение свободных гармонических колебаний. Его решение

$$\begin{aligned} i &= I_m \sin(\omega_0 t + \varphi), \\ x &= y^{-0.5} L [I_m \sin(\omega_0 t + \varphi) - i_0], \\ I_m &= \sqrt{i_0^2 + \frac{E_0^2}{X_{mL}^2}} = \sqrt{i_0^2 + v_0^2 \frac{m}{L}}, \\ \varphi &= \arctg \frac{i_0 X_{mL}}{E_0} = \arctg \frac{i_0}{v_0} \sqrt{\frac{L}{m}}, \\ \omega_{0mL} &= \sqrt{\frac{y}{mL}} \end{aligned} \quad (4)$$

– собственная частота автономной консервативной mL -системы (инертно-индуктивного осциллятора). При этом происходят как электрические так и механические колебания.

$$X_{mL} = \sqrt{\frac{yL}{m}}$$

– волновое сопротивление инертно-индуктивного осциллятора.

Сопоставление (4) с выражениями для собственных частот пружинного маятника и электрического колебательного контура

$$\begin{aligned} \omega_{0km} &= \sqrt{\frac{k}{m}}, \\ \omega_{0LC} &= \frac{1}{\sqrt{LC}} \end{aligned}$$

позволяет установить частные функциональные зависимости между механическими и электрическими параметрами и получить электромеханические величины, а именно: индуктивную упругость

$$k_L = \frac{y}{L} \quad (5)$$

и инертную емкость

$$C_m = \frac{m}{y}. \quad (6)$$

В связи с этим инертно-индуктивный осциллятор в равной мере может рассматриваться как mk_L механический маятник и как LC_m электрический колебательный контур, частота которого, соответственно, равна

$$\omega_{0mL} = \sqrt{\frac{k_L}{m}} = \frac{1}{\sqrt{LC_m}}.$$

Выражение (6) показывает, что реактивное сопротивление, обусловленное инертностью, имеет емкостной характер.

В соответствии с (1) и (3) сила равна

$$f = y^{0.5} i.$$

Из (2) следует

$$y^{0.5} x = -Li.$$

С учетом последнего выражения и (5)

$$f = y^{0.5} i = -\frac{y}{L} x = -k_L x.$$

Это выражение совпадает с записью закона Гука.

Таким образом, предложенная математическая модель показывает, что в предложенном устройстве могут возникать свободные гармонические колебания за счет взаимного преобразования кинетической энергии в энергию магнитного поля, следовательно, его можно использовать в качестве осциллятора, в т.ч. в приводе вибрационных машин.

ЛИТЕРАТУРА

1. Крахмалев О.Н., Крахмалев Г.Н. Моделирование отклонений в шарнирах манипуляционных систем промышленных роботов и многокоординатных станков // Автоматизированные технологии и производства. 2016. № 4 (14). С. 18–22.
2. Прохоров И.Б., Гребенщиков П.А., Мубаракшин А.Р., Ахметдинов Д.А., Моисеев В.С. Система автоматического управления угловой стабилизацией квадрокоптера // Автоматизированные технологии и производства. 2015. № 3 (9). С. 36–39.
3. Прохоров И.Б., Юшкин Д.А., Евдокимов С.А., Гребенщиков П.А. Моделирование количественных характеристик беспилотного летательного аппарата мультироторного типа на основе расчета определяющих параметров // Автоматизированные технологии и производства. 2015. № 4 (10). С. 48–52.
4. Хайдаров С.Д., Солиев А.Г., Рустамова Ш.Ш. Анализ электромеханических колебаний в регулируемой электрической системе // Автоматизированные технологии и производства. 2016. № 2 (12). С. 48–52.
5. Павлов В.Д. Накопитель энергии транспортно-технологической машины с возможностью автоматического управления // Автоматизированные технологии и производства. 2021 № 2 (24). С. 7–10.
6. Попов И.П. Искусственный емкостный маховик с возможностью автоматического регулирования момента инерции // Автоматизированные технологии и производства. 2020. № 2 (22). С. 29–31.

INERT-INDUCTIVE OSCILLATIONS IN MECHATRONIC SYSTEMS

I.P. Popov

Center of High Technologies, Moscow, Russia

e-mail: i.popov@yandex.ru

Abstract. A mathematical model of an inert-inductive oscillator is proposed, which can be used in automated, including mechatronic systems. Free harmonic oscillations occur due to the mutual conversion of the kinetic energy of an inert element into the energy of the magnetic field of the inductor.

Keywords: oscillations, oscillator, drive, frequency, inert, inductive.

REFERENCES

1. Krakhmalev O.N., Krakhmalev G.N. Simulation of Deviations in Hinges of Manipulation Systems of Industrial Robots and Multi-Axis Machine Tools [Modelirovaniye otkloneniy v sharnirakh manipulyatsionnykh sistem promyshlennyykh robotov i mnogokoordinatnykh stankov], *Avtomatizirovannyye tehnologii i proizvodstva [Automation of technologies and production]*, 2016, no. 4 (14), pp. 18–22. (In Russian)
2. Prokhorov I.B., Grebenshchikov P.A., Mubarakshin A.R., Akhmetdinov D.A., Moiseev V.S. Quadcopter Angular Stabilization Automatic Control System [Sistema avtomaticheskogo upravleniya uglovoy stabilizatsiyey kvadroptera], *Avtomatizirovannyye tehnologii i proizvodstva [Automation of technologies and production]*, 2015, no. 3 (9), pp. 36–39. (In Russian)
3. Prokhorov I.B., Yushkin D.A., Evdokimov S.A., Grebenshchikov P.A. Modeling of the quantitative characteristics of a multicopter unmanned aerial vehicle based on the calculation of the determining parameters [Modelirovaniye kolichestvennykh kharakteristik bespilotnogo letatel'nogo apparata mul'tirotnogo tipa na osnove rascheta opredelyayushchikh parametrov], *Avtomatizirovannyye tehnologii i proizvodstva [Automation of technologies and production]*, 2015, no. 4 (14), pp. 48–52. (In Russian)
4. Khaydarov S.D., Soliev A.G., Rustamova Sh.Sh. Analysis of electromechanical oscillations in a controlled electrical system [Analiz elektromekhanicheskikh kolebaniy v reguliruyemoy elektricheskoy sisteme], *Avtomatizirovannyye tehnologii i proizvodstva [Automation of technologies and production]*, 2016, no. 2 (12), pp. 48–52. (In Russian)
5. Pavlov V.D. Energy storage of a transport-technological machine with the possibility of automatic control [Nakopitel' energii transportno-tekhnologicheskoy mashiny s vozmozhnost'yu avtomaticheskogo upravleniya], *Avtomatizirovannyye tehnologii i proizvodstva [Automation of technologies and production]*, 2021, no. 2 (24), pp. 7–10. (In Russian)
6. Popov I.P. Artificial capacitive flywheel with the ability to automatically control the moment of inertia [Iskusstvennyy yemkostnyy makhovik s vozmozhnost'yu avtomaticheskogo regulirovaniya momenta inertsii], *Avtomatizirovannyye tehnologii i proizvodstva [Automation of technologies and production]*, 2020, no. 2 (22), pp. 29–31. (In Russian)

Попов, И.П. Инертно-индуктивные колебания в мехатронных системах / И.П. Попов // Автоматизированные технологии и производства. 2022. №1(25). С.23-25.

I.P. Popov Inert-inductive oscillations in mechatronic systems. *Avtomatizirovannyye tehnologii i proizvodstva [Automation of technologies and production]*, 2022, no.1(25), pp.23-25. (In Russian).

УДК 378.4

ИТОГИ УНИВЕРСИАДЫ 2022 ГОДА «ПУТЬ К УСПЕХУ» ПО МЕТРОЛОГИИ И СРЕДСТВАМ ИЗМЕРЕНИЯ ПО НАПРАВЛЕНИЮ «УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ»

Т.Г. Сухоносова

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

t.suhonosova@magtu.ru

Аннотация. На кафедре автоматизированных систем управления института энергетики и автоматизированных систем ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И.Носова» весной 2022 года состоялась Универсиада «Путь к успеху» по направлению «Управление в технических системах (метрология и средства измерения)». Участие в Универсиаде приняли более 160 студентов из разных регионов России.

Ключевые слова: проведение универсиады, метрология, управление в технических системах.

На базе кафедры автоматизированных систем управления ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И.Носова» впервые была проведена Универсиада «Путь к успеху» по метрологии и средствам измерения по направлению 27.03.04 «Управление в технических системах» (далее Универсиада). Универсиада проводилась с февраля 2022 года по апрель 2022 года и включала в себя отборочный этап в виде интернет тестирования и заключительный. Заключительный этап проходил в очном формате в лаборатории кафедры АСУ 30 марта 2022 г и содержал как теоретические, так и практические задания.

Под руководством заведующего кафедры АСУ Сергея Михайловича Андреева преподавателями кафедры Ириной Геннадьевной Самариной, Альбиной Робертовной Бондаревой и Татьяной Геннадьевной Сухоносовой был разработан комплект заданий для проведения универсиады. Оборудование подготовлено заведующим лабораторий кафедры АСУ Александром Михайловичем Сайровым.

Общее количество участников Универсиады составило 165 обучающихся вузов и выпускников прошлых лет, из них 26 студентов проживающих в других городах России, среди которых Уфа, Челябинск, Казань, Екатеринбург, Нижневартовск, Сибай, Гай, Белорецк, Учалы. Участие в отборочном туре Универсиады приняли студенты МГТУ им. Г.И. Носова, а также студенты из других вузов РФ, а именно: Южно-Уральский Государственный Университет, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Челябинский Государ-

ственный университет, Тюменский индустриальный университет, Уфимский государственный нефтяной технический университет, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Казанский Национальный Исследовательский Технический Университет им. А.Н. Туполева.



Рис. 1. Выполнение практического задания заключительного этапа Универсиады

По итогам Универсиады УТС-2022 было присуждено шесть призовых мест: I место – Бондарев Е.С. из гр. АНб-19-1; II место – Ан Д.Р. и Котельников К.И. из гр. АТСб-18-1; III место - Каримова М.И. и Дубровская А.А. из гр. АТСб-19-1 и Давлетбердина Н.Р. из гр. ТХб-18-1. Победителям вручены почетные дипломы и сувениры, а также предоставлены дополнительные баллы при поступлении в магистратуру МГТУ им. Г.И. Носова по направлению 27.03.04..

©Сухоносова Т.Г. 2022

RESULTS OF THE UNIVERSIADE - 2022 «WAY TO SUCCESS» IN METROLOGY AND MEASURING MEANS IN THE DIRECTION «CONTROL IN TECHNICAL SYSTEMS»

T.G. Sukhonosova

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation

t.suhonosova@magtu.ru

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 2022 «Way to Success» was held in the direction «Control in technical systems (metrology and measuring means)». More than 160 students from different regions of Russia participated in the Universiade.

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

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

T.G. Sukhonosova 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. (In Russian)