

# АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПРОИЗВОДСТВА

№1(29) 2024

# АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПРОИЗВОДСТВА

№1 (29) июнь 2024 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 освещение результатов работ в области управления процессами черной металлургии, а также решения задач энерго- и ресурсосбережения с использованием оптимизирующих алгоритмов управления. Журнал предназначен для специалистов в области автоматизации технологических процессов, для работников производственных предприятий, эксплуатирующих системы 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

#### Главный редактор:

Андреев Сергей Михайлович – доктор технических наук, доцент

#### Ответственный редактор

Самарина Ирина Геннадьевна

## Контакты

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

**Адрес редакции:** 455000, г. Магнитогорск,  
пр. Ленина, 38.  
E-mail: [atp@magtu.ru](mailto:atp@magtu.ru)  
Выходит в свет 06.2024.

## СОДЕРЖАНИЕ

### Математическое моделирование технологических систем и объектов управления

**Д.В. Нужин, С.М. Андреев**

Исследование влияния смежных зон в методической нагревательной печи с использованием CFD технологии ....

3

**В.Д. Павлов**

Паразитные вибрации в автоматизированных комплексах ..

10

**И.С. Щеголихин, С.М. Андреев**

Математическая модель расписания кранов для графика горячей прокатки непрерывнолитых заготовок на складе слэбов .....

13

**И.П. Попов**

Резонанс сил в мехатронных системах .....

17

**В.Д. Павлов**

Вибратор для автоматизированных комплексов .....

20

**И.П. Попов**

Антирезонанс сил в мехатронных системах .....

23

### Автоматизация технологических процессов

**Е.Ю. Мухина, Д.В. Чмутов**

Система автоматического регулирования давления в шнек прессе при покрытии полимерной оболочкой геофизического кабеля .....

25

**Н.М. Лапин, И.Г. Самарина**

Регулирование толщины полосы на широкополосном стане горячей прокатки .....

29

**К.В. Абрамкин, И.Г. Самарина**

Система автоматического управления температурой самоотпуска арматуры на мелкосортном стане 250 .....

33

### Системы автоматизации и управления

**Т.Г. Суханосова, Т.Э. Абдулин, С.А. Емельянов**

Система автоматического регулирования расхода природного газа по фурмам доменной печи .....

38

### Краткие сообщения

**В.С. Новак, Н.А. Антипанов**

Итоги многопрофильной олимпиады школьников «Путь к успеху» секция «Автоматика» 2024 .....

44

**Т.Г. Суханосова, С.А. Емельянов**

Итоги универсиады «Путь к успеху» секции «Метрология и средства измерения» 2024 по направлению подготовки 27.03.04 «Управление в технических системах» .....

46

## CONTENTS

### Mathematic and simulation of control systems and objects

**D.V. Nuzhin, S.M. Andreev**

Investigation of The Influence of Adjacent Zones in a Methodical Heating Furnace Using CFD Technology

3

**V.D. Pavlov**

Parasitic vibrations in automated complexes

10

**I.S. Shchegolikhin, S.M. Andreev**

Mathematical Model of Crane Scheduling for the Schedule of Hot Rolling of Continuous Cast Billets in the Slab Warehouse

13

**I.P. Popov**

Resonance of Forces in Mechatronic Systems

17

**V.D. Pavlov**

Vibrator for Automated Complexes

20

**I.P. Popov**

Antiresonance of Forces in Mechatronic Systems

23

### Process Automation

**E.YU. Mukhina, D.V. Chmutov**

Automatic Pressure Control System in The Screw Press When Coating the Geophysical Cable With a Polymer Shell

25

**N.M. Lapin, I.G. Samarina**

Thickness Control System of The Strip in the 2000 Wide Hot Strip Mill

29

**K.V. Abramkin, I.G. Samarina**

Automatic temperature control system for the self-tempering of reinforcement in the small-section rolling mill 250

33

### Control System

**T.G. Sukhonosova, T.E. Abdulin, S.A. Emelyanov**

System of Automatic Control of Natural Gas Flow in Blast Furnace Tuyeres

38

### Summary statement

**V.S. Novak, N.A. Antipanov**

Results of The Multidisciplinary Schoolchildren's Olympiad «Way To Success» Section «Automatics» 2024

44

**T.G. Sukhonosova, S.A. Emelyanov**

Results of The Universiade «Way To Success» in Metrology And Measuring Means in The Direction «Management In Technical Systems» 2024

46

# ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ

## Оформление

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

**Статью следует набирать в шаблоне**, представленном на информационной станции портала ФГБОУ ВО "МГТУ" [www.mgtu.ru](http://www.mgtu.ru) (раздел "Автоматизированные технологии и производства").

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

**При оформлении статьи рекомендуется придерживаться следующих правил:**

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

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

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

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

## Пример оформления

УДК 681.5.015.32

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

Б.Н. Парсункин<sup>1</sup>, Т.Г. Сухоносова<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>tgobuhova@gmail.com

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

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

#### Введение

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

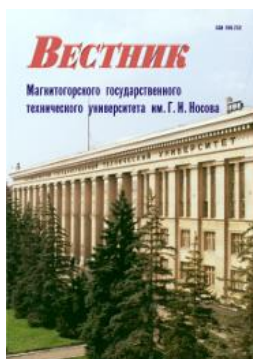
Например, кривые разгона по температуре поверхности нагреваемой заготовки в первой сварочной зоне методической печи №1 стана 2500 ОАО «ММК» (до реконструкции) при различных величинах расхода природного газа во второй сварочной зоне представлены на рис. 1. [2]. Динамические параметры, полученные при обработке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

## Предоставление материалов

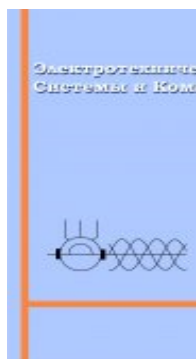
Для опубликования статьи в журнале необходимо представить в электронном виде по e-mail: [atp@mgtu.ru](mailto:atp@mgtu.ru) текст статьи, сведения об авторах и экспертное заключение о возможности опубликования.

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

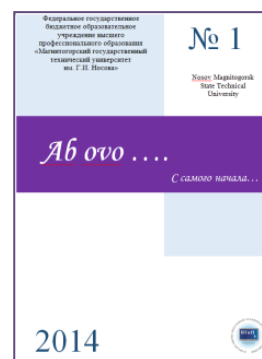
## Другие рекомендуемые периодические издания



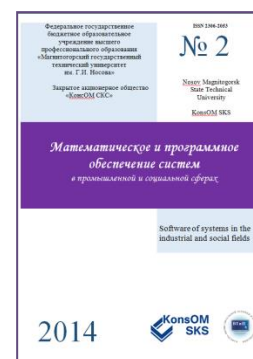
Вестник магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова



Электротехнические системы и комплексы



Журнал молодых исследователей: магистров и аспирантов



Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах

УДК 621.771.23

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СМЕЖНЫХ ЗОН В МЕТОДИЧЕСКОЙ НАГРЕВАТЕЛЬНОЙ ПЕЧИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ CFD ТЕХНОЛОГИИ

Д.В. Нужин, С.М. Андреев

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

**Аннотация:** Для исследования влияния топливных нагрузок смежных зон на температуру в исследуемой зоне была разработана математическая модель проходной нагревательной печи повторного нагрева заготовок. Разработка модели и анализ ее работы был произведен с помощью программного пакета ANSYS. Построение геометрии печи и горелочных устройств производился в формате 3D с помощью ПО Autocad. Моделирование движение отходящих газов выполнено с использованием модели турбулентности k-Epsilon. Горение в печи задано для газовой смеси «метан – воздух» с помощью модели распада вихрей EDM. Для корректного описания движения отходящих газов в печи в модель добавлена расстановка заготовок в печи. В качестве граничного условия на поверхности слэбов вводится тепловой поток учитывающий конвективный теплообмен и излучение с окружающими газами в печи. Разработанная модель перед использованием была проверена на соответствие экспериментальным данным. С помощью разработанной модели была исследовано влияние топливных нагрузок печи на температуру на примере третьей зоны. Результат анализа показал, что существует зависимость изменения температур от объема топлива, поданного в смежные зоны печи.

**Ключевые слова:** Нагревательная печь, математическое моделирование, горение топлива, CFD – моделирование, турбулентность отходящих газов, 3D моделирование, влияние смежных зон, граничные условия, радиактивный и конвективный теплообмен.

### ВВЕДЕНИЕ

Нагревательные печи являются основным звеном участвующим в технологическом процессе получения готовой продукции в прокатном производстве. Важным показателем работы нагревательной печи помимо производительности является удельный расход топлива и потери металла в угар, который при нагреве заготовок составляет 1,0-1,5% [1].

Основным мероприятием по снижению топливных затрат является усовершенствование существующих средств автоматизация в части нахождения и внедрения оптимальных топливосберегающих режимов нагрева заготовок. Внедрение современных систем автоматизации позволяет сократить затраты до 15% [2].

В ходе поиска любых мероприятий по усовершенствованию нагревательных печей исследователи сталкиваются с проблемой проведения эксперимента на реальных объектах. Это связано в первую очередь со сложностью, а порой невозможностью вмешиваться в технологический процесс нагрева по причине возможного нарушения технологии нагрева ведущего к выдаче бракованной продукции или возникновению дорогостоящих простоев.

Современным направлением в исследовании является применение математических моделей, разработанных на основе коммерческих продуктов, включающих в себя системы сложных дифференциальных уравнений наиболее близко описывающих реальный объект.

Изучению и модернизации нагревательных печей с помощью технологии SFD моделирования посвящено множество работ.

В работе [3] произведено исследование работы печи нагрева заготовок при различных расположениях горелок. Для пересчета подогрева воздуха для горения была использована пользовательская функция UDF.

Автор работы [4] предложил изучить зависимость изменение теплового излучения от изменения положения нагревательных труб в печи и изменения степени черноты стен.

Гибридная схема была применена в работе [5]. Излучение тепла выполнено зональным методом. Перенос тепла между зонами задано статистическим уравнением, описывающим зависимость массового теплообмена между зонами от расхода топлива поданного в печь. Коэффициент зависимости рассчитывается с использованием модели турбулентности k-Epsilon.

Влияние геометрии печи на турбулентность отходящих газов и степень нагрева заготовок было оценено автором [6].

Моделирование и выбор наиболее оптимальных топливных нагрузок для шести сценариев распределения массового расхода был выполнен в работе [7].

Модель кольцевой печи реализовали авторы работы [8]. Был произведен анализ и выбор оптимальной модели горения между моделями SFM, FGM, EDM и EDC. Модель SFM показала себя с лучшей стороны обеспечив необходимую точность расчета при минимальных временных ресурсах ЭВМ.

Для уменьшения времени расчета SFD моделирования печи в работе [9] предложена реализация движения заготовок с помощью высоковязкой жидкости.

Повышение КПД печи было получено путем применения кислородных горелок [10].

Влияние коэффициента излучения заготовки и печи на термическое поведение сляба в проходной печи повторно нагрева было изучено авторами статьи [11].

Метод Монте-Карло был применен в работе [12] при прогнозировании влияния пространства между нагреваемых заготовок на производительность печи с шагающими балками.

Анализируя вышеописанные работы, стоит заметить, что в направлении исследования печей с использованием инструментов SFD моделирования отсутствует описание изучения влияния зон между собой, хотя одной из основных особенностей работы проходной печи является противоточное движение нагреваемого металла и продуктов сгорания топлива. Такая схема движения газов и металла позволяет полнее использовать тепло дымовых газов, так как тепло от сгорания газа в горелках перемещается вдоль всей печи от крайних к начальным зонам.

В текущей работе предлагается произвести исследование влияния подачи топливных нагрузок в зоны на температурное распределение в текущих и смежных зон печи с использование коммерческого пакета, позволяющего выполнить SFD моделирование. В последующих работах полученные результаты будут использованы для процедуры нахождения оптимальных топливных нагрузок.

Поставленная вышеописанная задача в статье будет состоять из трех последовательных шагов:

- 1) Разработка математической модели нагревательной печи в части исследования внешнего теплообмена печи с помощью программного продукта Ansys;
- 2) Проверка расчетных данных с экспериментальными для возможности использования модели в исследовательских целях.
- 3) Изучение и построение зависимости изменения температуры в выбранной зоны от топливных нагрузок, поданных в текущую и смежные зоны.

#### ОПИСАНИЕ ПЕЧИ

Объектом исследования рассматривается проходная нагревательная печь с двухсторонним нагревом, торцевым посадом и выдачей заготовки. Габариты печи 50,3x12,7x5,5 м. Упрощенная схема печи приведена на рис.1

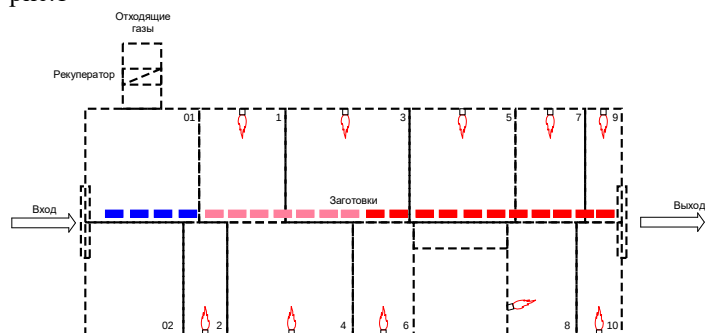


Рис.1 Схема проходной печи стана 2000 ПАО «ММК»

Печь состоит из 10-и отапливаемых зон, из которых с 1 по 8-ю зоны являются сварочными, в которых происходит основной нагрев за счет сжигания топлива. На выходе печи зоны 9 и 10 являются томильными в которых происходит выравнивание температуры по сечению заготовок. На входе в печь расположены верхняя и нижняя методические зоны передающие тепло металлу за счет отходящих газов. Технические характеристики горелок отапливаемых зон приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Технические характеристики горелок отапливаемых зон

| Зоны печи | Тип горелок    | Количество горелок | Производительность по газу, м <sup>3</sup> /ч |          | Тепловая мощность зоны, МВт (Гкал/ч) |
|-----------|----------------|--------------------|-----------------------------------------------|----------|--------------------------------------|
|           |                |                    | Одной горелки                                 | Зоны     |                                      |
| 1         | ГР350<br>ГР750 | 16<br>24           | 39,5<br>88,0                                  | 2744,000 | 25,1(21,6)                           |
| 2         | ДВБ РФ275/36,5 | 6,0                | 540,0                                         | 3240,000 | 29,8(25,6)                           |
| 3         | ГР750          | 56,0               | 88,0                                          | 4928     | 45,2(38,9)                           |
| 4         | ДВБ РФ275/36,5 | 12,0               | 540,0                                         | 6480     | 59,4(51,1)                           |
| 5         | ГР350<br>ГР750 | 8<br>32            | 39,5<br>88,0                                  | 3132     | 28,7(24,7)                           |
| 6         | ДВБ РФ275/38   | 8,0                | 590,0                                         | 4720     | 43,3(37,2)                           |
| 7         | ГР350          | 32,0               | 39,5                                          | 1264     | 11,6(10,0)                           |
| 8         | ДВБ КФ200/22   | 12,0               | 219,0                                         | 2628     | 24,1(20,7)                           |
| 9         | ГР350          | 8,0                | 39,5                                          | 316      | 2,9(2,5)                             |
| 10        | ДВБ КФ200/22   | 2,0                | 219,0                                         | 438      | 4,1(3,5)                             |
| Всего     |                | 216                |                                               |          | 274,2<br>(235,8)                     |

В качестве топлива используется природный газ с объемной температурой сгорания от 7950 до 8100 ккал/м<sup>3</sup>. Тип горелок: сводные радиационные и дутьевые труба в трубе. Максимальный расход на печь: 30000 м<sup>3</sup>/ч, воздуха: 283330 м<sup>3</sup>/ч. Максимальная производительность печи, при длине сляба 12 м - до 465 т/ч. Перемещение металла в печи осуществляется с помощью системы неподвижных и подвижных шагающих балок. Время нагрева заготовок составляет от 170 до 240 минут в зависимости от сортамента и начальной температуры посадки.

#### МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

Рассматриваемая математическая модель в рамках исследуемой задачи включает в себя описание турбулентного движения отходящих газов в рабочем пространстве печи, реакция горения топлива, уравнение теплового баланса и задания граничных условий теплового потока на поверхности заготовок. Внутренний теплообмен и движение заготовок в данной статье не рассматривается.

Движение дымовых газов внутри печи принимает турбулентный характер движения. Система уравнения, описывающая движения отходящих газов построена на основе уравнения Навье-Стокса, включающая в себя закон сохранения массы, импульса, концентрации и энергии нестационарного пространственного течения. Для описания турбулентности используем стандартную модель k-epsilon [13]:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \\ + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + G_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \end{cases} \quad (1)$$

Турбулентная вихревая вязкость вычисляется по формуле:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2)$$

Константы замыкания для стандартной  $k - \varepsilon$  модели:  $C_{1\varepsilon}=1.44$ ,  $C_{2\varepsilon}=1.92$ ,  $C_\mu=0.09$ ,  $\sigma_k=1.0$ ,  $\sigma_\varepsilon=1.3$ .

Для описания горения используется модель распада вихрей. Модель распада вихрей (Eddy Dissipation Model, EDM) была разработана для описания турбулентных пламен предварительно перемешанных смесей и диффузионных пламен. Она основана на предположении, что химические реакции очень быстро приводят реагирующую смесь к равновесному состоянию — другими словами, скорость химической реакции намного выше, чем скорость смешения горючего и окислителя [14]. ANSYS FLUENT предлагает модель взаимодействия турбулентности и химического состава, основанную на работе Магнуссена и Хьертагера (так называемая модель вихревого рассеяния) [15]:

$$R_i = M_i \sum_{k=1}^{N_R} \min \left\{ v_{i,k} A \rho \frac{\varepsilon}{k} \min \left( \frac{Y_R}{v_{R,k} M_{i,R}} \right), v_{i,k} A B \rho \frac{\varepsilon}{k} \frac{\sum_P Y_P}{\sum_j v_{j,k} M_j} \right\} \quad (3)$$

где  $Y_P$  - массовая доля любого вида продукта (P),  $Y_R$  - массовая доля конкретного реагента (R),  $A$  - эмпирическая константа (равная 4),  $B$  - эмпирическая константа (равная 0,5),  $\rho$  - плотность  $i$  частиц. Скорость химической реакции определяется шкалой времени перемешивания в больших вихрях  $k/\varepsilon$ , как в модели Сполдинга с вихревым распадом. Процесс химической реакции протекает при турбулентном течении ( $k/\varepsilon < 0$ ).

Основным носителем тепловой энергии являются газы от которых тепло передается кладке и металлу излучением и конвекцией. На поверхностях стен печи и нагреваемых заготовок теплообмен задан граничным условием III рода с учетом конвекции и излучения. Теплообмен описывается следующим выражением [16]:

$$Q = \sigma_B F_{\text{пов}} \left[ \left( \frac{T_z}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{\text{пов}}}{100} \right)^4 \right] + \alpha_K F_{\text{пов}} (T_z - T_{\text{пов}}) \quad (4)$$

где  $\alpha_K$  - коэффициент теплоотдачи за счет конвекции;  $\sigma_B$  - видимый коэффициент излучения

$$\sigma_B = 4,96 \cdot \varepsilon_z \cdot \varepsilon_{\text{пов}} \frac{\varphi_K^M (1 - \varepsilon_z) + 1}{\varphi_K^M (1 - \varepsilon_z) [\varepsilon_{\text{пов}} + \varepsilon_z (1 - \varepsilon_{\text{пов}})] + \varepsilon_z}$$

#### ПОСТРОЕНИЕ И ВАЛИДАЦИЯ МОДЕЛИ

Геометрия нагревательной печи разработана с помощью САПР Autocad 2022 с дальнейшим экспортом в модуль Space Claim Ansys. Модель включает в себя объем печи со стенками, горелочные устройства с отдельной подачей топлива и воздуха, выход отходящих газов, зоны

моделирующие слябы. На рис.2 представлена 3D модель, подготовленная для построения расчетной сетки.

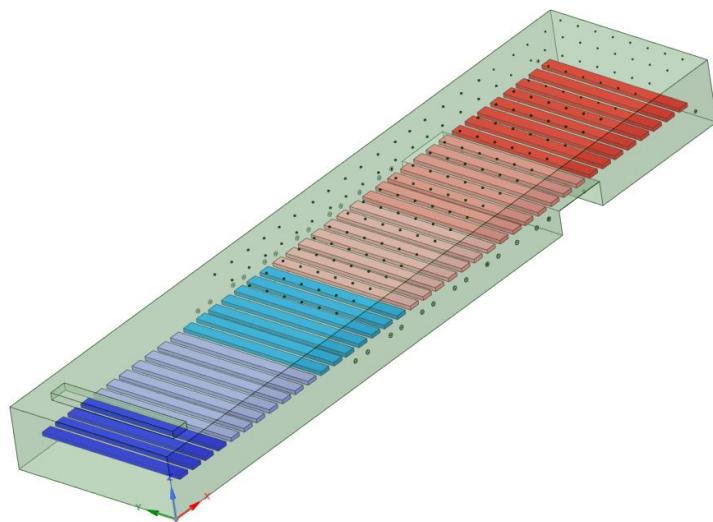


Рис.2. Объемная модель нагревательной печи разработанная в модуле Space Claim

Все графические элементы модели объединены в группы, для последующего задания им трех основных свойств: типа стена (wall), входные зоны (inlet), выходные зоны (outlet) и их численного значения.

Сформированная сетка состоит из 2,155,540 граничных узлов и 705,859 граничных граней. Минимальный и максимальный размер ячейки равен 4,8мм и 500 мм соответственно.

Моделирование горелок выполнено в упрощенном виде состоящей из двух поверхностей типа (inlet) для подачи воздуха и газа. Входящие поверхности разделены между собой стенкой типа (wall). На рис. 3 приведен расчетная сетка печи.

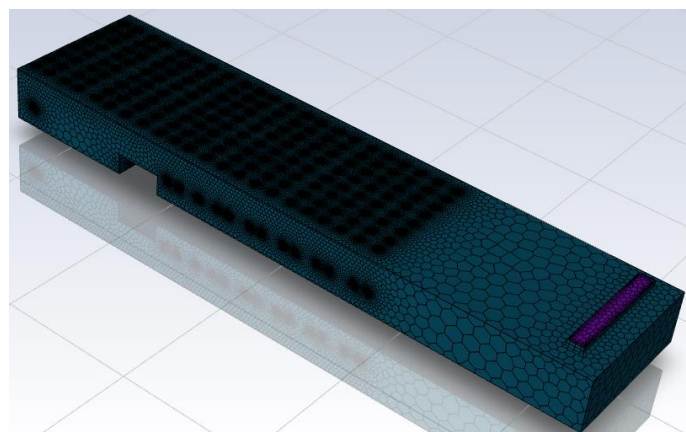


Рис.3 Расчетная сетка модели проходной печи

После формирования расчетной сети производился набор моделей решателя и задания начальных условий.

Обязательным условием при расчете температуры является подключение уравнения энергии. Турбулентность движения газовой среды в зоне печи задается с помощью модели  $k$ -epsilon со стандартной пристеночной функцией.

Для горения топлива используется модель Species Transport. Реакция объемная. Химическое взаимодействие турбулентности принята типа Eddy – Dissipation. Инициализация входных данных (зон) выполняется в соответствии с таблицей 2.

Таблица 2 – Свойства и значения групп элементов модели

| № п.п. | Наименование поверхности | Тип зон           | Параметра параметра |
|--------|--------------------------|-------------------|---------------------|
| 1      | Воздух. Зона №1          | input velocity    | const, м/с          |
| 2      | Воздух. Зона №2          | input velocity    | const, м/с          |
| 3      | Воздух. Зона №3          | input velocity    | const, м/с          |
| 4      | Воздух. Зона №4          | input velocity    | const, м/с          |
| 5      | Воздух. Зона №5          | input velocity    | const, м/с          |
| 6      | Воздух. Зона №6          | input velocity    | const, м/с          |
| 7      | Воздух. Зона №7          | input velocity    | const, м/с          |
| 8      | Воздух. Зона №8          | input velocity    | const, м/с          |
| 9      | Воздух. Зона №9          | input velocity    | const, м/с          |
| 10     | Воздух. Зона №10         | input velocity    | const, м/с          |
| 11     | Газ. Зона №1             | input velocity    | const, м/с          |
| 12     | Газ. Зона №2             | input velocity    | const, м/с          |
| 13     | Газ. Зона №3             | input velocity    | const, м/с          |
| 14     | Газ. Зона №4             | input velocity    | const, м/с          |
| 15     | Газ. Зона №5             | input velocity    | const, м/с          |
| 16     | Газ. Зона №6             | input velocity    | const, м/с          |
| 17     | Газ. Зона №7             | input velocity    | const, м/с          |
| 18     | Газ. Зона №8             | input velocity    | const, м/с          |
| 19     | Газ. Зона №9             | input velocity    | const, м/с          |
| 20     | Газ. Зона №10            | input velocity    | const, м/с          |
| 21     | Стенки печи              | walls (heat flow) | q Вт/м2 (UDF)       |
| 22     | Стенки горелки           | walls (const)     | const, °C           |
| 23     | Поверхность слябов       | walls (heat flow) | q Вт/м2 (UDF)       |

На рис. 4 приведены входные и выходные поверхности расчетной модели печи.

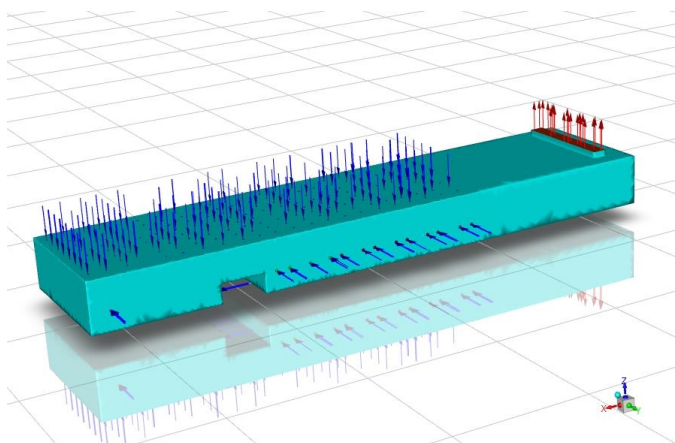


Рис.5 Схема входных и выходных поверхностей модели

Для задания теплового потока в зависимости от температуры греющей среды используется пользовательская функция UDF реализующая изменение теплового потока в зависимости от температуры окружающей среды и поверхности нагреваемого тела – кладки или нагреваемой заготовки. Расчет модели производился в стационарном режиме. На рис. 5 представлены результаты расчета: распределение температуры и скорости по длине печи.

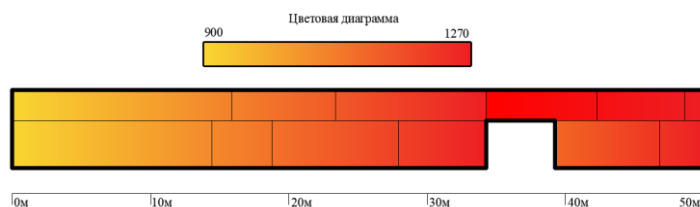


Рис.5. Результаты расчета температурного профиля печи

Для использование разработанной модели в целях исследования произвелось сравнение рассчитанной и экспериментальных данных.

Точки мониторинга температуры печи соответствуют датчикам температуры, установленным на реальной печи (см. рис.6). Для изменения температуры в методической печи установлены термопреобразователи, установленные в кладке печи.

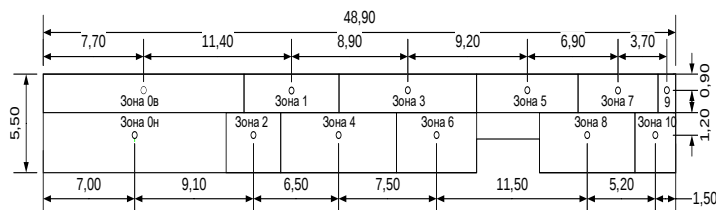


Рис.6. Схема точек мониторинга температуры в зонах печи

Для стационарного режима расчета модели в качестве экспериментальных данных использовался диапазон данных, который содержит устойчивые значения входных и выходных значений температуры.

На рис. 7 приведено сравнение экспериментальных и расчетных данных, полученных с помощью запуска расчета с помощью ПО ANSYS. Входные данные по подаче топлива принимались из карты нагрузки печи для исследуемого промежутка.

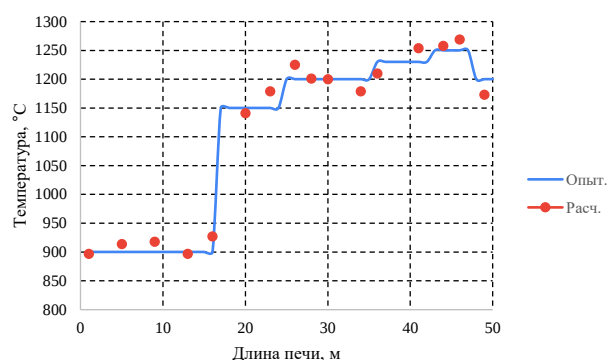


Рис.7 График сравнения расчетных и опытных данных по длине печи

Разработанная математическая модель печи предсказывает режим нагрева заготовок с достаточной вероятностью и может быть использована в исследованиях.

#### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Был проведен анализ влияния изменения температуры в зоне печи от распределения топливных нагрузок в текущей и в смежных зонах с помощью разработанной модели. Для исследования была выбрана третья зона. Влияющими факторами на температуру зоны принимались топ-

ливные нагрузки в 5,7,8 зонах. Влияние 9-ой и 10-ой зоны на исследованный параметр не принимался ввиду нестационарного характера подачи топлива в зоны с кратковременным интервалом, связанным с технологией доведение заготовок до заданного состояния.

Эксперимент производился при изменении объема топлива в диапазоне 30-100% с интервалом 10% каждой зоны при сохранении неизменным значения топливных нагрузок исследуемой зоны. Результаты исследований приведены на рис. 8.

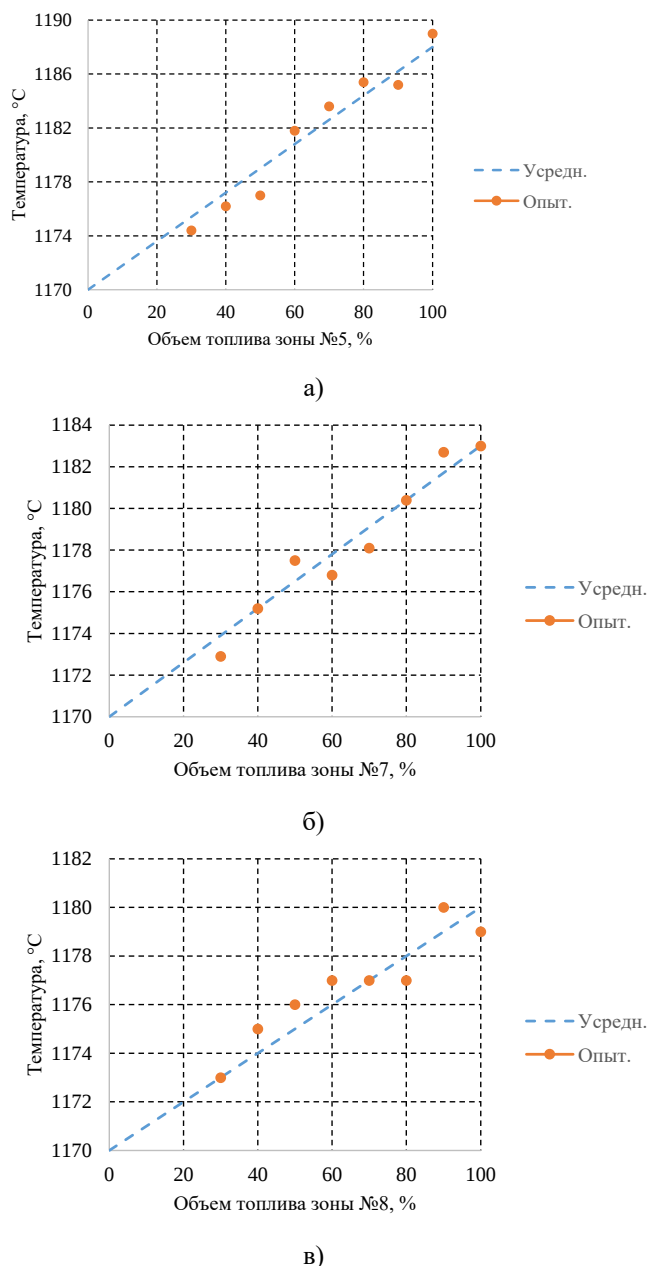


Рис.8 Зависимость изменения температуры 3-ей зоны при изменении объема топлива в смежных зонах: а) 5 зона; б) 7 зона; в) 8 зона.

На графиках рис. 8 приведены опытные данные, полученные с помощью модели печи и прямая, обозначающая усредненное значение рассчитанной температуры.

Результаты опытов показали, что часть тепла полученного при сжигании топлива в зоне передается в смежные

зоны по направлению к входу печи за счет движения отходящих газов. Чем ближе соседняя зона, тем более сильное влияние она оказывает на температуру исследуемой зоны. Соответственно заготовки в текущей зоне нагреваются не только от топлива поданные в текущую зону, но и частично за счет тепла от сгорания в соседней зоне. Полученную зависимость следует учитывать в последующих работах по нахождению оптимальных режимов нагрева заготовок в проходных печах.

Основным недостатком разработанной модели является скорость расчета значений технологического процесса нагрева заготовок в печи. Время одного расчета, содержащего около 400 итераций процедуры схождения при решении уравнения занимает около 5 часов. Для расчета использовалась ЭВМ на базе процессора Intel Core 7 ОЗУ - 32Гб.

Разработанная модель в будущем может быть использована в качестве «учителя» для интеллектуальных систем выполняющих поиск оптимальных режимов нагрева заготовок в режиме реального времени.

#### ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

- 1) Разработана модель нагревательной проходной печи с использованием коммерческого ПО ANSYS Fluent. Модель учитывает процесс горения топлива, турбулентное движение отходящих газов и сложный теплообмен между отходящими газами и поверхностью кладки и нагреваемых заготовок.
- 2) Модель проверена на соответствие экспериментальным данным. Рассчитанные результаты совпадают с экспериментальными данными с допустимой точностью. Модель может быть использована для исследований режимов работы методической печи.
- 3) С помощью модели были исследовано влияние объема топлива, поданного в смежные зоны на температуру греющей среды наблюдаемой зоне.
- 4) Результаты показали, что существует зависимость изменения температуры от объема топлива, поданного в смежные зоны. Чем ближе зона, тем больше смежные зоны оказывают влияние на исследуемую.
- 5) Разработанная модель может быть частью системы управления и использована в качестве «учителя» для систем интеллектуального управления.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Рязанов В.М. Анализ потребления природного газа и теплоиспользования в методических печах прокатного производства // Энергетика теплотехнологий. – 2018 – № 2 – С. 15–22.
2. Шипко А.А. Топливосбережение при нагреве металла в печах машиностроительных предприятий // Литье и металлургия. – 2010 – № 54 – С. 53–58.
3. Alex M. García Effect of the burner position on an austenitizing process in a walking-beam type reheating furnace/ Alex M. García, Andrés F. Colorado, Julián E. Obando, Carlos E. Arrieta, Andrés A. Amell // Applied Thermal Engineering– 2019–№153 –p.633–645.
4. Melanie Grote, Elmar Pohl, Primpuna Habib Saptogino, David Diarra Impact of Solid Body Emissivity on Radiative heat transfer efficiency in furnaces // 11th European Confer-

ence on Industrial Furnaces and Boilers INFUB-11 Energy Procedia 120 (2017) – C. 628-634

5. Yukun Hua Development of a first-principles hybrid model for large-scale reheating furnaces / Yukun Hua, CK Tan, Jonathan Broughton, Paul Alun Roach // Applied Thermal Engineering – 2016 – №173 – p.555–566.

6. Nima Bohlooli Arkhazloo1, Farzad Bazdidi-Tehrani, Morin Jean-Benoit, Mohammad Jahazi A Numerical Thermal Analysis of the Heating Process of Large Size // Materials Science Forum Vol. 941 26-12-2018, – p. 2278-2283.

7. Sang Heon Han Development of a first-principles hybrid model for large-scale reheating furnaces / Sang Heon Han, Daejun Chang, Cheol Huh // Energy – 2011 – №36 – p.1265–1272.

8. M. Landfahrer Development of a first-principles hybrid model for large-scale reheating furnaces / M. Landfahrer, C. Schluckner, R. Prieler, H. Gerhardtter, T. Zmek, J. Klarner, C. Hochenauer // Energy – 2019 – №180 – p.79–89.

9. B. Mayr CFD analysis of a pusher type reheating furnace and the billet heating characteristic / B. Mayr, R. Prieler, M. Demuth, L. Moderer, C. Hochenauer // Applied Thermal Engineering – 2017 – №115 – p.986–994.

10. Bernhard Mayr, Rebe Prieler, Martin Demuth, Luca Moderer, Christoph Hochenauer CFD modelling and performance increase of a pusher type reheating furnace using oxy-fuel burners // 11th European Conference on Industrial Fur-

naces and Boilers INFUB-11 Energy Procedia 120 (2017) – C. 462-468

11. Gyo Woo Lee On the Thermal Behavior of the Slab in a Reheating Furnace with Radiation / Gyo Woo Lee, Man Young Kim // International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering – 2014 – №8(5) – p.922–927.

12. A. Jaklic The influence of the space between the billets on the productivity of a continuous walking-beam furnace / A. Jaklic, T. Kolenko, B. Zupancic // Applied Thermal Engineering – 2005 – №25 – p.783–795.

13. Хамдамов М.М., Эргашев Д.Й. Математическое моделирование процессов в цилиндрической камере сгорания в программном пакете ANSYS FLUENT // Journal of integrated education and research. 2022. – № 1(4) – С.1–13.

14. Хитрый Д. Моделирование процессов горения в ANSYS CFX // САПР и графика. 2006. – № 1 – С.1–6.

15. Milada Kozubkova, Jaroslav Krutil, Marian Bojko, Václav Nevrlý Mathematical modeling of methane combustion // Transactions of the VŠB - Technical university of Ostrava Vol. VII No.1 (2012) – С. 21-26

16. Н.Ю. Тайц Технология нагрева стали. Москва.: Типография Металлургиздат, 1950. –стр. 453.

## INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF ADJACENT ZONES IN A METHODICAL HEATING FURNACE USING CFD TECHNOLOGY

D.V. Nuzhin, S.M. Andreev

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

[Nuzhin83@mail.ru](mailto:Nuzhin83@mail.ru)

**Abstract:** To study the effect of fuel loads on the temperature in the zone, a mathematical model of a pass-through heating furnace for reheating workpieces was developed. The analysis of the model was performed using the ANSYS software package. The geometry of the furnace and burner devices was constructed in 3D using Autocad software. The simulation of the movement of exhaust gases was performed using the k-epsilon turbulence model. The combustion in the furnace is set for the methane–air gas mixture using the EDM vortex decay model. Gorenje In order to correctly describe the movement of exhaust gases in the furnace, the arrangement of blanks in the furnace is added to the model. As a granite condition, a heat flow is introduced on the surface of the slabs, taking into account the radioactive and convective heat exchange with the surrounding gases in the furnace. The developed model was checked for compliance with experimental data before use. Using the developed model, the effect of furnace fuel loads on temperature was studied using the example of the first zone. The result of the analysis showed that there is a dependence of the temperature change on the volume of fuel supplied to the furnace zones.

**Keywords:** Heating furnace, mathematical modeling, gorenje propellant, CFD modeling, turbulence of exhaust gases, 3D modeling, influence of adjacent zones, boundary conditions, radioactive and convective heat exchange.

### REFERENCES

1. Ryazapov V.M. Analysis of natural gas consumption and heat use in methodical furnaces of rolling production [Analiz potrebleniya prirodnogo gaza i teploispol'zovaniya v metodicheskikh pechah prokatnogo proizvodstva] / *Energetika teplotekhnologij* Energy of thermal technologies – 2018 – № 2 – p. 15–22.

2. Shipko A.A. Fuel saving when heating metal in furnaces of machine-building enterprises [Toplivosberezhenie pri nagreve metalla v pechah mashi-nostroitel'nyh predpriyatij] /

*Lit'e i metallurgiya* Casting and metallurgy - 2010 – No. 54 – pp. 53-58.

3. Alex M. García Effect of the burner position on an austenitizing process in a walking-beam type reheating furnace/ Alex M. García, Andrés F. Colorado, Julián E. Obando, Carlos E. Arrieta, Andrés A. Amell // Applied Thermal Engineering – 2019 – №153 – p.633–645.

4. Melanie Grote, Elmar Pohl, Primpuna Habib Saptogino, David Diarra Impact of Solid Body Emissivity on Radiative heat transfer efficiency in furnaces // 11th European Conference on Industrial Furnaces and Boilers INFUB-11 Energy Procedia 120 (2017) – C. 628-634

5. Yukun Hua Development of a first-principles hybrid model for large-scale reheating furnaces / Yukun Hua, CK Tan, Jonathan Broughton, Paul Alun Roach // *Applied Thermal Engineering*–2016–№173 –p.555–566.
6. Nima Bohlooli Arkhazloo1, Farzad Bazdidi-Tehrani, Morin Jean-Benoit, Mohammad Jahazi A Numerical Thermal Analysis of the Heating Process of Large Size // *Materials Science Forum* Vol. 941 26-12-2018, – p. 2278-2283.
7. Sang Heon Han Development of a first-principles hybrid model for large-scale reheating furnaces / Sang Heon Han, Daejun Chang, Cheol Huh // *Energy*–2011–№36 –p.1265–1272.
8. M. Landfahrer Development of a first-principles hybrid model for large-scale reheating furnaces / M. Landfahrer, C. Schluckner, R. Prieler, H. Gerhardter, T. Zmek, J. Klarner, C. Hochenauer // *Energy*–2019–№180 –p.79–89.
9. B. Mayr CFD analysis of a pusher type reheating furnace and the billet heating characteristic / B. Mayr, R. Prieler, M. Demuth, L. Moderer, C. Hochenauer // *Applied Thermal Engineering*–2017–№115 –p.986–994.
10. Bernhard Mayr, Rebe Prieler, Martin Demuth, Luca Moderer, Christoph Hochenauer CFD modelling and performance increase of a pusher type reheating furnace using oxy-fuel burners // 11th European Conference on Industrial Furnaces and Boilers INFUB-11 *Energy Procedia* 120 (2017) – C. 462-468
11. Gyo Woo Lee On the Thermal Behavior of the Slab in a Reheating Furnace with Radiation / Gyo Woo Lee, Man Young Kim // *International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering* –2014–№8(5) –p.922–927.
12. A. Jaklic The influence of the space between the billets on the productivity of a continuous walking-beam furnace / A. Jaklic, T. Kolenko, B. Zupancic // *Applied Thermal Engineering*–2005–№25 –p.783–795.
13. Khamdamov M.M., Ergashev D.Y. Mathematical modeling of processes in a cylindrical combustion chamber in the ANSYS FLUENT software package [Matematicheskoe modelirovanie processov v cilindri-cheskoj kamere sgoraniya v programmnom pakete ANSYS FLUENT] / *Journal of integrated education and research*. 2022. – № 1(4) – p.1–13.
14. Hitryj D Simulation of combustion processes in ANSYS CFX Gorenje [Modelirovanie processov gorenija v ANSYS CFX] / *SAPR i grafika* CAD and graphics. 2006. – № 1 – p.1–6.
15. Milada Kozubkova, Jaroslav Krutil, Marian Bojko, Václav Nevrlý Mathematical modeling of methane combustion // *Transactions of the VŠB - Technical university of Ostrava* Vol. VII No.1 (2012) – C. 21-26
16. Taitis N.Y. *Tekhnologiya nagreva stali* [Steel heating technology] Moscow.: Metallurgizdat, 1950. –453p.

---

Нужин, Д.В. Исследование влияния смежных зон в методической нагревательной печи с использованием CFD технологии / Д.В. Нужин, С.М. Андреев // *Автоматизированные технологии и производства*. 2024. №1(29). С.3-9.

---

D.V. Nuzhin, S.M. Andreev Investigation of The Influence Of Adjacent Zones in a Methodical Heating Furnace Using CFD Technology. *Avtomatizirovannye tekhnologii i proizvodstva* [Automated technologies and production], 2024. no.1(29), pp.3-9. (In Russian).

## ПАРАЗИТНЫЕ ВИБРАЦИИ В АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ КОМПЛЕКСАХ

В.Д. Павлов

Владимирский электромеханический завод, Владимир, Россия

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

**Аннотация.** Целью настоящей работы является представление упругой нагрузки в виде индуктивного сопротивления линейного электромеханического преобразователя и обоснование возможности возникновения свободных гармонических колебаний при подключении к нему конденсатора, играющего роль эквивалентного емкостного сопротивления электрической цепи преобразователя. В  $kC$  колебательной системе могут возникать свободные гармонические колебания. Свободные гармонические колебания могут происходить при взаимодействии величин различной физической природы – упругости и электрической емкости. В традиционных колебательных системах происходит взаимное превращение энергии, обусловленной *движением*, – кинетической энергии и энергии магнитного поля в энергию, обусловленную *положением*, – энергию деформированной пружины и энергию электрического поля. В отличие от них в  $kC$ -системе происходит взаимное превращение энергии, обусловленной *положением*, – потенциальной энергии пружины в энергию, также обусловленную *положением* – в энергию электрического поля конденсатора.

**Ключевые слова:** емкостная масса, инертная емкость, упругая индуктивность и индуктивная упругость.

В составе систем автоматики используются, в частности, линейные электромеханические преобразователи с пружинными возвратными механизмами.

Пружина обладает способностью, как запасать, так и отдавать потенциальную энергию. Если при этом не происходит потерь энергии, то логично предположить, что указанное свойство пружины должно обуславливать наличие некоего реактивного сопротивления преобразователя, которое также характеризуется обменом энергии без ее диссипации.

Актуальной задачей является выявление влияния упругости пружинного механизма преобразователя на реактивное сопротивление его электрической цепи и вытекающей из этого возможности возникновения свободных гармонических колебаний, которые могут иметь отрицательное воздействие на систему. Предпосылкой решения этой задачи является одна из двух систем аналогий между электромагнитными и механическими величинами, в соответствии с которыми упругость связана дуальным соотношением с индуктивностью

$$\frac{1}{k} \Rightarrow L.$$

Однако дуальная связь не является функциональной, поскольку охватываемые ею величины относятся к изолированным друг от друга системам. Поэтому указанное соотношение само по себе не дает оснований рассматривать механическую величину коэффициент упругости в качестве параметра электрических цепей.

Целью настоящей работы является представление упругой нагрузки в виде индуктивного сопротивления линейного электромеханического преобразователя и обоснование возможности возникновения свободных

гармонических колебаний при подключении к нему конденсатора, играющего роль эквивалентного емкостного сопротивления электрической цепи преобразователя.

Упрощенная модель системы представлена на рисунке. Коэффициент упругости пружины  $k$ , магнитная индукция в зазоре  $B$ , между полюсами находятся  $n$  проводников с длиной активной части  $l$ . Емкость конденсатора  $C$ . Активное сопротивление, потери на трение, индуктивность, емкость и масса обмотки не учитываются.

Механическое и электрическое состояния  $kC$  колебательной системы описываются двумя уравнениями в соответствии с законами Гука, Ампера и вторым законом Кирхгофа:

$$kx = Blni, \quad (1)$$

$$Blnd \frac{dx}{dt} + u_c(0) + \frac{1}{C} \int_0^t i dt = 0. \quad (2)$$

Здесь  $x$  – перемещение обмотки,  $Blni$  – сила Ампера,  $Blndx/dt$  – ЭДС электромагнитной индукции. Последнее слагаемое – напряжение на конденсаторе.  $B, l, n$ , – параметры, обуславливающие электромеханическое взаимодействие. Их целесообразно объединить в параметрический коэффициент

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

Пусть начальные условия:

$$u_c(0) = u_0,$$

$$i(0) = 0.$$

Производная (1) с учетом (3) имеет вид:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{y^{0.5}}{k} \frac{di}{dt}.$$

При подстановке в (2) получается выражение

$$\frac{y}{k} \frac{di}{dt} + u_c(0) + \frac{1}{C} \int_0^t i dt = 0.$$

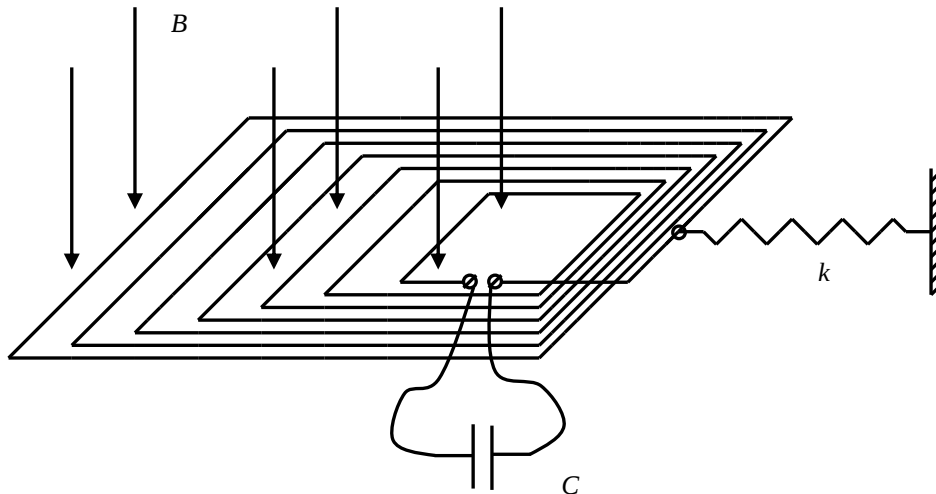


Рис.1. Упруго-емкостная ( $kC$ ) колебательная система

Дифференцирование последнего соотношения дает классическое дифференциальное уравнение свободных гармонических колебаний

$$\frac{d^2 i}{dt^2} + \frac{k}{yC} i = 0.$$

Его решение:

$$i = I_m \sin \omega_0 t,$$

$$I_m = u_0 \sqrt{\frac{kC}{y}} = \frac{u_0}{X_{kC}}.$$

$$X_{kC} = \sqrt{\frac{y}{kC}}$$

– волновое сопротивление,

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{yC}} \quad (4)$$

– собственная частота автономной консервативной  $kC$ -системы.

Таким образом, в рассматриваемой  $kC$  колебательной системе могут возникать свободные гармонические колебания. Свободные гармонические колебания могут происходить при взаимодействии величин различной физической природы – упругости и электрической емкости.

В традиционных колебательных системах происходит взаимное превращение энергии, обусловленной *движением*, – кинетической энергии и энергии магнитного поля в энергию, обусловленную *положением*, – энергию деформированной пружины и энергию электрического поля. В отличие от них в  $kC$ -системе происходит взаимное превращение энергии, обусловленной *положением*, – потенциальной энергии пружины в энергию, также обусловленную *положением* – в энергию электрического поля конденсатора.

Сопоставление выражения (4) с формулами для собственных частот механического маятника

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

и электрического колебательного контура

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

позволяет установить существование искусственных механических и электрических величин [1–3].

Искусственная (емкостная) масса –

$$m_c = yC.$$

Искусственная (инертная) емкость –

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

Искусственная (упругая) индуктивность –

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

Искусственная (индуктивная) упругость –

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

В соответствии с этими выражениями (4) можно представить в виде:

$$\omega_{0kC} = \sqrt{\frac{k}{yC}} = \frac{1}{\sqrt{CL_k}} = \sqrt{\frac{k}{m_c}},$$

т.е. либо как электрический колебательный контур с искусственной индуктивностью, либо как механический маятник с искусственной массой.

Полученные выражения устанавливают функциональные зависимости между электрическими и механическими величинами и могут использоваться при проектировании махатронных систем.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Попов И.П. Спонтанные упруго-индуктивные колебания в технических средствах автоматизации // Автоматизированные технологии и производства. 2019. № 1 (19). С. 18–20.

---

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

3. Попов И.П. Искусственный емкостный маховик с возможностью автоматического регулирования момента

инерции // Автоматизированные технологии и производства. 2020. № 2 (22). С. 29–31.

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

## PARASITIC VIBRATIONS IN AUTOMATED COMPLEXES

V.D. Pavlov

Vladimir Electromechanical Plant, Vladimir, Russia

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

**Abstract.** The purpose of this work is to represent an elastic load in the form of inductive resistance of a linear electromechanical converter and to substantiate the possibility of the occurrence of free harmonic oscillations when a capacitor is connected to it, playing the role of equivalent capacitive reactance of the electrical circuit of the converter. Free harmonic oscillations can occur in a  $kC$  oscillatory system. Free harmonic oscillations can occur through the interaction of quantities of different physical natures - elasticity and electrical capacitance. In traditional oscillatory systems, there is a mutual conversion of energy due to movement - kinetic energy and magnetic field energy into energy due to position - the energy of a deformed spring and the energy of the electric field. In contrast, in the  $kC$ -system there is a mutual conversion of energy due to position - the potential energy of the spring into energy also due to position - into the energy of the electric field of the capacitor

**Keywords:** capacitive mass, inert capacitance, elastic inductance and inductive elasticity.

### REFERENCES

1. Popov I.P. Spontaneous elastic-inductive vibrations in technical means of automation [Spontannyye uprugoinduktivnyye kolebaniya v tekhnicheskikh sredstvakh avtomatizatsii]. *Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva [Automated technologies and production]*, 2019, no. 1 (19), pp. 18–20. (In Russian).

2. Popov I.P. Inert-inductive oscillations in mechatronic systems [nertno-induktivnyye kolebaniya v mekhatronnykh sistemakh]. *Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva [Automated technologies and production]*, 2022, no.1(25), pp.23–25. (In Russian).

3. 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 tekhnologii i proizvodstva [Automated technologies and production]*, 2020, no. 2 (22), pp. 29–31. (In Russian).

4. Pavlov V.D. Controlled artificial elasticity in mechatronic systems [Upravlyayemaya iskusstvennaya uprugost' v mekhatronnykh sistemakh]. *Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva [Automated technologies and production]*, 2022, no. 1 (25), pp. 20–22. (In Russian).

---

Павлов, В.Д. Паразитные вибрации в автоматизированных комплексах / В.Д. Павлов // Автоматизированные технологии и производства. 2024. №1(29). С.10-12.

V.D. Pavlov Parasitic vibrations in automated complexes. *Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva [Automation of technologies and production]*, 2024, no.1(29), pp.10-12. (In Russian).

# МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСПИСАНИЯ КРАНОВ ДЛЯ ГРАФИКА ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ НЕПРЕРЫВНОЛИТЫХ ЗАГОТОВОК НА СКЛАДЕ СЛЯБОВ

И.С. Щеголихин, С.М. Андреев

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

[Shchegolikhin.i@yandex.ru](mailto:Shchegolikhin.i@yandex.ru)

**Аннотация.** Непрерывнолитые заготовки хранятся на складе слэбов в штабелях до тех пор, пока не будут выбраны в качестве элементов для расписания горячей прокатки. При выборе слэбов для извлечения и прокатки они, в заданной последовательности, извлекаются со склада при помощи мостовых кранов и перемещаются на прокатку. Мостовые краны могут перемещать непрерывнолитые заготовки, находящиеся только на вершине штабеля. Если на складе в одном блоке расположено более одного мостового крана, то между ними должно соблюдаться безопасное расстояние. Авторами предлагается математическая модель для процесса извлечения непрерывнолитых заготовок несколькими кранами для графика горячей прокатки. В математической модели учтены ограничения, присущие рассматриваемому процессу, такие как: безопасное расстояние между кранами; временные ограничения выполнения крановых операций; порядок извлечения слэбов со склада; и др. Предложенная математическая модель может использоваться для разработки цифрового двойника склада слэбов, т.к. рассматривает процесс извлечения непрерывнолитых заготовок в пространственно-временной зависимости.

**Ключевые слова:** складирование, слэб, непрерывнолитая заготовка, математическая модель

## ВВЕДЕНИЕ

Непрерывнолитые заготовки поступают на склад после процесса непрерывной разливки. Они помещаются при помощи мостовых кранов в штабеля. В соответствии с графиком горячей прокатки [6] определяется последовательность извлечения слэбов со склада для отправки на прокатку [1]. Для заданной последовательности извлечения заготовок необходимо составить расписание кранов: назначить кранам извлекаемые слэбы и определить время начала операций. В соответствии с этим расписанием мостовые краны извлекают слэбы в штабеля и отправляют их на горячую прокатку или же перекадывают из одного штабеля в другой.

При составлении расписания кранов для графика горячей прокатки возникают ограничения, такие как грузоподъемность крана, безопасное расстояние между кранами (если на складе их несколько), временные ограничения на производимые операции и т. д.

Исследования, так или иначе посвященные математическому моделированию расписанию кранов, во многом ограничены тем фактом, что рассматривают склад, на котором работают краны, как совокупность неделимых штабелей [2-4]. Это, в свою очередь, приводит к тому, что создание цифрового двойника, приближенного к складу слэбов, на основе таких моделей практически невозможно. Это обусловлено тем, что в таких моделях невозможно точно смоделировать перемещение кранов по складу, поэтому возникает сложность временной оценки работы кранов [7]. Кроме того, использование таких приближенных моделей не позволяет рассматривать различные стра-

тегии разрешения конфликтных ситуаций между кранами, работающими в одном складском пространстве.

В настоящей статье авторы предлагают математическую модель расписания кранов для графика горячей прокатки, позволяющей на ее основе создать полноценного цифрового двойника склада слэбов для упомянутого процесса.

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Склад слэбов для удобства моделирования приведен к виду, показанному на рис. 1. Зона складирования 96 метров в длину и 27 метров в ширину. Слэбы располагаются в этой зоне в штабелях. При помощи мостовых кранов они должны быть извлечены и перемещены в зону горячей прокатки. Краны могут взять только самый верхний слэб в штабеле. Если требуется извлечь слэб, лежащий не на вершине штабеля, то требуется переложить слэбы, расположенные над ним. Существует две стратегии перекадывания: слэбы перекадываются в другой штабель, а затем, после извлечения целевого, возвращаются в изначальный штабель; слэбы перекадываются в выбранный штабель и остаются там [5]. Предлагаемая математическая модель применима к обоим стратегиям.

На складе расположены два мостовых крана, способных перемещаться по всей зоне складирования. Операции их влечения и перекадывания слэбов могут распределяться между этими кранами произвольным образом. После завершения всех операций Мостовой кран 1 должен находиться в зоне простоя 1, а Мостовой кран 2 при аналогичных обстоятельствах должен быть в зоне простоя 2. Предполагается, что все краны двигаются поступательно с постоянной скоростью. Время, требуемое для подъема слэба со штабеля и опускание слэба в штабель также для заданного крана постоянно. Ниже приводится математическая модель склада слэбов.

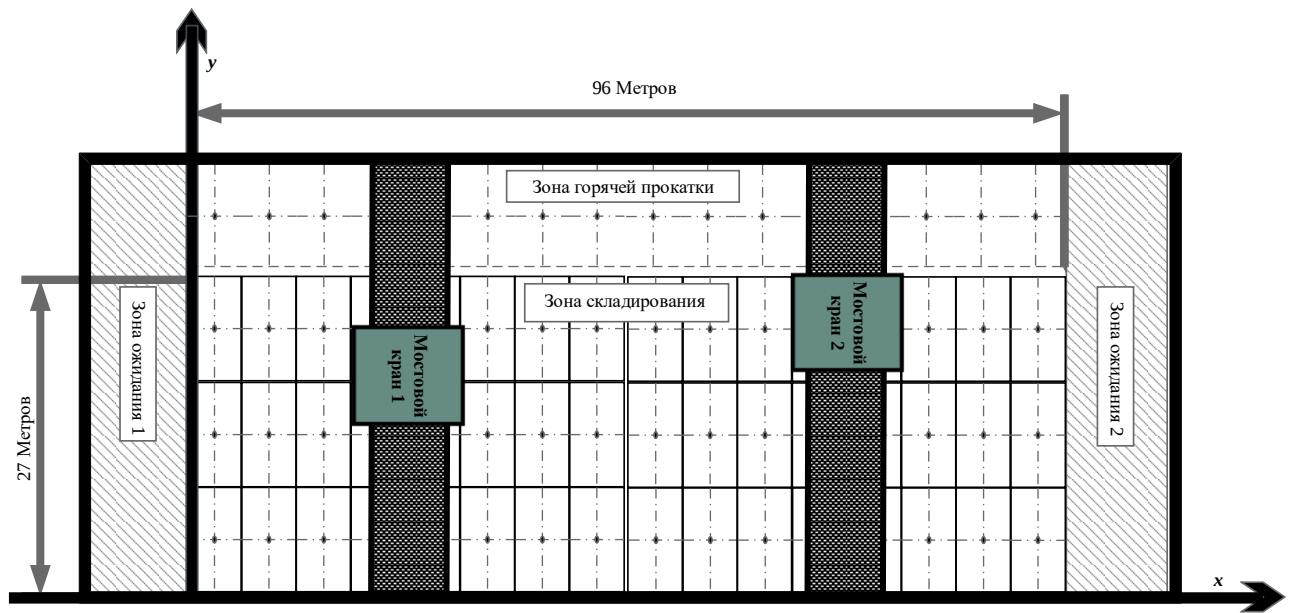


Рис. 1. Схема склада слябов

$W \in \mathbb{R}$  : Ширина зоны складирования

$L \in \mathbb{R}$  : Длина зоны складирования

$w \in \mathbb{R}$  : Ширина элемента разметки

$l \in \mathbb{R}$  : Длина элемента разметки

$h \in \mathbb{N}$  : Максимальная высота штабеля

$N_s \in \mathbb{N}$  : Количество слябов на складе

$S = \{x \in \mathbb{N} \mid x \leq N_s\}$  : Множество индексов слябов .

$C \subset \mathbb{N}$  : Множество индексов мостовых кранов

$d \in \mathbb{R}$  : Безопасное расстояние между кранами

$T_c \in \mathbb{N}$  : Количество временных интервалов

$T = \{x \in \mathbb{N} \mid x \leq T_c\}$  : Множество временных интервалов

Зона складирования длины  $L$  и ширины  $W$  размечена на элементы ширины  $w$  и длины  $l$ . Элемент разметки соответствует штабелю, высота которого есть  $h$ . Слябы на складе, в количестве  $N_s$  представлены в модели подмножеством  $S$  натуральных чисел (далее просто слябы). Мостовые краны представлены их индексами (далее просто краны) и образуют множество  $C$  (предполагается, что мостовой кран 1 имеет индекс 1, в мостовой кран 2 индекс 2). Краны обязаны соблюдать безопасное расстояние  $d$  (в метрах). Время дискретно и разделено на  $T_c$  интервалов равной продолжительности, образующих множество  $T$ .

$$\Psi_1 = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 \mid 0 \leq x \leq W \wedge 0 \leq y \leq L\} \quad (1)$$

$$\Psi_2 = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 \mid 0 \leq x \leq W \wedge L \leq y \leq L + l\} \quad (2)$$

$$\Phi_{c_1} = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 \mid -d - 1 \leq x \leq 0 \wedge 0 \leq y \leq L + l\} \quad (3)$$

$$\Phi_{c_2} = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 \mid W \leq x \leq W + d + 1 \wedge 0 \leq y \leq L + l\} \quad (4)$$

$$\Psi = \Psi_1 \cup \Psi_2 \cup \Phi_{c_1} \cup \Phi_{c_2} \quad (5)$$

$$P = \left\{ \left( il - \frac{l}{2}, jw - \frac{w}{2} \right) \in \Psi_1 \mid i, j \in \mathbb{N} \wedge il - \frac{l}{2} \leq L \wedge \right. \\ \left. \wedge il - \frac{l}{2} \leq L \wedge jw - \frac{w}{2} \leq W \right\} \quad (6)$$

$$P_k = \left\{ \left( il - \frac{l}{2}, jw - \frac{w}{2} \right) \in \Psi_2 \mid i, j \in \mathbb{N} \wedge il - \frac{l}{2} \leq L \wedge \right. \\ \left. \wedge W \leq jw - \frac{w}{2} \leq W + w \right\} \quad (7)$$

$$o = \{o_1, o_2, o_3, o_4\} \quad (8)$$

$$O(c) = \left\{ (s_1, p_1, p'_1, o_{j_1}, t_1, 1), \dots, (s_{n(c)}, p_{n(c)}, p'_{n(c)}, \right. \\ \left. o_{j_{n(c)}}, t_{n(c)}, n(c)) \right\}, \quad (9)$$

$$c \in C, s_i \in S \cup \{-1\}, p_i, p'_i \in P \cup P_k, o_{j_i} \in o, t \in T, \\ i = \overline{1 \dots n(c)}$$

Зона складирования представляется подмножеством (1) плоскости действительных чисел. Зона горячей прокатки есть множество (2). Зона ожидания первого и второго мостовых кранов есть (3) и (4) соответственно. Мостовые краны могут находиться (в рамках модели) в пределах множества (5). Координаты центров элементов разметки (далее штабелей) представлены множеством (6). Координаты элементов разметки горячей прокатки образуют множество (7). Предполагается, что слябы, помещенные на место из (7), больше не числятся на складе. Также предполагается, что сляб можно положить в любое время в любой элемент разметки из множества (7). Операции, которые могут совершать краны, представлены множеством (8), где:  $o_1$  – перемещение краном штабеля с одного элемента разметки на другой (может быть элемент разметки в зоне горячей прокатки);  $o_2$  – операция перемещения без сляба к месту назначения;  $o_3$  – операция подъема сляба;  $o_4$  – операция опускания сляба. Расписание для крана  $c$  задается множеством кортежей (9). Первый элемент кортежа представляет собой сляб, над которым производится операция (для операций  $o_2$  этот элемент равен -1). Второй элемент кортежа представляет начальное положение крана в момент начала выполнения операции. Третий элемент кортежа является местом назначения крана (при операциях  $o_3$  и  $o_4$  второй и третий элементы совпадают). Четвертый элемент кортежа представляет собой

операцию, выполняемую краном. Пятый элемент кортежа есть временной интервал, начиная с которого начинается выполнение операции (в этот момент кран находится в позиции, указанной во втором элементе кортежа). Шестой элемент кортежа является порядковым номером операции (все операции выполняются строго по возрастанию порядковых номеров).

$$n: \mathbf{C} \rightarrow \mathbb{N} \quad (10)$$

$$V: \mathbf{C} \rightarrow \mathbb{R} \quad (11)$$

$$v: \mathbf{C} \times \mathbf{O} \rightarrow \mathbb{R} \quad (12)$$

$$\mu_s: \mathbf{S} \times \mathbf{T} \leftrightarrow \mathbb{R}^2 \quad (13)$$

$$\mu_c: \mathbf{C} \times \mathbf{T} \leftrightarrow \mathbb{R}^2 \quad (14)$$

$$\mu'_c: \mathbf{C} \times \mathbf{T} \leftrightarrow \mathbb{R} \quad (15)$$

$$\mathbf{S}'(\mathbf{t}) = \{s \in \mathbf{S} \mid \mu_s(s, t) \notin \mathbf{P}_k\}, t \in \mathbf{T} \quad (16)$$

$$\mu'_s: \mathbf{S}'(\mathbf{t}) \times \mathbf{T}, t \in \mathbf{T} \quad (17)$$

$$\mathbf{U}(s, \mathbf{t}) = \{s' \in \mathbf{S}'(\mathbf{t}) \mid \mu'_s(s, t) < \mu'_s(s', t) \wedge \wedge \mu_s(s, t) = \mu_s(s', t)\} \quad (18)$$

Функция (10) ставит в соответствие крану количество порученных ему операций. Функция (11) задает скорость крана (метров во временной интервал). Функция (12) ставит в соответствие крану количество временных интервалов, необходимых для подъема или опускания сляба (предполагается, что операции  $o_3$  и  $o_4$  выполняются за одно и тоже время). Функция (13) возвращает положение центра сляба в заданный момент времени (можно видеть, что положение сляба определяется его координатами его центром). Функция (14) возвращает положение центра башни крана в заданный момент времени (положение крана задается, как видно, координатами центра его башни). (15) есть проекция значения на ось  $x$  положения крана в заданный временной интервал. Функция (16) для заданного временного интервала возвращает множество слябов, уложенных в штабеля (т.е. те, которые с начала моделирования не были перенесены кранами на горячую прокатку к заданному временному интервалу). Функция (17) возвращает уровень сляба (который должен находится в штабеле) в заданный временной интервал (уровни нумеруются снизу-вверх от 1 до  $h$ ). Функция (18) возвращает множество слябов, расположенных в том же штабеле, что и заданный, но выше него, в заданный временной интервал.

Далее, для формализации ограничений, присущих рассматриваемому процессу используются скобки Айверсона.

$$\sum_{c \in \mathbf{C}} \sum_{i \in \mathbf{O}(c)} ([i_4 = o_3] \mid [\mathbf{U}(i, i_5) \neq 0]) = \sum_{c \in \mathbf{C}} n(c) \quad (19)$$

$$\sum_{c \in \mathbf{C}} \sum_{i \in \mathbf{O}(c)} [\mu_s(i, i_5) \in \mathbf{P}_k] = 0 \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \sum_{c \in \mathbf{C}} \sum_{i \in \mathbf{O}(c)} [i_4 = o_3] &= \sum_{c \in \mathbf{C}} \sum_{i \in \mathbf{O}(c)} [i_4 = o_4] = \sum_{c \in \mathbf{C}} \sum_{i \in \mathbf{O}(c)} [i_4 = o_1] = \\ &= \sum_{c \in \mathbf{C}} \sum_{i \in \mathbf{O}(c)} [i_4 = o_2] \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \sum_{c \in \mathbf{C}} \sum_{i \in \mathbf{O}(c)} \sum_{j \in \mathbf{O}(c)} ([j_6 = i_6 + 1] [j_2 = i_3]) &= \\ &= \sum_{c \in \mathbf{C}} \sum_{i \in \mathbf{O}(c)} \sum_{j \in \mathbf{O}(c)} [j_6 = i_6 + 1] \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} \sum_{c \in \mathbf{C}} \sum_{i \in \mathbf{O}(c)} \left( [i_4 = o_1] \left[ \sum_{i_5 \leq t \leq i_5 + \left\lceil \frac{i_3 - i_2}{V(c)} \right\rceil} ([\mu_s(s, t) \neq \mu_c(c, t)]) = 0 \right] \right) &= \\ &= \sum_{c \in \mathbf{C}} \sum_{i \in \mathbf{O}(c)} [i_4 = o_1] \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} \sum_{c \in \mathbf{C}} \sum_{i \in \mathbf{O}(c)} \sum_{j \in \mathbf{O}(c)} [i_4 < j_4] \left[ i_5 + \left\lceil \frac{i_3 - i_2}{V(c)} \right\rceil + v(c, i_4) < j_5 \right] &= \\ &= \sum_{c \in \mathbf{C}} \sum_{i \in \mathbf{O}(c)} \sum_{j \in \mathbf{O}(c)} [i_4 < j_4] \end{aligned} \quad (24)$$

$$\sum_{c \in \mathbf{C}} \sum_{i \in \mathbf{O}(c)} \sum_{c' \in \mathbf{C}} \sum_{j \in \mathbf{O}(c')} [i_1 = j_1 \wedge i_5 = j_5] = 0 \quad (25)$$

$$\sum_{c_1 \in \mathbf{C}} \sum_{c_2 \in \mathbf{C}} \sum_{t \in \mathbf{T}} [|\mu'_c(c_1, t) - \mu'_c(c_2, t)| < d] = 0 \quad (26)$$

$$\sum_{i \in \mathbf{O}(1)} \left[ i_6 = n(1) \wedge i_3 = \left( -\frac{d+1}{2}, \frac{L}{2} \right) \wedge i_4 = o_2 \right] = 0 \quad (27)$$

$$\sum_{i \in \mathbf{O}(2)} \left[ i_6 = n(1) \wedge i_3 = \left( W + \frac{d+1}{2}, \frac{L}{2} \right) \wedge i_4 = o_2 \right] = 0 \quad (28)$$

Ограничение (19) означает, что кран может поднимать только сляб, который расположен на вершине штабеля (в момент времени начала выполнения операции подъема сляба). (20) означает, что слябы, находящиеся в зоне горячей прокатки, не подлежат перемещению кранами. (21) требует, чтобы количество операций подъема сляба были равны количеству операций опускания сляба и количеству перемещений крана без слябов, а также количеству перемещения сляба с места на место. Ограничение (22) означает, что конечное положение крана при предыдущей операцией является начальным положением для крана на текущей операции. (23) требует, чтобы при перемещении краном сляба их координаты совпадали. (24) накладывает ограничение на последовательность времен выполнения операций. Следствием этого ограничения является то, что кран в заданный момент времени может выполнять строго одну операцию. (25) требует, чтобы любой момент времени ни один сляб не обрабатывался сразу двумя кранами. (26) означает, что в любой момент времени краны должны находиться друг от друга на безопасном расстоянии  $d$ . (27) требует, чтобы последней операцией крана 1 была операция перемещения в зону ожидания. (28) требует, чтобы последней операцией крана 2 была операция перемещения в зону ожидания.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана математическая модель расписания кранов для графика горячей прокатки. В математической модели учитываются ограничения свойственные именно рассмотренному процессу выполнения операций мостовыми кранами склада слябов. Приведенная модель учитывает расстояния между непрерывнолитыми заготовками, уложенными в штабеля, а также скорости перемещения и выполнения операций мостовыми кранами.

На основе предложенной математической модели возможно создать цифрового двойника склада слябов для имитации работы кранов при выполнении ими операций в соответствии с расписанием для графика горячей прокатки.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Щеголихин, И. С. Генетический алгоритм для решения задачи составления расписания кранов на складе непрерывно-литых заготовок / И. С. Щеголихин, С. М. Андреев // Автоматизированные технологии и производства. – 2023. – № 2(28). – С. 10-12.
2. Ren H. Modeling and an ILP-based algorithm framework for the slab stack shuffling problem considering crane scheduling/ H Ren, L. Tang // 2010 International Conference on Computing, Control and Industrial Engineering, CCIE 2010. , 2010. С. 3–6.
3. Peng G. Integrated optimization of storage location assignment and crane scheduling in an unmanned slab yard / G. Peng и др. // Comput. Ind. Eng. 2021. Т. 161.

4. Dohn A. Optimising the slab yard planning and crane scheduling problem using a two-stage heuristic / A. Dohn, J. Clausen // Int. J. Prod. Res. 2010. Т. 48. № 15. С. 4585–4608.

5. Bruno G. A unifying framework and a mathematical model for the Slab Stack Shuffling Problem / G. Bruno и др. // Int. J. Ind. Eng. Comput. 2023. Т. 14. № 1. С. 17–32.

6. О реализации энергосберегающих режимов нагрева непрерывно-литых заготовок перед прокаткой / Б. Н. Парсункин, С. М. Андреев, Д. Ю. Жадинский [и др.] // Сталь. – 2005. – № 12. – С. 44-46. – EDN QYJHUX.

7. Парсункин, Б. Н. Прогнозирование продолжительности нагрева непрерывнолитой заготовки в методической печи с шагающими балками / Б. Н. Парсункин, С. М. Андреев // Сталь. – 2003. – № 1. – С. 71-74. – EDN QYJWAX.

## MATHEMATICAL MODEL OF CRANE SCHEDULING FOR THE SCHEDULE OF HOT ROLLING OF CONTINUOUS CAST BILLETS IN THE SLAB WAREHOUSE

I.S. Shchegolikhin, S.M. Andreev

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

**Abstract.** Continuous cast billets are stored in the slab warehouse in stacks until they are selected as elements for the hot rolling schedule. When slabs are selected for retrieval and rolling, they are retrieved from the slab yard in a predetermined sequence by bridge cranes and moved to the rolling mill. The bridge cranes can move continuously cast billets that are only at the top of the stack. If more than one bridge crane is located in the warehouse in one block, a safety distance must be maintained between them. The authors proposed a mathematical model for the process of retrieving continuous cast billets by multiple cranes for a hot rolling schedule. The mathematical model includes constraints specific to the process under consideration, such as: safe distance between cranes; time constraints for performing crane operations; order of slab retrieval from the warehouse; etc. The proposed mathematical model can be used to develop a digital twin of the slab warehouse, as it considers the process of continuous cast billets extraction in space-time dependence.

**Keywords:** storage, slab, continuous cast billet, mathematical model

#### REFERENCES

1. Shchegolikhin I. S., Andreev S. M. Geneticheskii algoritm dlia resheniia zadachi sostavleniia raspisaniia kranov na sklade neprervyno-litykh zagotovok [Genetic algorithm for solving the problem of crane scheduling in a warehouse of continuous cast billets]. *Avtomatizirovannye tekhnologii i proizvodstva* [Automated technology and industries], 2023, no. 2(28), pp. 10-12.
2. Ren H., Tang L. Modeling and an ILP-based algorithm framework for the slab stack shuffling problem considering crane scheduling, 2010 International Conference on Computing, Control and Industrial Engineering, CCIE 2010., 2010, pp. 3–6.
3. Peng G., Wu Y., Zhang C., Shen W. Integrated optimization of storage location assignment and crane

scheduling in an unmanned slab yard, *Comput. Ind. Eng.* 2021, vol. 161.

4. Dohn A., Clausen J. Optimising the slab yard planning and crane scheduling problem using a two-stage heuristic, *Int. J. Prod. Res.* 2010, vol. 48, no. 15, pp. 4585–4608.

5. Bruno G., Cavola M., Diglio A., Piccolo C. A unifying framework and a mathematical model for the Slab Stack Shuffling Problem, *Int. J. Ind. Eng. Comput.* 2023, vol. 14, no. 1, pp. 17–32.

6. Parsunkin B.N., Andreev S.M., Zhadinskii D.Yu., Partin V.N., Chebotov V.M. Energy-Saving Heating of Continuous-Cast Billet Prior to Rolling, *Steel in Translation*. 2005, vol. 35, no. 12, pp. 45-48.

7. Parsunkin B.N., Andreev S.M. Predicting the Heating Time of Continuous-Cast Billet in a Stepping-Beam Continuous Furnace, *Steel in Translation*. 2003, vol. 33, no. 1, pp. 47-52.

Щеголихин, И.С. Математическая модель расписания кранов для графика горячей прокатки непрерывнолитых заготовок на складе слябов / И.С. Щеголихин, С.М. Андреев // Автоматизированные технологии и производства. 2024. №1(29). С.13-16.

I.S. Shchegolikhin, S.M. Andreev Mathematical Model of Crane Scheduling for the Schedule of Hot Rolling of Continuous Cast Billets in the Slab Warehouse. *Avtomatizirovannye tekhnologii i proizvodstva* [Automation of technologies and production], 2024, no.1(29), pp.13-16. (In Russian).

## РЕЗОНАНС СИЛ В МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМАХ

И.П. Попов

Курганский государственный университет, Курган, Россия

e-mail: uralakademia@kurganstalmost.ru

**Аннотация.** Рассматривается параллельное соединение потребителей механической мощности и источник силы. На том основании, что амплитуда отклонения  $X$  имеет максимум на частоте  $\omega_k$  ( $\omega_k < \omega_0$ ) она ( $\omega_k$ , а не  $\omega_0$ ) считается резонансной частотой. Это было бы сильным решением, если бы  $X$  был единственным значимым кинематическим параметром. Однако не менее значимыми параметрами являются амплитуды скорости  $V$  и ускорения  $A$ . При этом первая имеет максимум на частоте  $\omega_0$ , а вторая – на частоте  $\omega_m$  ( $\omega_m > \omega_0$ ). Таким образом,  $\omega_k$  ничем не лучше, чем  $\omega_0$  и  $\omega_m$ . Единственным аргументом при выборе резонансной частоты остается соображение симметрии, в соответствии с которым резонансная частота –  $\omega_0$ . С другой стороны, можно вести речь о трех резонансных частотах:  $\omega_k$ ,  $\omega_m$  и  $\omega_0$ . На первой имеет место *резонанс упругой силы*, на второй – *резонанс инертной силы*, на третьей – *резонанс резистивной силы*.

**Ключевые слова:** параллельное соединение, источник силы, резонанс упругой силы, резонанс инертной силы, резонанс резистивной силы.

В установившемся режиме при гармонических воздействиях удобно использовать комплексное представление величин [1].

Далее рассматривается параллельное соединение потребителей механической мощности и источник силы.

Комплексная амплитуда скорости равна

$$\dot{\underline{V}} = \frac{\dot{\underline{F}}}{\underline{z}} = \frac{F}{z} e^{-i\varphi} = V e^{-i\varphi},$$

где  $\dot{\underline{F}}$  – комплексная амплитуда,  $\underline{z}$  – механический импеданс (impedance) в комплексном представлении [2]. Комплексная амплитуда инертной силы –

$$\dot{\underline{F}}_m = \underline{x}_m \dot{\underline{V}} = x_m V e^{i(\pi/2-\varphi)} = F_m e^{i(\pi/2-\varphi)}, \quad (1)$$

где  $\underline{x}_m$  – инертный реактанс (reactance) [3].

$$\underline{x}_m = \omega m e^{i\pi/2} = x_m e^{i\pi/2}, \quad (2)$$

Комплексная амплитуда упругой силы –

$$\dot{\underline{F}}_k = \underline{x}_k \dot{\underline{V}} = x_k V e^{-i(\pi/2+\varphi)} = F_k e^{-i(\pi/2+\varphi)}, \quad (3)$$

где  $\underline{x}_k$  – упругий реактанс.

$$\underline{x}_k = \frac{k}{\omega} e^{-i\pi/2} = x_k e^{-i\pi/2}, \quad (4)$$

Комплексная амплитуда резистивной силы –

$$\dot{\underline{F}}_r = \underline{r} \dot{\underline{V}} = r V e^{-i\varphi} = F_r e^{-i\varphi},$$

где  $\underline{r}$  – механический резистанс (resistance) [4].

$$\underline{r} = r e^{i0} = r.$$

Разумеется,

$$\dot{\underline{F}}_m + \dot{\underline{F}}_k + \dot{\underline{F}}_r = \dot{\underline{F}}.$$

Из закона Гука, (3) и (4) следует выражение для комплексной амплитуды отклонения –

$$\dot{\underline{X}} = \frac{\dot{\underline{F}}_k}{k} = \frac{x_k V e^{-i(\pi/2+\varphi)}}{k} = \frac{k V e^{-i(\pi/2+\varphi)}}{\omega k} = \frac{V}{\omega} e^{-i(\pi/2+\varphi)} = X e^{-i(\pi/2+\varphi)}.$$

Из второго закона Ньютона, (1) и (2) следует выражение для комплексной амплитуды ускорения –

$$\dot{\underline{A}} = \frac{\dot{\underline{F}}_m}{m} = \frac{x_m V e^{i(\pi/2-\varphi)}}{m} = \frac{\omega m V e^{i(\pi/2-\varphi)}}{m} = \omega V e^{i(\pi/2-\varphi)} = A e^{i(\pi/2-\varphi)}.$$

Разумеется,

$$A = \omega V = \omega^2 X.$$

Из вышеприведенных формул следуют амплитудно-частотные характеристики

$$F_k(\omega) = \frac{kF}{\omega \sqrt{r^2 + (\omega m - k/\omega)^2}},$$

$$X(\omega) = \frac{F}{\omega \sqrt{r^2 + (\omega m - k/\omega)^2}},$$

$$F_r(\omega) = \frac{rF}{\sqrt{r^2 + (\omega m - k/\omega)^2}},$$

$$V(\omega) = \frac{F}{\sqrt{r^2 + (\omega m - k/\omega)^2}},$$

$$F_m(\omega) = \frac{\omega m F}{\sqrt{r^2 + (\omega m - k/\omega)^2}},$$

$$A(\omega) = \frac{\omega F}{\sqrt{r^2 + (\omega m - k/\omega)^2}}.$$

Разумеется,

$$F = \sqrt{F_r^2 + (F_k - F_m)^2}$$

Графики функций  $X(\omega)$ ,  $V(\omega)$ ,  $A(\omega)$  ведут себя качественно также как, соответственно,  $F_k(\omega)$ ,  $F_r(\omega)$ ,  $F_m(\omega)$ .

Частота  $\omega_k$ , на которой функции  $X(\omega)$  и  $F_k(\omega)$  имеют максимум, определяется из условия

$$\frac{d}{d\omega} \left\{ \omega^{-1} \left[ (k\omega^{-1} - m\omega)^2 + r^2 \right]^{-1/2} \right\} = 0.$$

Решение этого уравнения:

$$\omega_k = \sqrt{\frac{k}{m}} \sqrt{1 - r^2/(2km)} = \omega_0 \sqrt{1 - r^2/(2x_w^2)} = \omega_0 \sqrt{1 - d^2/2},$$

где  $x_w = \sqrt{km}$  – волновое сопротивление (системы),  $d = r/x_w$  – затухание (системы) (по аналогии с электротехникой).

$$F_{k \max} = F_k(\omega_k) = \frac{Q}{\sqrt{1 - d^2/4}} F,$$

$$X_{\max} = X(\omega_k) = \frac{Q}{\sqrt{1 - d^2/4}} \frac{F}{k} = \frac{Q}{\sqrt{1 - d^2/4}} X_0,$$

где  $Q = 1/d$  – добротность (системы) (по аналогии с электротехникой),  $X_0 = X(0) = F/k$  – статическое отклонение.

Частота  $\omega_r$ , на которой функции  $V(\omega)$  и  $F_r(\omega)$  имеют максимум, очевидным образом равна

$$\omega_r = \sqrt{k/m} = \omega_0.$$

$$F_{r \max} = F_r(\omega_0) = F,$$

$$V_{\max} = V(\omega_0) = \frac{F}{r}.$$

Частота  $\omega_m$ , на которой функции  $A(\omega)$  и  $F_m(\omega)$  имеют максимум, определяется из условия

$$\frac{d}{d\omega} \left\{ \omega \left[ (k\omega^{-1} - m\omega)^2 + r^2 \right]^{-1/2} \right\} = 0.$$

Решение этого уравнения:

$$\omega_m = \sqrt{\frac{k}{m}} \frac{1}{\sqrt{1 - r^2/(2km)}} = \frac{\omega_0}{\sqrt{1 - d^2/2}}.$$

$$F_{m \max} = F_m(\omega_m) = \frac{Q}{\sqrt{1 - d^2/4}} F,$$

$$A_{\max} = A(\omega_m) = \frac{Q}{\sqrt{1 - d^2/4}} \frac{F}{m} = \frac{Q}{\sqrt{1 - d^2/4}} A_0,$$

где  $A_0 = A(0) = F/m$  – постоянное ускорение (при нулевой частоте).

При  $d^2/2 > 1$  функции  $X(\omega)$ ,  $A(\omega)$ ,  $F_k(\omega)$ ,  $F_m(\omega)$  не имеют максимумов в вещественном диапазоне частот.

Примечательно, что

$$\begin{aligned} \omega_k \omega_m &= \omega_0^2, \\ F_{k \max} &= F_{m \max}, \\ A_{\max} &= \omega_0^2 X_{\max}, \\ \frac{A_{\max}}{\omega_m} &= \omega_k X_{\max} = \frac{V_{\max}}{\sqrt{1 - d^2/4}}. \end{aligned} \quad (5)$$

Другие характерные точки и характерные отношения:

$$F_m(\omega_k) = \frac{Q - d/2}{\sqrt{1 - d^2/4}} F,$$

$$A(\omega_k) = \frac{Q - d/2}{\sqrt{1 - d^2/4}} A_0,$$

$$F_k(\omega_m) = \frac{Q - d/2}{\sqrt{1 - d^2/4}} F,$$

$$X(\omega_m) = \frac{Q - d/2}{\sqrt{1 - d^2/4}} X_0,$$

$$F_m(\omega_0) = QF,$$

$$A(\omega_0) = QA_0,$$

$$F_k(\omega_0) = QF,$$

$$X(\omega_0) = QX_0,$$

$$F_r(\omega_k) = F_r(\omega_m) = \frac{\sqrt{1 - d^2/2}}{\sqrt{1 - d^2/4}} F,$$

$$V(\omega_k) = V(\omega_m) = \frac{\sqrt{1 - d^2/2}}{\sqrt{1 - d^2/4}} \frac{F}{r} = \frac{\sqrt{1 - d^2/2}}{\sqrt{1 - d^2/4}} V(\omega_0).$$

$$\frac{F_k(\omega_k)}{F_m(\omega_k)} = \frac{F_m(\omega_m)}{F_k(\omega_m)} = \frac{F_k(\omega_k)}{F_k(\omega_m)} = \frac{F_m(\omega_m)}{F_m(\omega_k)} =$$

$$= \frac{X(\omega_k)}{X(\omega_m)} = \frac{A(\omega_m)}{A(\omega_k)} = \frac{1}{1 - d^2/2},$$

$$\frac{F_k(\omega_k)}{F_r(\omega_k)} = \frac{F_m(\omega_m)}{F_r(\omega_m)} = \frac{Q}{\sqrt{1 - d^2/2}},$$

$$\frac{F_k(\omega_m)}{F_r(\omega_m)} = \frac{F_m(\omega_k)}{F_r(\omega_k)} = Q\sqrt{1 - d^2/2}.$$

На рисунке представлены подлинные резонансные кривые для системы с параметрами:  $F = 100$  Н,  $m = 10$  кг,  $k = 40$  кг·с<sup>-2</sup>,  $r = 10$  кг·с<sup>-1</sup>.

На том основании, что амплитуда отклонения  $X$  имеет максимум на частоте  $\omega_k$  ( $\omega_k < \omega_0$ ) она ( $\omega_k$ , а не  $\omega_0$ ) считается резонансной частотой.

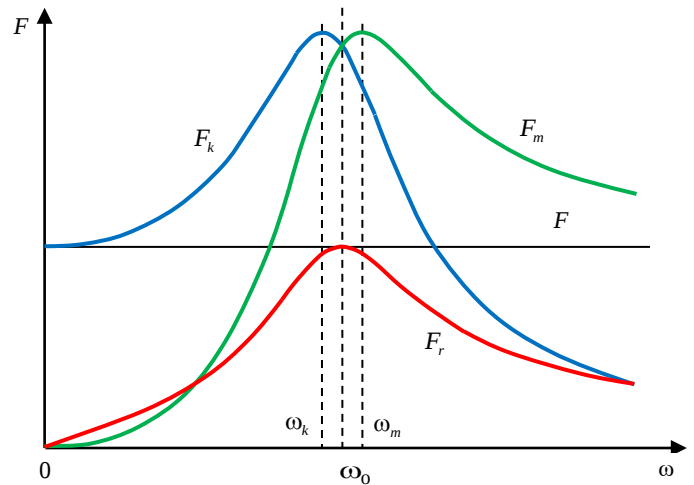


Рис.1. Резонанс сил

Это было бы сильным решением, если бы  $X$  был единственным значимым кинематическим параметром. Однако не менее значимыми параметрами являются амплитуды скорости  $V$  и ускорения  $A$ . При этом первая имеет макси-

мум на частоте  $\omega_0$ , а вторая – на частоте  $\omega_m$  ( $\omega_m > \omega_0$ ). Таким образом,  $\omega_k$  ничем не лучше, чем  $\omega_0$  и  $\omega_m$ . Единственным аргументом при выборе резонансной частоты остается соображение симметрии (усиленное выражением (5)), в соответствии с которым резонансная частота –  $\omega_0$ . С другой стороны, имея в виду рисунок, можно вести речь о трех резонансных частотах:  $\omega_k$ ,  $\omega_m$  и  $\omega_0$ . На первой имеет место *резонанс упругой силы*, на второй – *резонанс инертной силы*, на третьей – *резонанс резистивной силы*.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Попов И.П. Упруго-деформационная и другие виды мощности для целей мониторинга энергосберегающих

технологий // Автоматизированные технологии и производства. 2023 № 2 (28). С. 33–35.

2. Секушин Н.А., Кокшарова Л.А., Жук Н.А. Импеданс-спектроскопия CACU3TI4O12 // Письма о материалах. 2020. Т. 10. № 1 (37). С. 72–77.

3. Апостолов С.С., Божко А.А., Майзелис З.А., Сорокина М.А., Ямпольский В.А. Амплитудный гистерезис поверхностного реактанса слоистого сверхпроводника // Физика низких температур. 2016. Т. 42. № 4. С. 343–352.

4. Ткаченко О.А., Ткаченко В.А. Скейлинг кондактанса и резистанса квадратных решеток с экспоненциально широким спектром сопротивлений связей // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2017. Т. 106. № 5–6. С. 312–316.

## RESONANCE OF FORCES IN MECHATRONIC SYSTEMS

I.P. Popov

Kurgan State University, Kurgan, Russia

e-mail: uralakademia@kurganstalmost.ru

**Abstract.** A parallel connection of mechanical power consumers and a power source is considered. On the basis that the amplitude of the deviation  $X$  has a maximum at frequency  $\omega_k$  ( $\omega_k < \omega_0$ ), it ( $\omega_k$  and not  $\omega_0$ ) is considered the resonant frequency. This would be a strong solution if  $X$  were the only significant kinematic parameter. However, no less significant parameters are the amplitudes of velocity  $V$  and acceleration  $A$ . In this case, the first has a maximum at frequency  $\omega_0$ , and the second at frequency  $\omega_m$  ( $\omega_m > \omega_0$ ). Thus,  $\omega_k$  no better than  $\omega_0$  and  $\omega_m$ . The only argument when choosing a resonant frequency remains the consideration of symmetry, according to which the resonant frequency is  $\omega_0$ . On the other hand, we can talk about three resonant frequencies:  $\omega_k$ ,  $\omega_m$  and  $\omega_0$ . At the first there is a resonance of the elastic force, at the second there is a resonance of the inertial force, at the third there is a resonance of the resistive force.

**Keywords:** parallel connection, force source, elastic force resonance, inertial force resonance, resistive force resonance.

#### REFERENCES

1. Popov I.P. Elastic-deformation and other types of power for the purposes of monitoring energy-saving technologies [Uprugo-deformatsionnaya i drugiye vidy moshchnosti dlya tseley monitoringa energosberegayushchikh tekhnologiy]. *Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva* [Automated technologies and production], 2023, no. 2 (28), pp. 33–35. (In Russian)

2. Sekushin N.A., Koksharova L.A., Zhuk N.A. Impedance spectroscopy CACU3TI4O12 [Impedans-spektroskopiya CACU3TI4O12]. *Pis'ma o materialakh* [Letters on materials], 2020, vol. 10, no. 1 (37), pp. 72–77. (In Russian)

3. Apostolov S.S., Bozhko A.A., Maizelis Z.A., Sorokina M.A., Yampolsky V.A. Amplitude hysteresis of the surface

reactance of a layered superconductor [Amplitudnyy gisterезis poverkhnostnogo reaktansa sloistogo sverkhprovodnika]. *Fizika nizkikh tempepatup* [Low Temperature Physics], 2016, vol. 42, no. 4, pp. 343–352. (In Russian)

4. Tkachenko O.A., Tkachenko V.A. Scaling of conductance and resistance of square lattices with an exponentially wide range of bond resistances [Skeyling kondaktansa i rezistansa kvadratnykh reshetok s eksponentsial'no shi-rokim spektrom soprotivleniy svyazey]. *Pis'ma v Zhurnal eksperimental'noy i teoreticheskoy fiziki* [Letters to the Journal of Experimental and Theoretical Physics], 2017, vol. 106, no. 5–6, pp. 312–316. (In Russian)

Попов И.П. Резонанс сил в мехатронных системах / И.П. Попов // Автоматизированные технологии и производства. 2024. №1(29). С.17–19.

I.P. Popov Resonance of Forces in Mechatronic Systems. *Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva* [Automation of technologies and production], 2024, no.1(29), pp.17–19. (In Russian).

# ВИБРАТОР ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ КОМПЛЕКСОВ

В.Д. Павлов

Владимирский электромеханический завод, Владимир, Россия

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

**Аннотация.** В монореактивном гармоническом осцилляторе инертные элементы могут совершать свободные синусоидальные колебания, которые сопровождаются трансформацией кинетической энергии инертного элемента в кинетическую же энергию другого инертного элемента. В положении, при котором  $\varphi = 0$  энергия первого инертного элемента равна нулю. При этом энергия второго элемента имеет максимальное значение. В следующий момент времени первый элемент приобретает ускорение за счет кинетической энергии второго элемента, скорость которого начинает уменьшаться. Свободные синусоидальные колебания могут возникать при взаимной трансформации каких угодно физических видов энергии. Это обстоятельство является побудительным мотивом создания осциллятора, в котором свободные синусоидальные колебания сопровождаются трансформацией кинетической энергии инертного элемента в кинетическую же энергию другого инертного элемента. Элементы с другим характером реактивности в таком осцилляторе отсутствуют. Такой осциллятор по существу является монореактивным.

**Ключевые слова:** осциллятор, колебания, энергообмен, монореактивный, фаза, перемещение, скорость, ускорение.

В классических осцилляторах свободные синусоидальные колебания сопровождаются обменом энергии между его элементами, имеющими противоположный характер реактивности.

В пружинном маятнике груз обменивается энергией с пружиной.

В электрическом колебательном контуре катушка индуктивности обменивается энергией с конденсатором.

Известны колебательные системы, в которых груз или пружина обмениваются энергией с катушкой индуктивности или конденсатором [1, 2].

Все указанные колебательные системы по существу являются *биреактивными*, а именно:  $m-k$ ,  $L-C$ ,  $m-L$ ,  $m-C$ ,  $k-L$ ,  $k-C$ .

Свободные синусоидальные колебания могут возникать при взаимной трансформации каких угодно физических видов энергии [3, 4].

Это обстоятельство является побудительным мотивом создания осциллятора, в котором свободные синусоидальные колебания сопровождаются трансформацией кинетической энергии инертного элемента в кинетическую же энергию другого инертного элемента. Элементы с другим характером реактивности в таком осцилляторе отсутствуют.

Такой осциллятор по существу является *монореактивным*, а именно:  $m-m$ .

Актуальность работы обусловлена тем, что механические колебания широко распространены в разнообразных технологических процессах.

**Моделирование монореактивного гармонического осциллятора.** Синтез осциллятора производится на основе трех предпосылок.

*Первое.* Осциллятор состоит из двух одинаковых по массе грузов.

*Второе.* Грузы совершают синусоидальные перемещения

$$x_1 = A \sin(\zeta + \zeta_1),$$

$$x_2 = A \sin(\zeta + \zeta_2).$$

Здесь  $x_1, x_2$  – перемещения инертных элементов,  $A$  – амплитуда,  $\zeta$  – изменяющаяся фаза колебаний,  $\zeta_1, \zeta_2$  – начальные фазы колебаний.

*Третье.* Суммарная энергия осциллятора со временем не изменяется

$$W_1 + W_2 = \text{const}.$$

Из второй и третьей предпосылок следует

$$\frac{m}{2} \left( \frac{dx_1}{dt} \right)^2 + \frac{m}{2} \left( \frac{dx_2}{dt} \right)^2 = \text{const},$$

$$\cos^2(\zeta + \zeta_1) + \cos^2(\zeta + \zeta_2) = \text{const}.$$

Из второго выражения следует, что

$$\zeta_1 - \zeta_2 = \pm \frac{\pi}{2}.$$

Эта формула дает возможность определить конфигурацию монореактивного гармонического осциллятора, которая представлена на рисунке.

*Допущения.* К инертным элементам внешние силы не приложены. Масса соединительного элемента равна нулю. Потери на трение отсутствуют.

**Анализ осциллятора.** В соответствии с рисунком перемещения инертных элементов имеют вид:

$$x_1 = l \cos \varphi, \quad (1)$$

$$x_2 = l \cos \left( \frac{\pi}{2} - \varphi \right). \quad (2)$$

Текущая фаза  $\varphi$  наилучшим образом подходит на роль обобщенной координаты.

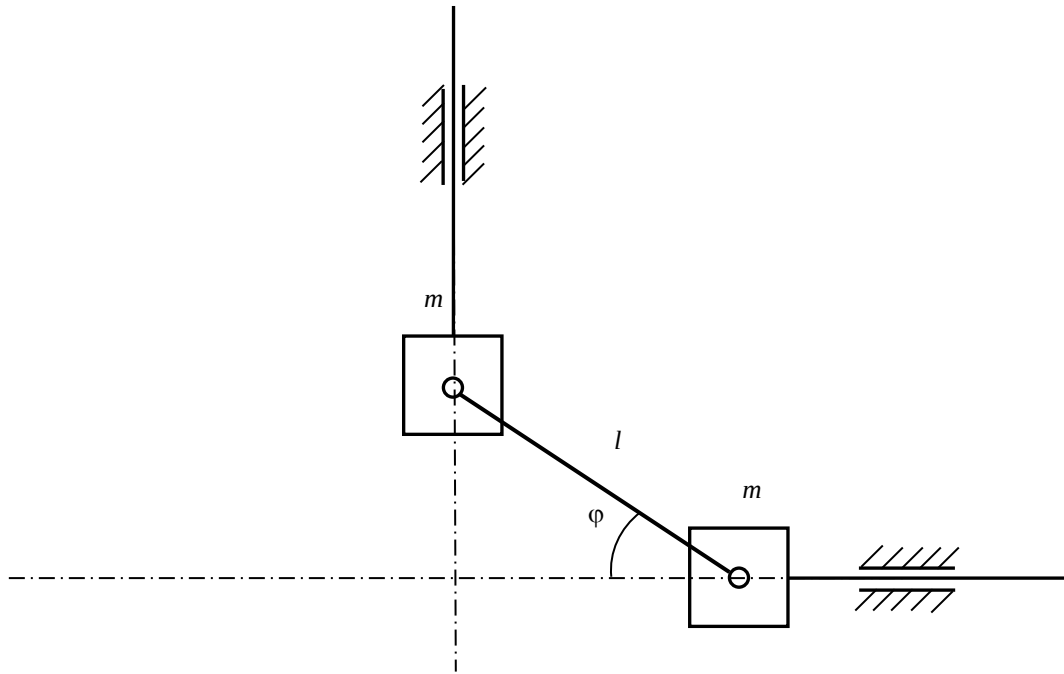


Рис.1. Монореактивный гармонический осциллятор

Рассматриваемая механическая система обладает одной степенью свободы, поэтому, соответственно, уравнение Лагранжа второго рода принимает следующую форму:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}} \right) - \frac{\partial T}{\partial \varphi} = Q.$$

Так как активные силы равны нулю, то обобщенная сила тоже равна нулю

$$Q = 0.$$

Суммарная кинетическая энергия системы равна

$$T = \frac{m}{2} \left( \frac{dx_1}{dt} \right)^2 + \frac{m}{2} \left( \frac{dx_2}{dt} \right)^2 = \\ = \frac{ml^2}{2} \sin^2 \varphi \dot{\varphi}^2 + \frac{ml^2}{2} \cos^2 \varphi \dot{\varphi}^2 = \frac{ml^2}{2} \dot{\varphi}^2.$$

Отсюда следует

$$\frac{\partial T}{\partial \varphi} = 0, \\ \frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}} = ml^2 \dot{\varphi}, \\ \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}} \right) = ml^2 \ddot{\varphi} = 0.$$

Это дифференциальное уравнение имеет элементарное решение

$$\frac{d\varphi}{dt} = C_1, \\ \varphi = C_1 t + C_2.$$

Постоянные интегрирования  $C_1$  и  $C_2$  находятся с учетом начальных условий

$$\varphi(0) = \varphi_0,$$

$$\frac{d\varphi}{dt}(0) = \omega_0. \quad (3)$$

Отсюда следует

$$C_1 = \omega_0, \\ C_2 = \varphi_0.$$

С учетом установленных величин перемещения инертных элементов (1) и (2) приобретают вид:

$$x_1 = l \cos(\omega_0 t + \varphi_0), \quad (4)$$

$$x_2 = l \cos\left(\frac{\pi}{2} - \omega_0 t - \varphi_0\right). \quad (5)$$

Если исходное положение первого инертного элемента равно

$$x_1(0) = x_{10},$$

то

$$\cos \varphi_0 = \frac{x_{10}}{l},$$

$$\varphi_0 = \arccos \frac{x_{10}}{l} = \arcsin \frac{x_{20}}{l}.$$

Если исходная скорость второго инертного элемента равна

$$\frac{dx_2}{dt}(0) = v_{20},$$

то

$$l \omega_0 \cos(\omega_0 0 + \varphi_0) = v_{20},$$

$$\omega_0 = \frac{v_{20}}{x_{10}} = -\frac{v_{10}}{x_{20}}. \quad (6)$$

С учетом полученных выражений перемещения инертных элементов и их скорости можно записать в виде:

$$x_1 = l \cos \left( \frac{v_{20}}{x_{10}} t + \arccos \frac{x_{10}}{l} \right), \quad (7)$$

$$x_2 = l \cos \left( \frac{\pi}{2} + \frac{v_{10}}{x_{20}} t - \arcsin \frac{x_{20}}{l} \right), \quad (8)$$

$$v_1 = l \frac{v_{10}}{x_{20}} \sin \left( -\frac{v_{10}}{x_{20}} t + \arcsin \frac{x_{10}}{l} \right),$$

$$v_2 = l \frac{v_{20}}{x_{10}} \cos \left( \frac{v_{20}}{x_{10}} t - \arccos \frac{x_{20}}{l} \right).$$

**Заключение.** В монореактивном ( $m$ - $m$ ) гармоническом осцилляторе инертные элементы могут совершать свободные синусоидальные колебания, которые сопровождаются трансформацией кинетической энергии инертного элемента в кинетическую же энергию другого инертного элемента.

В положении, при котором  $\varphi = 0$  энергия первого инертного элемента равна нулю. При этом энергия второго элемента имеет максимальное значение. В следующий момент времени первый элемент приобретает ускорение

за счет кинетической энергии второго элемента, скорость которого начинает уменьшаться.

В соответствии с выражениями (3) – (8) в монореактивном ( $m$ - $m$ ) гармоническом осцилляторе могут возникать свободные гармонические колебания любой заданной частоты, которая определяется исключительно начальными условиями.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Попов И.П. Спонтанные упруго-индуктивные колебания в технических средствах автоматизации // Автоматизированные технологии и производства. 2019. № 1 (19). С. 18–20.

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

3. Попов И.П. Индуктивно-индуктивные колебания в системах автоматики // Автоматизированные технологии и производства. 2022. № 2 (26). С. 13–15.

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

## VIBRATOR FOR AUTOMATED COMPLEXES

V.D. Pavlov

Vladimir Electromechanical Plant, Vladimir, Russia

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

**Abstract.** In a monoreactive harmonic oscillator, inert elements can perform free sinusoidal oscillations, which are accompanied by the transformation of the kinetic energy of an inert element into the kinetic energy of another inert element. In a position where the energy of the first inert element is zero. In this case, the energy of the second element has a maximum value. At the next moment of time, the first element acquires acceleration due to the kinetic energy of the second element, the speed of which begins to decrease. Free sinusoidal oscillations can occur during the mutual transformation of any kind of physical energy. This circumstance is the motive for creating an oscillator, in which free sinusoidal oscillations are accompanied by the transformation of the kinetic energy of an inert element into the kinetic energy of another inert element. Elements with a different nature of reactivity are absent in such an oscillator. Such an oscillator is essentially monoreactive.

**Keywords:** oscillator, oscillations, energy exchange, monoreactive, phase, movement, speed, acceleration.

#### REFERENCES

1. Popov I.P. Spontaneous elastic-inductive vibrations in technical means of automation [Spontannyye uprugoinduktivnyye kolebaniya v tekhnicheskikh sredstvakh avtomatizatsii]. *Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva [Automated technologies and production]*, 2019, no. 1 (19), pp. 18–20. (In Russian).

2. Popov I.P. Inert-inductive oscillations in mechatronic systems [nertno-induktivnyye kolebaniya v mekhatronnykh sistemakh]. *Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva [Automated technologies and production]*, 2022, no.1(25), pp.23–25. (In Russian).

3. Popov I.P. Inductive-inductive oscillations in automation systems [Induktivno-induktivnyye kolebaniya v sistemakh avtomatiki]. *Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva [Automated technologies and production]*, 2022, no. 2 (26), pp. 13–15. (In Russian).

4. Pavlov V.D. Controlled artificial elasticity in mechatronic systems [Upravlyayemaya iskusstvennaya uprugost' v mekhatronnykh sistemakh]. *Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva [Automated technologies and production]*, 2022, no. 1 (25), pp. 20–22. (In Russian).

Павлов, В.Д. Вибратор для автоматизированных комплексов / В.Д. Павлов // Автоматизированные технологии и производства. 2024. №1(29). С.20-22.

V.D. Pavlov Vibrator for Automated Complexes. *Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva [Automation of technologies and production]*, 2024, no.1(29), pp.20-22. (In Russian).

## АНТИРЕЗОНАНС СИЛ В МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМАХ

И.П. Попов

Курганский государственный университет, Курган, Россия

e-mail: uralakademia@kurganstalmost.ru

**Аннотация.** Рассматривается параллельное соединение потребителей механической мощности и источник скорости. При стремлении циклической частоты  $\omega$  к нулю и к бесконечности кривая силы  $F(\omega)$  устремляется в бесконечность. При сверхмалых частотах возникают чрезмерные деформации упругого элемента, сопровождаемые, соответственно, чрезмерными силами упругости. При сверхвысоких частотах возникают чрезмерные ускорения и чрезмерные инерционные силы. При  $\omega_0$  график силы проходит через минимум. Выполняется соотношение  $F_{\min} = F(\omega_0) = Vr = F_r$ . Имеет место антирезонанс сил, при котором реактивные силы  $F_k$  и  $F_m$  равны и противоположны, а их сумма, соответственно, равна нулю. Для антирезонанса разнотений со смещением антирезонансной частоты (она же резонансная) не возникает. Таким образом, антирезонанс возникает при сочетании параллельного соединения и источника скорости.

**Ключевые слова:** параллельное соединение, источник скорости, антирезонанс, реактивные силы.

Рассматривается параллельное соединение потребителей механической мощности и источник скорости.

Комплексная амплитуда инертной силы [1] –

$$\dot{F}_m = \dot{x}_m \dot{V} = x_m V e^{i\pi/2} = F_m e^{i\pi/2}.$$

Комплексная амплитуда упругой силы [2] –

$$\dot{F}_k = \dot{x}_k \dot{V} = x_k V e^{-i\pi/2} = F_k e^{-i\pi/2}.$$

Комплексная амплитуда резистивной силы –

$$\dot{F}_r = \dot{r} \dot{V} = r V e^{i0} = F_r e^{i0}.$$

Разумеется,

$$\dot{F}_m + \dot{F}_k + \dot{F}_r = \dot{F}.$$

Комплексная амплитуда отклонения –

$$\dot{X} = \frac{\dot{F}_k}{k} = \frac{x_k V e^{-i\pi/2}}{k} = \frac{k V e^{-i\pi/2}}{\omega k} = \frac{V}{\omega} e^{-i\pi/2} = X e^{-i\pi/2} \quad (1)$$

Комплексная амплитуда ускорения –

$$\dot{A} = \frac{\dot{F}_m}{m} = \frac{x_m V e^{i\pi/2}}{m} = \frac{\omega m V e^{i\pi/2}}{m} = \omega V e^{i\pi/2} = A e^{i\pi/2} \quad (2)$$

Комплексная амплитуда силы –

$$\dot{F} = \dot{V} \underline{z} = V z e^{i\varphi} = F e^{i\varphi}.$$

Амплитудно-частотная характеристика

$$F(\omega) = V \sqrt{r^2 + (\omega m - k/\omega)^2}.$$

При  $\omega \rightarrow 0$  и  $\omega \rightarrow \infty$  кривая  $F(\omega)$  устремляется в бесконечность. При сверхмалых частотах возникают чрезмерные деформации упругого элемента (1), сопровождаемые, соответственно, чрезмерными силами упругости. При сверхвысоких частотах возникают чрезмерные ускорения (2) и чрезмерные инерционные силы.

При  $\omega_0$  график проходит через минимум

$$F_{\min} = F(\omega_0) = Vr = F_r.$$

Имеет место антирезонанс сил, при котором реактивные силы  $F_k$  и  $F_m$  равны и противоположны, а их сумма, соответственно, равна нулю.

Для антирезонанса разнотений со смещением антирезонансной частоты (она же резонансная) не возникает [3, 4].

На рисунке представлена подлинная антирезонансная кривая для системы с параметрами:  $V = 10 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ ,  $m = 10 \text{ кг}$ ,  $k = 40 \text{ кг} \cdot \text{с}^{-2}$ ,  $r = 10 \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1}$ .

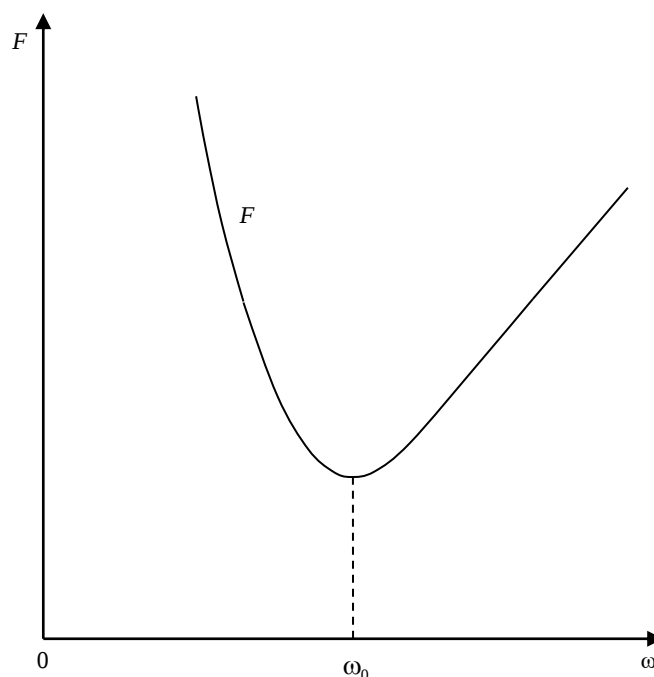


Рис.1. Антирезонанс сил

---

Таким образом, антирезонанс возникает при сочетании параллельного соединения и источника скорости.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Зайчиков А.В. О физической природе сил инерции и сил упругости // Биржа интеллектуальной собственности. 2018. Т. 17. № 2. С. 23-30.

2. Алифов А.А. Автопараметрические колебания при запаздываниях в силах упругости и трения // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2021. № 2. С. 9-16.

3. Коновалов С.И., Кузьменко А.Г. К вопросу о частотах резонанса и антирезонанса пластинчатого пьезокерамического преобразователя // Дефектоскопия. 2017. № 11. С. 50-54.

4. Поляков В.Ю. Антирезонанс пролетных строений железнодорожных мостов при высокоскоростном движении // Транспортное строительство. 2018. № 10. С. 2-5.

## ANTI-RESONANCE OF FORCES IN MECHATRONIC SYSTEMS

I.P. Popov

Kurgan State University, Kurgan, Russia

e-mail: uralakademia@kurganstalmost.ru

**Abstract.** A parallel connection of mechanical power consumers and a speed source is considered. As the cyclic frequency  $\omega$  tends to zero and to infinity, the force curve  $F(\omega)$  rushes to infinity. At ultra-low frequencies, excessive deformations of the elastic element occur, accompanied, accordingly, by excessive elastic forces. At extremely high frequencies, excessive accelerations and excessive inertial forces occur. At  $\omega_0$  the force graph passes through a minimum. The relation  $F_{\min} = F(\omega_0) = Vr = Fr$  holds. There is an antiresonance of forces, in which the reactive forces  $F_k$  and  $F_m$  are equal and opposite, and their sum, respectively, is zero. For antiresonance, discrepancies with the shift of the antiresonant frequency (aka resonant) do not arise. Thus, anti-resonance occurs when a parallel connection and a speed source are combined.

**Keywords:** parallel connection, speed source, antiresonance, reactive forces.

#### REFERENCES

1. Zaichikov A.V. On the physical nature of inertial forces and elasticity forces [O fizicheskoy prirode sil inertsii i sil uprugosti]. *Birzha intellektual'noy sobstvennosti [Intellectual Property Exchange]*, 2018, vol. 17, no. 2, pp. 23-30. (In Russian)

2. Alifov A.A. Autoparametric oscillations with delays in the forces of elasticity and friction [Avtoparametricheskiye kolebaniya pri zapazdyvaniyakh v silakh uprugosti i treniya]. *Problemy mashinostroyeniya i nadezhnosti mashin [Problems of mechanical engineering and machine reliability]*, 2021, no. 2, pp. 9-16. (In Russian)

3. Konovalov S.I., Kuzmenko A.G. On the issue of resonance and anti-resonance frequencies of a plate piezoceramic transducer [K voprosu o chastotakh rezonansa i antirezona-plastinchatogo p'yezokeramicheskogo preobrazovatelya]. *Defektoskopiya [Defectoscopy]*, 2017, no. 11, pp. 50-54. (In Russian)

4. Polyakov V.Yu. Anti-resonance of railway bridge spans during high-speed traffic [Antirezona-plastinchatogo p'yezokeramicheskogo preobrazovatelya]. *Transportnoye stroitel'stvo [Transport construction]*, 2018, no. 10, pp. 2-5. (In Russian)

---

Попов И.П. Антирезонанс сил в мехатронных системах / И.П. Попов // Автоматизированные технологии и производства. 2024. №1(29). С.23-24.

I.P. Popov Anti-resonance of Forces in Mechatronic Systems. *Avtomatizirovannye tehnologii i proizvodstva [Automation of technologies and production]*, 2024, no.1(29), pp.23-24. (In Russian).

УДК 621.316.7-681.515.4

## СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ДАВЛЕНИЯ В ШНЕК-ПРЕССЕ ПРИ ПОКРЫТИИ ПОЛИМЕРНОЙ ОБОЛОЧКОЙ ГЕОФИЗИЧЕСКОГО КАБЕЛЯ

Е.Ю. Мухина<sup>1</sup>, Д.В. Чмутов<sup>2</sup>

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

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

**Аннотация.** В статье рассмотрена система управления шнек-прессом. Регулирование давления в процессе экструзии позволяет повысить технико-экономические показатели производства полимеров. Выбран комплект средств автоматизации отечественного производства. Предложена каскадная система регулирования давления в шнек-прессе.

**Ключевые слова:** шнек-пресс, автоматизация, управление, контур регулирования, давление.

### ВВЕДЕНИЕ

Автоматическое управление давлением в одношнековом экструдере является важным аспектом в процессе экструзии. В настоящее время большинство экструдеров оснащены ручными системами управления давлением. Однако такие системы требуют постоянного вмешательства оператора, что может привести к ошибкам и неоптимальной работе экструдера. Поэтому автоматическая система управления становится все более актуальной и востребованной.

Современные экструдеры классифицируются по нескольким категориям. Самыми простыми и популярными являются шнековые машины. Шнековые экструдеры бывают:

- параллельные и конические;
- с нормальной и высокой скоростью вращения;
- вращающиеся в одном направлении и в противоположном направлении.

Технологии обработки материалов методом экструзии активно используются в самых разных областях:

- сельское хозяйство (изготовление комбикормов для животных, парниковых пленок);
- пищевая промышленность (кондитерские изделия, макаронные, детское питание, жевательные резинки, кукурузные хлопья);
- изготовление упаковочных материалов, многослойных пакетов, термоусадочных пленок;
- канцтовары, полиграфия, ламинирование, принтерная печать, изготовление гидрогелей для 3D-печати;
- строительные материалы (экструзия пеноблоков, утеплителей, профилей ПВХ, полистирола, полипропилена);
- производство пластиковых трубопроводов;
- химическая промышленность (изготовление удобрений, изделий из силикона, резины);

- металлообработка (алюминиевый профиль);
- экструзия кабельных покрытий, термоусадочных трубок;
- альтернативная энергетика (твердое биотопливо).

### СТРУКТУРНАЯ СХЕМА КОНТУРА РЕГУЛИРОВАНИЯ ДАВЛЕНИЯ В ШНЕК-ПРЕССЕ

Эффективность автоматизированных систем управления в промышленных процессах во многом зависит от подобранных конфигураций средств автоматизации, интегрированных в эти системы [1].

Для достижения стабильного давления полимера в шнек-прессе при покрытии оболочкой геофизического кабеля, необходимо стабилизировать скорость вращения шнека, которая напрямую зависит от скорости вращения двигателя постоянного тока. Для этого необходима каскадная система регулирования по току и скорости и отдельного контура контроля и регулирования давления. Структурная схема регулирования параметров объекта представлена на рис. 1.

Для того чтобы держать ток якоря в пределах разрешенных значений, настройка токового контура происходит с учетом этой необходимости. В результате система регулирования тока приобретает характеристики пропорционально-интегрального регулятора. В области электроприводов особенно распространено использование иерархического метода управления. Электроприводы, оснащенные управляющей системой, построенной по этому методу, типично включают в себя два основных контура: контур управления током и контур регулирования скорости.

Каскадное управление [2] строится при использовании принципа, где обратная связь от внешнего контура формирует референсное значение для внутреннего контура, который, в свою очередь, интегрирован в систему управления в качестве части внешнего контура, с учетом его характеристик при настройке внешнего.

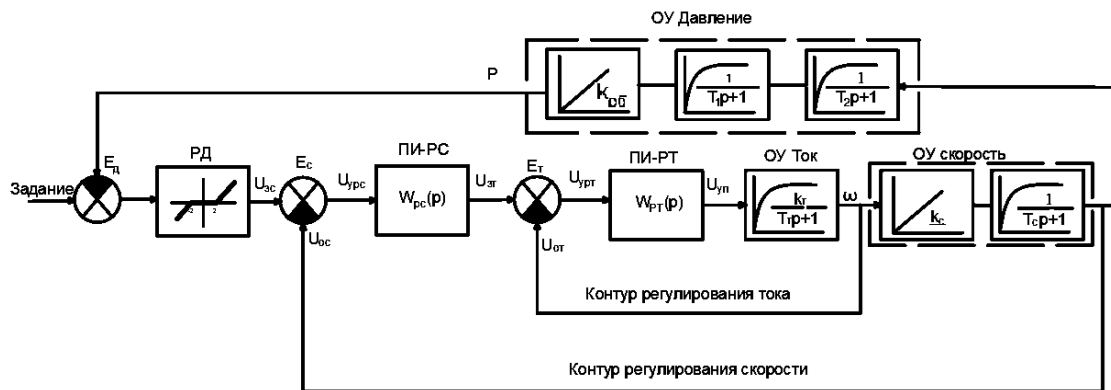


Рис. 1. Структурная схема регулирования давления

Пропорционально-интегральные (ПИ) регуляторы выступают в роли регуляторов тока (РТ) и скорости (РС), обеспечивая управление.

#### СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ШНЕК-ПРЕССОМ

Работу автоматизированной системы управления рассмотрим на примере схемы автоматизации шнек-пресса МЕ-160, рис. 2.

Расход полимера измеряется расходомером Multicor S (поз. 1а), аналоговый сигнал с него 4...20 мА передается через модуль аналоговых входов (поз. МВ) в программируемый контроллер (поз. ПЛК), преобразуется в количественное значение и отображается на панели оператора (поз. ПУ). В тех случаях, когда необходима смесь полимеров (например, добавляется краситель), на ПУ включается гравиметрический дозатор (поз. 1б) управляющий сервоклапаном (поз. 1в) для добавления определенного количества другого материала.

Перед формирующей фильерой в головке шнек-пресса установлен чувствительный элемент – датчик давления Метран 150 TG (поз. 2а). Регулирование осуществляется путем измерения давления полимера в теле шнек-пресса, сигнал с которого поступает на МВ. Сигналы в модуле преобразуются в цифровую форму, удобную для восприятия процессора CPU. Текущий сигнал с датчика давления сравнивается с заданием и рассчитывается рассогласование между заданным и действительным давлением [3]. В контроллере рассчитывается управляющее воздействие на увеличение или уменьшение скорости вращения двигателя постоянного тока и через преобразователь частоты (поз. ПЧ), управляющего скоростью вращения электродвигателя (поз.М). Обратная связь в системе управления по скорости вращения двигателя осуществляется при помощи инкрементального энкодера (поз.3а), с которого выходит дискретный сигнал 0...10 В на дискретные входы ПЧ.

Контроль и регулирование температуры осуществляется при помощи трех термопреобразователей ТХА 003-7 (поз. 4а, 5а, 6а). Термопара установлена на максимально близком расстоянии от расплава в теле экструдера. ТХА 003-7 (хромель-алюмель) рассчитана на измерение температуры от - 40 до 600°C. При нагревании горячего спая

термопары вырабатывается термоЭДС [4]. Сигнал с термопар 0...10 мВ подается на нормирующий преобразователь НПТ-1К.15.1.3 (поз.4б, 5б, 6б), с него аналоговый сигнал 4...20 мА поступает на модуль аналоговых входов МВ110-224.8А (поз. МВ), через специальные компенсационные провода, для компенсации температуры холодных спаев.

Сигналы поступают на обработку в АЦП контроллера, через аналоговые входы МВ, соответственно по сети RS-485. В соответствии с программой контроллер сравнивает сигналы с заданием и формирует компенсирующее воздействие, управляющее твердотельными реле (поз. 4в, 5в, 6в), через которое замыкается или размыкается контакт для включения/выключения ТЭН1, ТЭН2 и ТЭН3 соответственно. Так же ПЛК по сети RS-485 формирует сигнал на пульт оператора для визуализации процесса.

Связь ПЛК, МВ и ПЧ проходит по интерфейсу RS-485.

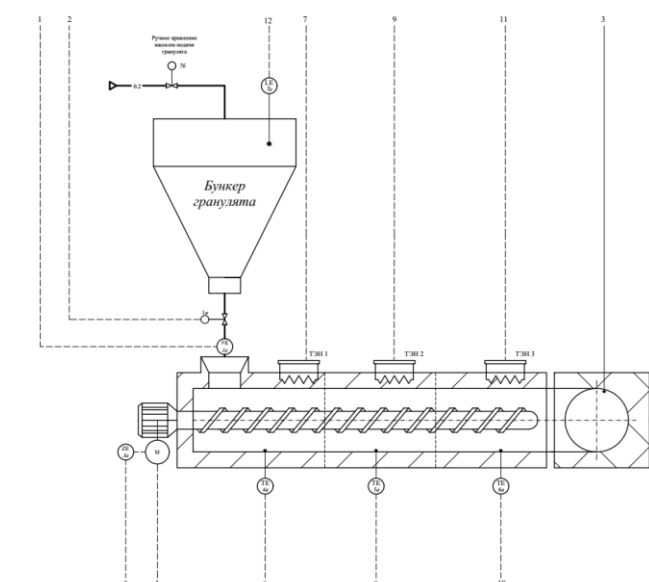
С помощью автоматизированного рабочего места (поз. ПУ) оператор может вести наблюдение за ходом технологического процесса посредством программы визуализации, а также осуществлять выбор режима работы системы («Ручной режим» либо «Автоматический режим»).

Для достижения оптимальных результатов при работе одношнекового экструдера необходимо обеспечить автоматическое управление давлением и температурой процесса. В качестве регулирующего контроллера предлагается использовать ОВЕН ПЛК. ОВЕН ПЛК предлагает программное обеспечение для настройки и программирования контроллеров, а также готовые блок-схемы и алгоритмы управления для различных технологических процессов. Система управления ОВЕН ПЛК обладает широкими возможностями настройки и адаптации под конкретные требования процесса экструзии [5].

Спецификация оборудования приведена на рис.3. [6]

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ (Выводы)

Разработанная система управления позволяет достичь более стабильного процесса экструзии, что приводит к повышению качества полимерной оболочки, а следовательно, к большей эффективности производственного процесса.



| П.п.       | Наименование                                            | Кол. | Примечание |
|------------|---------------------------------------------------------|------|------------|
| 1а         | Расходомер, Multicor S                                  | 1    |            |
| 1б         | Гравиметрический дозатор, SGB 40-4                      | 1    |            |
| 1в         | Сервоклапан клапан, SQUARE D, ADW6, 27-206              | 1    |            |
| 2а         | Датчик давления, Метран-150 TG                          | 1    |            |
| 3а         | Датчик скорости, ENCODER E40H8-2048-6-L-5               | 1    |            |
| 4а, 5а, 6а | Термопара, ТХА003-7                                     | 3    |            |
| 4б, 5б, 6б | Нормирующий преобразователь, НИТТ 1К.15.1.3             | 3    |            |
| 4в, 5в, 6в | Твердотельное реле, OBEH HD-2544.ZD3                    | 3    |            |
| 7а         | Ротационный сигнализатор уровня, OBEH PCS80             | 1    |            |
| 7б         | Вакуумный загрузчик, HAL-300GN                          | 1    |            |
| ПЛК        | Программируемый логический контроллер, OBEH 110-24.30 P | 1    |            |
| МВ         | Модуль аналоговых входов, OBEH MB 110-224.8A            | 1    |            |
| ПЧ         | Преобразователь частоты, Sprint Electric PLX            | 1    |            |
| ПУ         | Сенсорная панель оператора, OBEH СПК 110                | 1    |            |

Рис.3. Спецификация системы автоматического регулирования давления в шнек-прессе

Рис.2. Схема автоматизации системы автоматического регулирования давления в шнек-прессе

## ЛИТЕРАТУРА

1. Системы автоматизации и управления: учебное пособие [для вузов]. Электронное издание / Б. Н. Парсункин, С. М. Андреев, Т. Г. Суханосова, Е. С. Рябчикова ; Магнитогорский гос. технический ун-т им. Г. И. Носова. - 2-е изд. - Магнитогорск : МГТУ им. Г. И. Носова, 2021. - 151 с. - ISBN 978-5-9967-2283-9.
2. Марголис, Б.И. Программы расчета настроек регуляторов в каскадных системах автоматического регулирования / Б.И.Марголис // Вестник ТвГТУ. Вып. 18. Тверь: ТвГТУ, 2011. С.72–76.
3. Мухина, Е. Ю. Системы управления технологическими процессами и информационные технологии : Учебное пособие. Электронное издание / Е. Ю. Мухина, А. Р. Бондарева. – Магнитогорск: Магнитогорский

государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2015. – 110 с.

4. Самарина, И. Г. Метрология и технические измерения : практикум / И. Г. Самарина, Е. Ю. Мухина, А. Р. Бондарева. – Магнитогорск : Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2021. – 57 с. – ISBN 978-5-9967-2154-2. – EDN DDNCF.

5. OBEH оборудование для автоматизации: [сайт]. – Москва, 2018. URL: [https://owen.ru/product/plk110\\_m02](https://owen.ru/product/plk110_m02) (дата обращения 03.03.2024). – Текст. Изображение: электронные.

6. Андреев, С. М. Принципы построения и организации комплексов технических средств в системах автоматического управления : Курс лекций / С. М. Андреев. – Магнитогорск, 2008. – 132 с.

## AUTOMATIC PRESSURE CONTROL SYSTEM IN THE SCREW PRESS WHEN COATING THE GEOPHYSICAL CABLE WITH A POLYMER SHELL

E.YU. Mukhina<sup>1</sup>, D.V. Chmutov<sup>2</sup>

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

**Abstract.** The article discusses the control system of the screw press. Pressure regulation during the extrusion process makes it possible to improve the technical and economic performance of polymer production. A set of automation tools of domestic production has been selected. A cascade pressure control system in a screw press is proposed.

**Keywords:** screw press, automation, control, control circuit, pressure.

#### REFERENCES

1. Parsunkin B.N., Andreev S.M., Sukhonosova T.G., Ryabchikova E.S. Sistemy avtomatisatsii i upravleniya : Uchebnoye posobiye. Elektronnoe izdanie [Automation and control systems : study guide], Magnitogorsk, Magnitogorskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiy universitet im. G.I. Nosova. - 2nd ed., 2021. -151 p. - ISBN 978-5-9967-2283-9.

2. Margolis, B.I. Programs for calculating regulator settings in cascade automatic control systems [Programmy rascheta nastroyek regulyatorov v kaskadnikh sistemakh avtomaticheskogo regulirovaniya], Vestnik TvGTU [Vestnik TvSTU], 2011, no.18, pp.72-76.

3. Mukhina E.Yu., Bondareva A.R. Sistemy upravleniya tekhnologicheskimi protsessami i informatsionnye tekhnologii : Uchebnoe posobie. Elektronnoe izdanie, Magnitogorsk,

Magnitogorskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiy universitet im. G.I. Nosova, 2015, 110 p.

4. Samarina I.G., Mukhina E.Yu., Bondareva A.R. Metrologiya i tekhnicheskie izmereniya : praktikum, Magnitogorsk, Magnitogorskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiy universitet im. G.I. Nosova, 2021, 57 p. – ISBN 978-5-9967-2154-2.

5. OVEN oborudovaniye drya avtomatisatsii [OVEN automation equipment]. Available at [https://owen.ru/product/plk110\\_m02/](https://owen.ru/product/plk110_m02/) (accessed 3 March 2024).

6. Andreev S.M. Principy postroeniya i organizatsii kompleksov tehnikeskikh sredstv v sistemakh avtomaticheskogo upravleniya [Principles of construction and organization of complexes of technical means in automatic control systems]. Magnitogorsk, NMSTU Publ., 2008. 132 p. (In Russian)

Мухина, Е.Ю. Система автоматического регулирования давления в шнек-прессе при покрытии полимерной оболочкой геофизического кабеля / Е.Ю. Мухина, Д.В. Чмутов // Автоматизированные технологии и производства. 2024. №1(29). С.25-28.

E.YU. Mukhina, D.V. Chmutov Automatic Pressure Control System in The Screw Press When Coating the Geophysical Cable With a Polymer Shell. Avtomatizirovannye tekhnologii i proizvodstva [Automation of technologies and production], 2024, no.1(29), pp.25-28. (In Russian).

# РЕГУЛИРОВАНИЕ ТОЛЩИНЫ ПОЛОСЫ НА ШИРОКОПОЛОСНОМ СТАНЕ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ

Н.М. Лапин, И.Г. Самарина

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

[recful@bk.ru](mailto:recful@bk.ru), [ig.samarina@magtu.ru](mailto:ig.samarina@magtu.ru)

**Аннотация.** Рассмотрена система регулирования толщины полосы на широкополосном стане 2000 горячей прокатки, реализующая принцип Gaugemeter – абсолютно жесткая клеть. Представлена техническая реализация рассмотренной САРТ. Рассмотрен способ автоматической коррекции межвалкового зазора в ходе прокатки, реализованный в алгоритмах действующей системы автоматического регулирования толщины (САРТ) полосы

**Ключевые слова:** толщины, широкополосный стан горячей прокатки, система автоматического регулирования, полоса, разнотолщинность, коррекция

## ВВЕДЕНИЕ

Системы автоматического регулирования толщины (САРТ), применяемые в настоящее время в качестве исполнительного устройства, используют гидравлические нажимные устройства (ГНУ). Это связано со скоростью перемещения ГНУ, она в 2,5 раза больше скорости электро-механических нажимных винтов (ЭНВ). При небольших перемещениях время регулирования примерно 35 мс. ЭНВ используются только во время переделки стана или при перестройке стана на другой сортament выпускаемой продукции [1, 2].

САРТ строится на косвенном и прямом методе регулирования.

Косвенным методом – метод Симса-Головина. В данном методе отсутствует транспортное запаздывание, но имеется статическая ошибка, обусловленная несоответствием фактической и расчетной жесткостью клетки. И косвенный метод не учитывает всех возмущающих воздействий: неточность установки валков, изменение параметров клетки, перегрев или износ валков. Эти системы часто дополняются системой компенсации по сигналу от выходного толщиномера.

На отечественных и зарубежных станах часто встречается САРТ Davu McKee, работает по принципу Gaugemeter (Гейджметр) – абсолютно жесткая клеть [1]. Рассмотрим эту систему подробнее.

## ПРИНЦИП ПОСТРОЕНИЯ САРТ ПРОКАТА НА СТАНЕ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ

Режим Gaugemeter разработан НИИ BISRA и фирмой Davu McKee и представляет собой средства повышения жесткости клетки выше ее нормального, собственного значения. Схема системы одной клетки показана на рисунке 1.

В этом режиме первоначально настройка выполняется в режиме управления положением. Далее нагрузка корректируется с учетом упругости клетки и определяется необходимая величина упругого растяжения.

Эта величина применяется для корректировки положения на растяжение клетки при входе полосы в клеть. При прокатке давление на валки измеряется непрерывно и по нему рассчитывается упругое растяжение клетки. При отклонении от прогноза эти значения вводятся во в контуры управления положением как динамическая компенсация [3, 8].

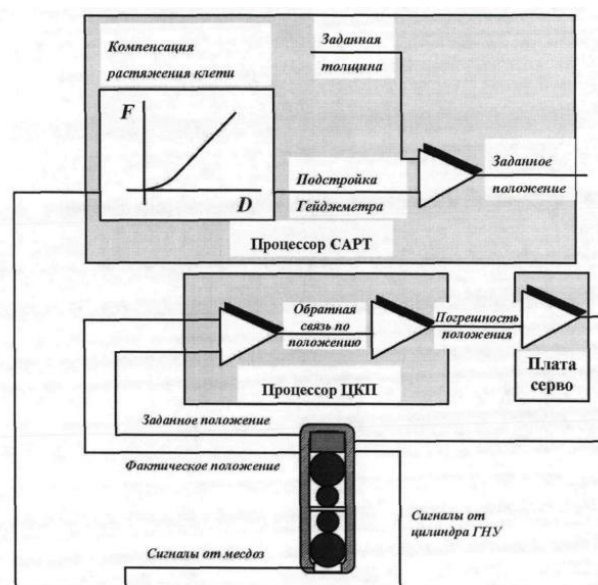


Рис. 1. Схема системы Gaugemeter в САРТ с гидравлическими НУ

При выполнении только коррекции, т.е. включен режим Gaugemeter, клеть становится бесконечно жесткой. В этом случае раствор валков не меняется под воздействием разнотолщинности или от изменений жесткости полосы и на

выходе имеем константную толщину. Главный минус режима Gaugemeter это влияние эксцентриситета валков (оттиск биения валков) [2]. Поэтому совместно с CAPT применяется модуль компенсации биения валков.

Реализация принципа Gaugemeter осуществляется на основе одноклетевых контроллеров, рисунок 2. Но в качестве общего контроллера применяют многоклетевой контроллер. Он получает данные о выходной толщине проката через обратную связь от толщиномера. В системе есть

функция компенсации обжатий, обеспечивающая увеличение устойчивости контроллеров, регулирующих положение петледержателей. Это аналоговые сигналы, передаваемые в систему управления скорости двигателей от чистовых клетей с 7 по 13 [4].

Алгоритм контура регулирования толщины представлен на рис.3.

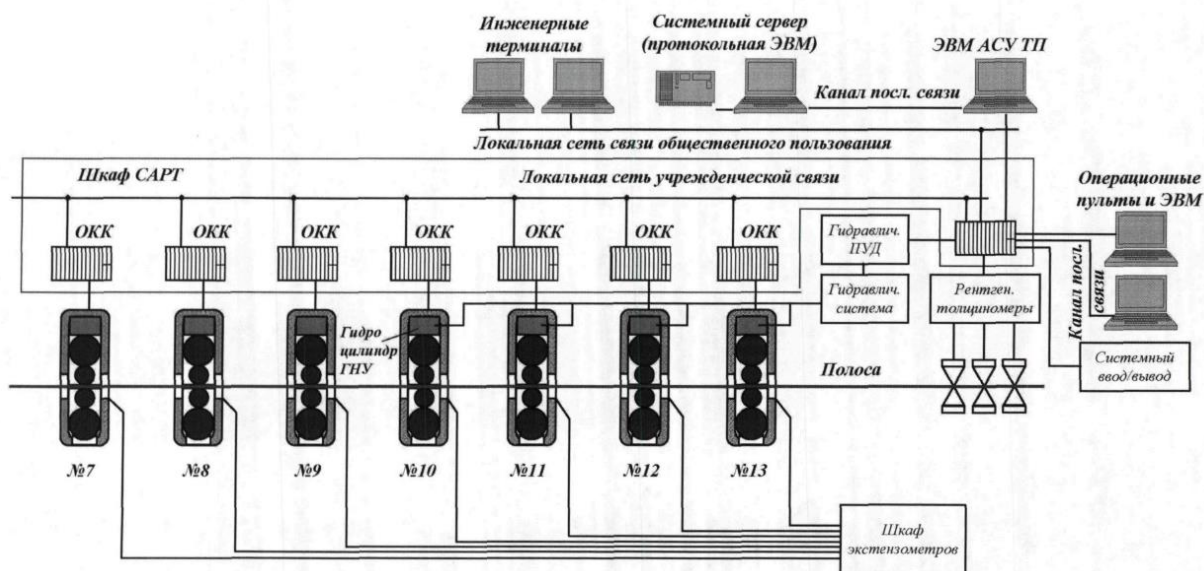


Рис. 2. Принципиальная-схема гидравлической CAPT Davy McKee  
ОКК одноклетевые контроллеры; ПУ панели оператора; ЭВМ машина сбора данных

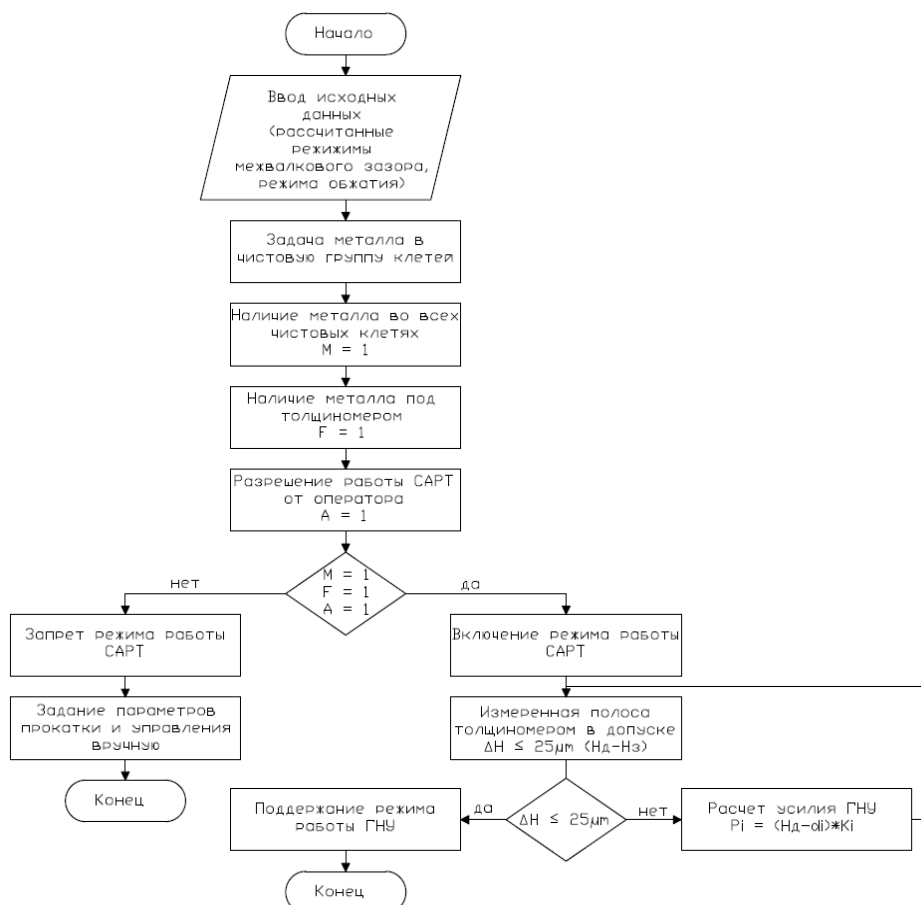


Рис. 3. Алгоритм работы системы регулирования толщины полосы в чистовой группе клетей

Первоначально осуществляется сбор исходных данных: рассчитанные режимы межвалкового зазора и режим обжатия в клетях (с учетом прокатываемой толщины).

Далее следует задача металла в чистовую группу. Проверяется параметр М (наличие металла во всех клетях чистовой группы). Если металла есть во всех клетях, М принимает значение 1.

Параметр F отвечает за наличие металла под измерителем толщины, если это выполняется F = 1.

Далее необходимо разрешение оператора для работы САРТ, это параметр А = 1.

При соблюдении условий М = 1, F = 1 и А = 1 включается САРТ в работу, иначе поступает запрет на работу САРТ и управление осуществляется оператором вручную.

Далее проверяется условие, что измеренная толщина полосы (значение с толщиномера) меньше ли равна 25 мкм, т.е.  $(H_{дейст} - H_{зад}) \leq 25$  мкм. Если данное условие не выполняется, то усилия ГНУ рассчитываются снова по формуле  $P_i = (H_{дейст} - d_i) \cdot K_i$  [5, 1].

#### ТЕХНИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ САРТ

Схема автоматизации контура регулирования толщины полосы на рис. 4.

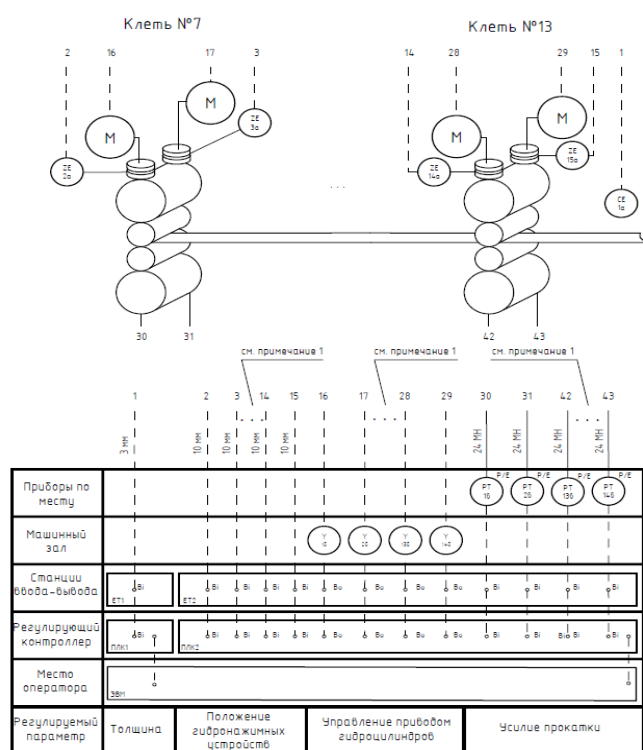


Рис. 4. Функциональная схема системы регулирования толщины полосы в чистовой группе клетей

Для измерения толщины полосы в чистовой группе клетей, за 13 клетью установлен профиломер IMS MSR-Lascon, поз. 1а. Толщиномер выдает аналоговый сигнал 4...20 мА на станцию ввода-вывода поз. ЕТ1, сигнал с которой поступает на микропроцессорный контроллер, поз. ПЛК1, типа Simatic S7-400.

Микропроцессорный контроллер позволяет выполнять оперативное управление с использованием персональной

ЭВМ, поз. ЭВМ, типа промышленный компьютер, Simatic IPC527G.

Для измерения положения штока гидроцилиндра используется датчик DAVY DL1000, поз. 2а...15а, сигнал с которых идет на станцию ввода-вывода поз. ЕТ2 и на следующий микропроцессорный контроллер Simatic S7 – 400, поз. ПЛК2.

Датчики месдозы поз. 1в...14в, предназначен для измерения усилия прокатки в чистовой группе клетей, сигнал с которых так же идет на станцию ввода-вывода поз. ЕТ2 и контроллер.

Управление перемещением гидроцилиндров осуществляется через тиристорные преобразователи типа ЭКТ 550/440 поз. 1б...14б, сигнал с которых так же идет на станцию ввода-вывода поз. ЕТ2 и контроллер.

С помощью автоматизированного рабочего места (поз. АРМ) оператор может вести наблюдение за ходом технологического процесса посредством программы визуализации, а также осуществлять выбор режима работы системы («Ручной режим» либо «Автоматический режим») [6, 7].

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

САРТ чистовой группы клетей включает в себя: ГНУ (гидронажимные устройства), саму систему регулирования толщины и систему противоизгиба рабочих валков клетей 10-13.

Основной регулятор системы выполнен по принципу косвенного регулирования толщины полосы с коррекцией по толщиномеру на выходе чистовой группы.

Для устранить многих видов разнотолщинности полосы используется режим Gaugemeter (абсолютно жесткая клеть), т.е. обеспечивается повышенная жесткость клетки (выше её). В этом режиме необходимая нагрузка согласуется с характеристикой упругого растяжения клетки, которая определяется косвенно по измеренному давлению. И все отклонения от требуемого растяжения клетки вводятся как коррекция в контуры управления положением ГНУ.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Карандаев А.С. Следящая система автоматического регулирования толщины полосы стана горячей прокатки А.С. Карандаев, В.Р. Храмин, С.А. Петряков // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. – 2011. – № 3. С. 25 – 29
2. Карандаев А.С. Исследование системы автоматической коррекции толщины полосы на широкополосном стане горячей прокатки / А.С. Карандаев, В.Р. Храмин // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2013. – №2. – С. 39-46. – EDN PZFOVT.
3. Hydraulic automatic gauge control // Davy McKee (Sheffield) Ltd. 1987
4. Способ коррекции разнотолщинности головного участка полосы в системе автоматического регулирования толщины широкополосного стана горячей прокатки / А.С. Карандаев, В.Р. Храмин, И.Ю. Андрюшин [и др.] // Электротехника. – 2013. – № 8. – С. 34-38. – EDN QIRCQF.
5. 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.

6. Мухина, Е. Ю. Проектирование автоматизированных систем: Конспект лекций. Электронное издание / Е.Ю. Мухина. – Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2015. – EDN ZRZBFL.

7. Андреев, С. М. Принципы построения и организации комплексов технических средств в системах автоматического управления: Курс лекций / С.М. Андреев. – Магнитогорск, 2008. – 132 с. – ISBN 978-5-89514-980-5. – EDN PVSXAH.

8. Андреев, С. М. Автоматизированная система управления топливосберегающим несимметричным нагревом металла перед прокаткой в современных методических печах / С. М. Андреев, Б. Н. Парсункин, Д. В. Нужин // Автоматизация и современные технологии. – 2010. – № 1. – С. 14-20. – EDN KYVNBK.

## THICKNESS CONTROL SYSTEM OF THE STRIP IN THE 2000 WIDE HOT STRIP MILL

N.M. Lapin, I.G. Samarina

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

**Abstract.** The thickness control system of the strip in the 2000 wide hot strip mill, implementing the Gaugemeter principle – an absolutely rigid mill stand, has been considered. The technical implementation of the discussed automatic thickness control system is presented. The article offers a method for automatic correction of the roll gap during rolling, the algorithms implemented in the current system of automatic control of the thickness (SART) band.

**Keywords:** thickness, the hot rolling broad-strip mill, the automatic control system, strip, gauge interference, compensation.

### REFERENCES

1. Karandaev A.S., Khrumshin V.R., Petryakov S.A. Tracking System of Automatic Control of Strip Thickness of Hot Rolling Mill [Sledyashchaya sistema avtomaticheskogo regulirovaniya tolshchiny polosy stana goryachei prokatki]. Vestnik MGTU im. G.I. Nosova, 2011, no. 3, pp. 25–29. (In Russ.)

2. Karandaev A.S., Khrumshin V.R. Investigation of the automatic thickness correction system in a wide hot strip mill [Issledovanie sistemy avtomaticheskoy korrektsii tolshchiny polosy na shirokopolosnom stane goryachei prokatki] Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Elektromekhanika Russian Electromechanics, 2013, no. 2, pp. 39–49. (In Russ.)

3. Hydraulic automatic gauge control // Davy McKee (Sheffield) Ltd. 1987

4. Method for correction of gauge interference of the head-strip section in a system for automated controlling of the thickness of a broad-strip hot-rolling mill [Sposob korrektsii raznotolshchinnosti golovnogo uchastka polosy v sisteme avtomaticheskogo regulirovaniya tolshchiny shirokopolosnogo stana goryachei prokatki] / A.S. Karandaev, V.R. Khrumshin, I. Andryushin Yu [et al.] // Russian Electrical Engineering, 2013.

Vol. 84, no. 8, pp. 441-445. – DOI 10.3103/S1068371213080087. – EDN VNKXBB.

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

6. E. Yu. Mukhina. Design of automated systems [Proyektirovaniye avtomatizirovannykh sistem],[Electronic resource], Magnitogorsk: MSTU, 2015

7. Andreev S.M. Principy postroeniya i organizatsii kompleksov tehnikeskikh sredstv v sistemah avtomaticheskogo upravleniya [Principles of construction and organization of complexes of technical means in automatic control systems]. Magnitogorsk, NMSTU Publ., 2008. 132 p. (In Russian).

8. Andreev S.M., Parsunkin B.N., Nuzhin D.V. Automatic control system of the fuel preserve asymmetrical metal heating before rolling in the contemporary methodological ovens. *Avtomatizatsiya i sovremennye tehnologii* [Automation and modern technologies], 2010, no.1, pp. 14-20. (In Russian).

Лاپин, Н.М. Регулирование толщины полосы на широкополосном стане горячей прокатки / Н.М. Лапин, И.Г. Самарина // Автоматизированные технологии и производства. 2024. №1(29). С.29-32.

N.M. Lapin, I.G. Samarina Thickness Control System Of The Strip in the 2000 Wide Hot Strip Mill. *Avtomatizirovannye tehnologii i proizvodstva* [Automation of technologies and production], 2024, no.1(29), pp.29-32. (In Russian).

## СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРОЙ САМООТПУСКА АРМАТУРЫ НА МЕЛКОСОРТНОМ СТАНЕ 250

К.В. Абрамкин, И.Г. Самарина

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

ig.samarina@magtu.ru

**Аннотация.** В статье рассмотрена система автоматического управления температурой самоотпуска арматуры на мелкосортном стане 250. Управление температурой самоотпуска арматур осуществляется системой управления охлаждающими секциями УТУ. Главной задачей системы управления охлаждающими секциями является стабилизация механических свойств арматуры, что позволяет получить продукцию с требуемыми характеристиками

**Ключевые слова:** температура, регулирование, стан, самоотпуск, арматура, термическое упрочнение

## ВВЕДЕНИЕ

Один из значимых агрегатов в прокатном производстве – установка термического упрочнения (УТУ).

УТУ предназначена для производства на стане 250 термически упрочненного проката повышенной прочности. Автоматизация установки играет ключевую роль для соответствия заявленных механических характеристик выпускаемого проката требованиям государственных отраслевых стандартов.

Управление температурой самоотпуска арматуры базируется на системе управления охлаждающими секциями УТУ.

Основное назначение СУ охлаждающими секциями это стабилизации механических свойств арматуры и необходима для того, чтобы получаемые из арматуры строительные конструкции гарантированно обладали заранее рассчитанной несущей способностью и устойчивостью [1].

Стабилизация же механических свойств позволяет гарантированно получать продукцию с заявленными характеристиками. Что играет ключевую роль для дальнейшей безопасной эксплуатации зданий и сооружений, без необходимости ремонта, усиления или замены их конструкций. Поэтому разработка данной системы актуальна [2].

Установка предназначена для производства на стане 250 термически упрочненной арматурной стали повышенной прочности классов А400С, А500С и Ат600 и высокой прочности классов Ат800-Ат1200 в соответствии с требованием ГОСТ 10884 четвертым методом прерванной закалки с самоотпуском (при непрерывном и ступенчатом охлаждении) [3, 4].

Температура раскатов за последней чистовой клетью стана при входе в УТУ составляет примерно 1000 °С.

## РЕАЛИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ОХЛАЖДАЮЩИМИ СЕКЦИЯМИ МЕЛКОСОРТНОГО СТАНА 250

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

В состав основного оборудования для производства на стане термоупрочненного проката входят: насосная станция высокого давления с подачей охлаждающей воды к секциям УТУ; оборудование очистки отработанной воды; транспортный рольганг с приводными роликами, оборудование принудительного охлаждения проката в процессе его перемещения от последней чистовой клетки к холодильнику; трубопровод подачи сжатого воздуха, обеспечивающий отсекание воды по выходу раскатов из коробов секции охлаждения; оборудование для перемещения секций УТУ в поперечном направлении относительно линии проката.

УТУ на левой и правой нитках стана состоит из семи секций-платформ, расположенных последовательно друг за другом за чистовой клетью перед летучими ножницами, представлено на рисунке 1.

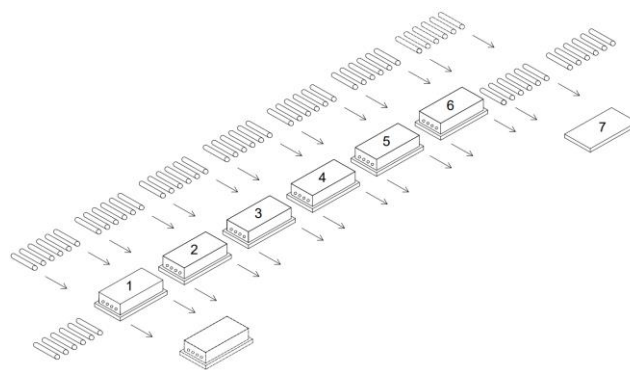


Рис. 1. Установка термического упрочнения

Каждая секция имеет платформу, которая установлена на рельсах и может перемещаться пневмоцилиндрами поперек линии прокатки. На платформах параллельно установлены короба водяного охлаждения и транспортирующие ролики с четырех-ручьевыми секционными желобами. Перемещение платформы обеспечивает возможность установки в линию прокатки либо коробов водяного охлаждения, либо транспортного ролянга. Пневмоцилиндры перемещения секции установлены с внешней стороны от линии прокатки.

Состав оборудования УТУ на левой и правой нитках стана идентичен, а исполнение зеркальное.

Подвод энергоносителей (воды и воздуха) к каждой из секций УТУ осуществляется гибкими рукавами при помощи быстроразъемных соединений (БРС).

От сетевых магистралей подвод воды к секциям установки осуществляют гибким рукавом диаметром 150 мм, а сжатый воздух – рукавом диаметром 75 мм.

Подача воды высокого давления к корпусам форсунок в коробах водяного охлаждения всех семи секций УТУ производится от индивидуальных коллекторов (водяных подводов), смонтированных под коробом водяного охлаждения.

Входной конец патрубков коллектора сжатого воздуха от цеховой системы к коллектору воздушных форсунок линии охлаждения, смонтированному под коробом секции, как по левой стороне, так и по правой стороне стана.

Сброс отработанной охлаждающей воды из коробов УТУ производится через отверстия в их днище и платформе в канал шириной 700 мм. Причем, места сброса воды из коробов по левой и правой ниткам стана фиксированные и расположены в районе водяных отсеков.

Для проката без термоупрочнения в линию прокатки вводится транспортный ролянг секции, это обеспечивается перемещением платформы охлаждающей секции. Отсоединение подводов воды и сжатого воздуха, как и открывание и закрывание водяных и воздушных задвижек от магистралей к секциям УТУ, производится с внешней стороны линии прокатки стана.

При производстве термоупрочненного проката, в зависимости от диаметра охлаждаемого профиля, используется определенное число охлаждающих секций термоустановки (от одной до семи). При этом транспортирование раскатов на участке чистовая клеть – летучие ножницы стана осуществляются собственно чистовой прокатной клетью и посредством гидротранспортирования камерами охлаждения термоустановки [5].

Для получения требуемого класса прочности арматурного проката каждый пруткок охлаждается автономно в собственном устройстве охлаждения. С целью улучшения равномерности охлаждения и получения одинаковых свойств металла при производстве арматурного проката установлены трубы и отсечки одних типов и диаметров для всех ниток. В зависимости от нужной марки стали и номера профиля, вводится в работу определенное количество секций охлаждения [6].

Основной задачей УТУ является охлаждение проката до температуры самоотпуска.

Процесс охлаждения зависит от многих факторов, ключевые из них это: скорость движения проката, диаметр профиля, давление воды в секциях охлаждения, температура охлаждающей воды, давление сжатого воздуха.

В установке УТУ принудительное охлаждение арматурных профилей, выходящих из последней чистовой клетки, осуществляется движущимся в закрытых камерах (охлаждающих секциях) потоком воды. Скорость движения потока воды должна превышать скорость движения проката на 10-15 м/с.

Регулирование давления в секции охлаждения происходит за счет исполнительного механизма, который управляет задвижкой в трубопроводе.

Давления в секциях охлаждения рассчитываются исходя из текущей температуры арматурных профилей до УТУ, опорного задания температуры самоотпуска и дополнительной коррекции по текущей температуре самоотпуска.

С учетом основного требования к системе автоматизации - достижения температуры самоотпуска по всей длине арматуры, была разработана структурно-функциональная схема, она представлена на рисунке 2.

Требования к системе автоматического управления охлаждающими секциями: достижение температуры самоотпуска по всей длине арматуры; контроль и фиксация параметров технологического процесса; централизованное управление с использованием автоматизированного рабочего места.

Задачи САУ: поддержание температуры самоотпуска; контроль за технологическим процессом; дистанционное ручное управление температурой самоотпуска.

Достижение температуры самоотпуска осуществляется за счет теоретического расчета в математической модели давления в каждой охлаждающей секции, исходя из температуры арматуры до УТУ и дополнительной коррекции по текущей температуре самоотпуска.

Контроль параметров технологического процесса осуществляется за счет: датчиков давления, для контроля давления воды в охлаждающих секциях; контроля за положением исполнительного механизма (ИМ); двух пирометров для контроля температуры до установки термического упрочнения и температуры самоотпуска после установки.

Фиксация параметров технологического процесса осуществляется за счет АРМ оператора, где давление воды и сжатого воздуха в каждой из охлаждающих секций отображается в виде графиков. Таким же образом отображается и текущая температура до установки термического упрочнения, и температура самоотпуска.

Или же, за вместо поля задания текущей температуры, добавить выбор марки стали и текущего профиля проката, которую хотят получить, для автоматического задания температуры самоотпуска. Но для корректной и стабильной работы системы необходимо, чтобы были определены коэффициенты охлаждения и количество необходимых охлаждающих секций, для каждой марки стали и профиля проката.

Все данные технологического процесса, в том числе моменты переключения режимов работы, должны храниться в базе данных [7].

На основе структурной схемы рисунка 2 была разработана схема автоматизации системы автоматического управления охлаждающими секциями установки термического упрочнения.

Для измерения температуры арматуры до УТУ и температуры самоотпуска используется высокоточный оптоволоконный пирометр частичного излучения с узким спектральным диапазоном Термоскоп-600-1С-СТ0.

Все сигналы с измерительных датчиков и преобразователей приходят в управляющий контроллер PLC Siemens S7-1200, где реализуется закон регулирования. Управляющий контроллер обменивается информацией с промышленным компьютером, а ЭВМ, в свою очередь, передает информацию на панель оператора и рассчитывает математическую модель [9].

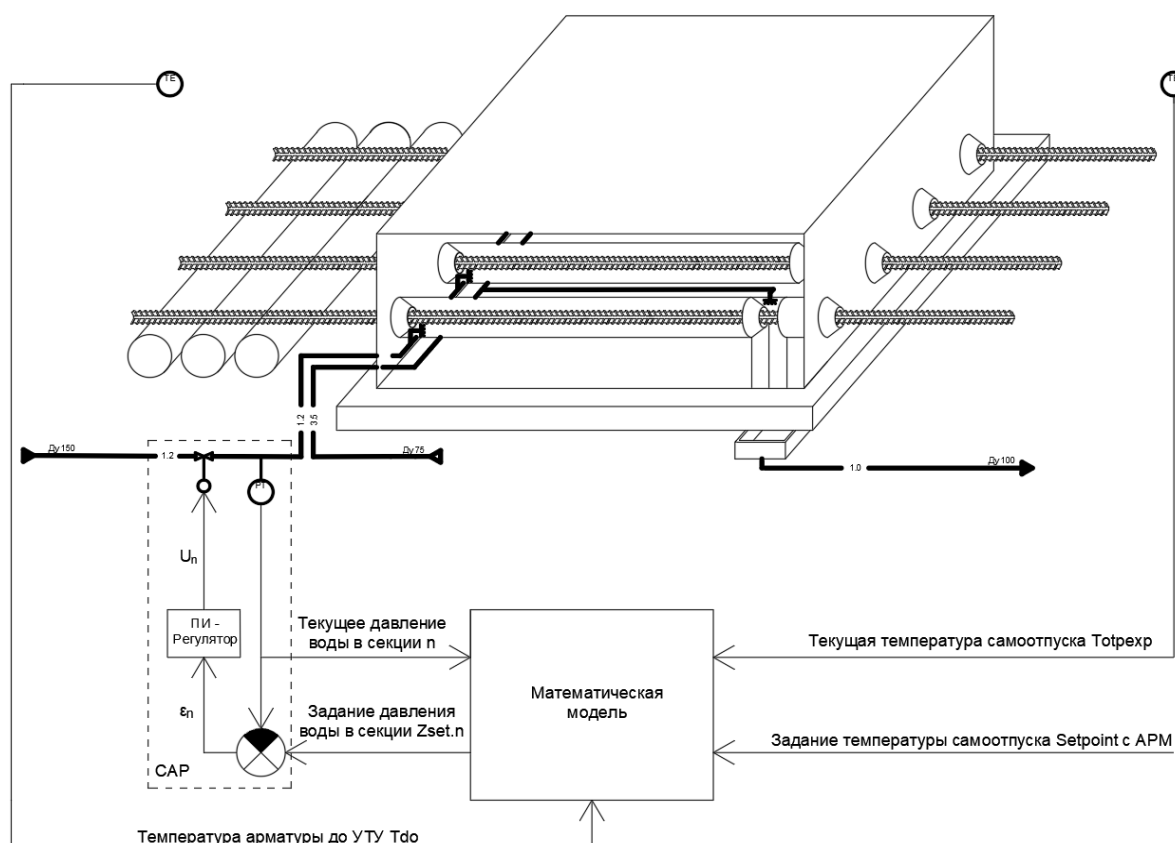


Рис. 2. Структурно-функциональная схема системы управления охлаждающими секциями

Диапазон измерения температуры составляет от 300 до 1200 °С, с точностью до 0,5%. Быстродействие пирометра составляет 20 мс. Данный пирометр состоит из оптической головки и блока процессора (контроллер), соединенных между собой оптоволоконным кабелем, по которому контролируется инфракрасное излучение [8].

Компактность прибора и гибкий оптоволоконный кабель позволяют устанавливать головку в труднодоступных местах. Кабель и головка не чувствительны к воздействию электромагнитных полей. Защиту от ударов и влияния агрессивной окружающей среды обеспечивает рукав из нержавеющей стали.

В качестве датчика избыточного давления используется Метран-150-TG. Датчик Метран-150-TG является интеллектуальным, цифровым датчиком давления (избыточного, абсолютного, дифференциального) и применяется для осуществления непрерывного измерения давления с мгновенным преобразованием измеренного значения в унифицированный аналоговый выходной сигнал (токовый выход).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Без обеспечения автоматизации процесса упрочнения сортовой прокат не будет достигать заданной температуры самоотпуска из-за неравномерного нагрева и охлаждения, что приведет к потере заявленных механических свойств и совершенной неконкурентоспособности данного изделия на рынке.

Для достижения заявленных механических свойств сортового проката и поддержание этих свойств по всей длине заготовки, необходима автоматизация процесса упрочнения. Это будет достигаться поддержанием температуры самоотпуска.

Автоматизация устранил неравномерное охлаждение путем расчета давлений воды в охлаждающих секциях, скомпенсирует неравномерность нагрева путем коррекции по температуре до УТУ и скомпенсирует прочие возмущения на УТУ за счет дополнительной коррекции по температуре самоотпуска.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Шабалов И.П. Термомеханическое и термическое упрочнение стали для металлических конструкций / И.П. Шабалов – Москва: Металлургия, 2004. – 63с. – ISBN 5-902194-14-8

2. Сергеев Н.Н. Влияние температуры отпуска на структуру и механические свойства термомеханически упрочненного арматурного проката / Н. Н. Сергеев, А. Н. Сергеев, С. Н. Кутепов и др. // Чебышевский сборник. – 2021. – № 5 (81). – С. 328-339. – ISSN 2226-8383. // Лань: ЭБС. URL: <https://reader.lanbook.com/journalArticle/630479> (дата обращения: 06.07.2024)

3. Титов М.И. Совершенствование технологии производства арматурной стали периодического профиля № 25, 28, 32 класса 500 / М.И. Титов, А.В. Русаленко, В.В. Гордиенко // Литье и металлургия. – 2013. – № 3. – С. 12-14. – ISSN 1683-6065. // Лань: ЭБС. — URL: <https://reader.lanbook.com/journalArticle/183876> (дата обращения: 06.07.2024)

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

5. Бигеев В.А. Основы металлургического производства / В.А. Бигеев, К.Н. Вдовин, В.М. Колокольцев и др. – 4-е изд., стер. – Санкт-Петербург: Лань, 2023. – 616 с. – ISBN 978-5-507-45395-5 // Лань: ЭБС. URL:

<https://e.lanbook.com/book/267362> (дата обращения: 06.07.2024)

6. Тронза Е. И. Теория термической обработки: учебно-методическое пособие / Е.И. Тронза, С.А. Тюрина. – Москва: РТУ МИРЭА, 2021. – 131 с. – Текст: электронный // Лань: ЭБС. URL: <https://e.lanbook.com/book/182548> (дата обращения: 06.07.2024)

7. <https://nlmk.com/ru/> (дата обращения 06.07.2024) НЛМК-УРАЛ: Технология

8. Самарина И.Г. Метрология и технические измерения: практикум / И.Г. Самарина, Е.Ю. Мухина, А.Р. Бондарева. – Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2021. – 57 с. – ISBN 978-5-9967-2154-2

9. Требования по выполнению курсовых проектов (работ) по образовательной программе «Системы и средства автоматизации технологических процессов»: Электронный образовательный ресурс / С. М. Андреев, Е. Ю. Мухина, И. Г. Самарина, Т. Г. Сухоносова. – Магнитогорск: ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», 2023. – 115 с. – EDN JYOGMH.

10. Андреев, С. М. Определение коэффициентов аналитических зависимостей теплофизических свойств стали от температуры / С. М. Андреев, М. С. Галдин // Автоматизация технологических и производственных процессов в металлургии. – 2012. – № 4. – С. 118-126. – EDN PZYNCF.

## AUTOMATIC TEMPERATURE CONTROL SYSTEM FOR THE SELF-TEMPERING OF REINFORCEMENT IN THE SMALL-SECTION ROLLING MILL 250

K.V. Abramkin, I.G. Samarina

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

**Abstract.** The article discusses the automatic temperature control system for the self-tempering of reinforcement in the small-section rolling mill 250. The temperature control of the reinforcement self-tempering is carried out by the cooling section control system UTU. The main task of the cooling section control system is to stabilize the mechanical properties of the reinforcement, which allows for the production of products with the required characteristics.

**Keywords:** temperature, regulation, mill, self-tempering, reinforcement, thermal strengthening.

### REFERENCES

1. SHabalov I.P. *Termomekhanicheskoe i termicheskoe uprochnenie stali dlya metallicheskih konstrukcij* [Thermomechanical and thermal strengthening of steel for metal structures]: Moscow, Metallurgy Publ., 2004 (In Russian)

2. Sergeev N.N., Sergeev A.N., Kutepov S.N. and other The influence of tempering temperature on the structure and mechanical properties of thermomechanically strengthened reinforcing bars [Vliyanie temperatury otpuska na strukturu i mekhanicheskie svoystva termomekhanicheski uprochnennogo armaturnogo prokata], *Chebyshevskii Sbornik* [Chebyshevskii Sbornik.], 2021. № 5 (81). pp. 328-339 (In Russian)

3. Titov M.I., Rusaleno A.V., Gordienko V.V. Improvement of the production technology for periodic profile reinforcing steel No. 25, 28, 32 of grade 500 [Sovershenstvovanie tekhnologii proizvodstva armaturnoj stali periodicheskogo profilya № 25, 28, 32 klassa 500] *Litiyo i Metallurgiya* [Foundry production and metallurgy], 2013. no 3, pp. 12-14. (In Russian)

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

---

5. Bigeev V.A., Vdovin K.N., Kolokol'cev V.M. *Osnovy metallurgicheskogo proizvodstva* [Fundamentals of Metallurgical Production]: Spb, Lan`, Publ., 2023, 616 p (In Russian)

6. Tronza E.I., Tyurina S.A. *Teoriya termicheskoy obrabotki: uchebno-metodicheskoe posobie* [Theory of Heat Treatment: textbook]: Moscow, Mirea Publ., 2021, 131 p (In Russian)

7. <https://nlmk.com/ru/> (6 June 2024) NLMK-Ural: Technology

8. Samarina I.G., Mukhina E. Yu., Bondareva A. R. *Metrologiya i tekhnicheskie izmereniya: praktikum* [Metrology and technical measurements: study guide], Magnitogorsk, Magnitogorsk State Technical University. G.I. Nosova, 2021, 57 p. (In Russian)

9. Andreev S.M., Muhina E.YU, Samarina I.G., Suhonossova T.G. *Trebovaniya po vypolneniyu kursovyyh proektov (rabot) po obrazovatel'noj programme «Sistemy i sredstva avtomatizatsii tekhnologicheskikh processov»: Elektronnyy obrazovatel'nyy resurs* [Requirements for the Completion of Course Projects (Works) under the Educational Program "Systems and Means of Automation of Technological Processes": Electronic Educational Resource], Magnitogorsk, Magnitogorsk State Technical University. G.I. Nosova, 2023, 115 p. (In Russian)

10. Andreev S.M., Galdin M.S. Determination of coefficients of analytical dependences of the thermophysical properties of steel on temperature. *Avtomatizatsiya tekhnologicheskikh i proizvodstvennykh processov v metallurgii* [Automation of technological and production processes in metallurgy]. Magnitogorsk, NMSTU Publ., 2012, pp.118-126. (In Russian)

Абрамкин, К.В. Система автоматического управления температурой самоотпуска арматуры на мелкосортном стане 250 /К.В. Абрамкин, И.Г. Самарина // Автоматизированные технологии и производства. 2024. №1(29). С.33-37.

K.V. Abramkin, I.G. Samarina Automatic temperature control system for the self-tempering of reinforcement in the small-section rolling mill 250. *Avtomatizirovannye tehnologii i proizvodstva* [Automation of technologies and production], 2024, no.1(29), pp.33-37. (in Russian).

УДК 681.516

## СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ РАСХОДА ПРИРОДНОГО ГАЗА ПО ФУРМАМ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ

Т.Г. Сухоносова, Т.Э. Абдулин, С.А. Емельянов

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

tgobuhova@gmail.com

**Аннотация.** В работе представлена система автоматического регулирования расхода природного газа по фурмам доменной печи. При формировании задающего воздействия на расход газа предложено учитывать коэффициент соотношения расхода дутья и природного газа индивидуально для каждой фурмы. Приведены результаты математического моделирования переходных процессов, выбраны технические средства для реализации системы. Автоматическое регулирование расхода газа по фактическому количеству дутья, поступающему через соответствующую фурму, обеспечит более эффективное использование природного газа и, как следствие, снижение общей себестоимости выплавки чугуна в доменной печи.

**Ключевые слова:** доменная печь, расход газа по фурмам, автоматическое регулирование, контур регулирования, коэффициент расхода воздуха, соотношение расходов газа и дутья.

### ВВЕДЕНИЕ

Снижение себестоимости за счет экономии сырья при производстве продукции является одним из важнейших направлений совершенствования технологических процессов. Снижение расхода кокса при производстве чугуна в доменной печи — это актуальная и важная задача развития технологии доменной плавки.

Современные доменные печи потребляют значительное количество ресурсов, среди которых дорогостоящий и дефицитный кокс. Основным видом газообразного топлива, потребляемого доменной печью, является природный газ, который подается через фурмы в горновой части печи вместе с горячим дутьем [1]. Одним из способов экономии кокса является вдувание природного газа, что приводит к увеличению непрямого и уменьшению прямого восстановления, путем замены части углерода кокса на углерод, содержащийся в природном газе [2-5].

Вдувание в горн доменной печи природного газа позволяет повысить экономичность доменной плавки, так как стоимость газа ниже стоимости скипового кокса. Эквивалент замены кокса природным газом составляет 0,6–0,8 кг/м<sup>3</sup> и зависит от расхода газа и распределения процессов восстановления по температурным зонам печи. В связи с этим стремятся поддерживать расход газа на возможно максимальном уровне, превышение которого ведет к ухудшению работы печи [6-8].

Кроме того, важнейшим условием максимально эффективного использования природного газа является правильно выбранное соотношение расходов газа и дутья, которое должно поддерживаться постоянным во времени

процесса и быть равномерным по фурмам. Для ровного расхода шихты соотношение расходов для всех фурм печи должно быть одинаковым. Стабилизация соотношения расходов природного газа и дутья по фурмам способствует смещению процессов восстановления в зону умеренных температур, что позволяет в свою очередь снизить удельный расход кокса [6].

О наличии оптимального значения коэффициента расхода воздуха при сжигании газообразного топлива свидетельствуют работы [9, 10]. Известно, что для полного сжигания 1 м<sup>3</sup> топлива необходимо определенное количество воздуха, значение которого можно рассчитать, и зависит оно от вида топлива, конструкции печи и горелок, температур, специфики технологического процесса. В связи с чем существует способ автоматического управления сжиганием топлива на основе объемного пропорционирования расходов ведущего и ведомого параметров. Такое управление обеспечивается за счёт стабилизации коэффициента расхода воздуха  $\alpha_v$  (соотношения расходов воздуха и топлива).

Для доменной печи ведущим параметром является расход воздуха на фурму, а ведомым параметром – расход газа. В доменную печь подается предварительно увлажненный, обогащенный кислородом и нагретый в воздухонагревателях воздух. Оптимальное значение коэффициента соотношения расходов дутья и газа зависит от конструкции фурм, их количества и вида используемого топлива.

### МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ РАСХОДА ПРИРОДНОГО ГАЗА ПО ФУРМАМ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ

На рис. 1 представлена разработанная структурная схема контура регулирования расхода природного газа на фурму доменной печи. Задание для контура регулирова-

ния формируется по двум методикам: по опорному значению, учитывающему общий расход газа на печь, и индивидуально для каждой фурмы расчетному значению, учитывающему коэффициент соотношения расходов дутья и газа.

Опорное задание на расход газа через фурму  $V_{Г(оп)}$  в самом простом варианте формируется следующим образом: общий расход газа на доменную печь делится на количество фурм для равномерного распределения газа по ним:

$$V_{Г(оп)} = \frac{V_{Г(общ)}}{n}, \quad (1)$$

где  $V_{Г(общ)}$  – общий измеренный расход природного газа на печь ( $\text{м}^3/\text{ч}$ ),  $n$  – число фурменных приборов доменной печи.

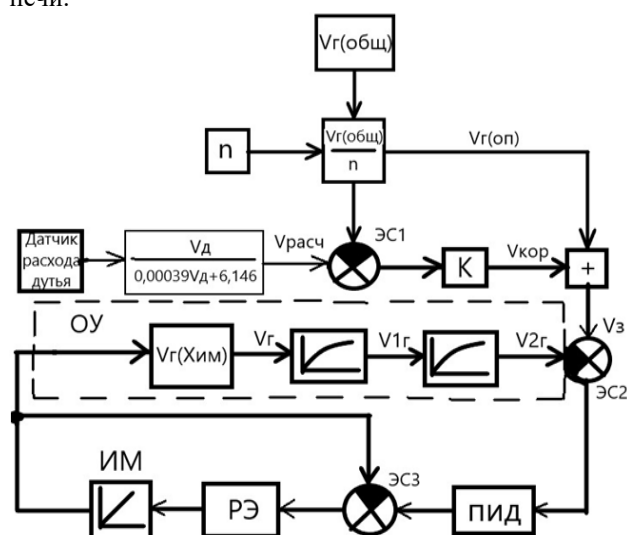


Рис. 1. Структурная схема контура регулирования расхода природного газа на фурму доменной печи

Доменная печь №2 ПАО «ММК» оснащена 20 фурменными приборами, в качестве топлива используется природный газ. Оператор выставляет задание на расход газа для каждой фурмы или в дистанционном режиме управляет положением регулирующей заслонки в соответствии с технологическими требованиями и личной оценкой состояния хода печи. Были проанализированы действующие на производстве диаграммы распределения расходов дутья и газа при нормальном ходе доменной печи, рис. 2.

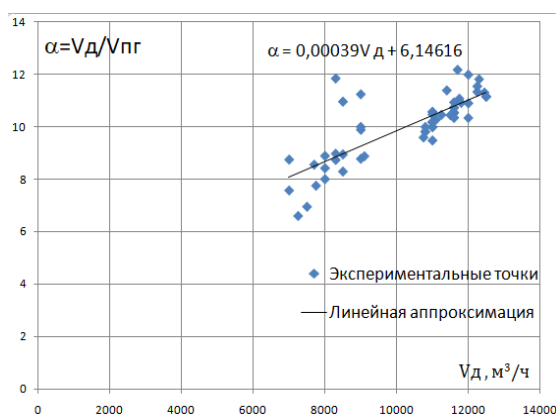


Рис. 2. Зависимость отношения расхода дутья к расходу газа на фурму

На основе данных, рис. 2, рассчитали коэффициент соотношения расходов  $\alpha$  по формуле (5):

$$\alpha = \frac{V_{Д}}{V_{Г}}. \quad (2)$$

Методом наименьших квадратов [11] по экспериментальным данным была получена линейная зависимость значения соотношения расходов дутья к расходу природного газа  $\alpha$  от значения расхода дутья. В данной работе полученную зависимость приняли за оптимальную:

$$\alpha(V_{Д}) = 0,00039V_{Д} + 6,14616. \quad (3)$$

Из уравнения (2) выразим расчетное значение расхода природного газа  $V_{расч}$  в зависимости от текущего расхода дутья  $V_{Д}$  с учетом оптимального коэффициента  $\alpha$  (3) для данной доменной печи:

$$V_{расч} = \frac{V_{Д}}{\alpha(V_{Д})} = \frac{V_{Д}}{0,00039V_{Д} + 6,14616}. \quad (4)$$

Разработанная система интегрируется с системой регулирования расхода дутья на фурмы доменной печи, и сигнал расхода дутья на фурму поступает в систему на вычислитель расхода природного газа по формуле (4).

В элементе сравнения ЭС<sub>1</sub> вычисляется разница между расчетным  $V_{расч}$  и опорным  $V_{Г(оп)}$  значениями расхода.

Значимость влияния соотношения  $\alpha$  при коррекции задания на расход газа задается с помощью коэффициента  $K$  для каждой горелки индивидуально:

- при  $K = 0$  коррекция не осуществляется, и расход газа регулируется только по опорному значению уставки  $V_{Г(оп)}$ ;
- при  $K = 1$  опорное значение не учитывается, и задание на расход газа формируется только по соотношению расходов  $V_{расч}$ ;
- при  $0 < K < 1$  учитываются оба способа формирования задания в контуре.

Скорректированное значение  $V_{кор}$ :

$$V_{кор} = K(V_{расч} - V_{Г(оп)}), \quad (5)$$

где  $K$  – коэффициент ( $0 \leq K \leq 1$ ).

Сигнал  $V_{кор}$  складывается с опорным, и формируется итоговое задание для контура регулирования расхода газа  $V_3$ :

$$V_3 = V_{Г(оп)} + V_{кор} \quad (6)$$

Объект управления представлен несколькими звеньями. Первое звено моделирует статическую характеристику объекта. Была определена статическая характеристика объекта – зависимость расхода природного газа через фурму доменной печи  $V_{Г}$  ( $\text{м}^3/\text{ч}$ ) от положения вала исполнительного механизма  $X$  (%), управляющего регулирующей заслонкой в установившихся режимах:

$$V_{Г}(X) = -0,141X^2 + 29,5571X + 38,4615. \quad (7)$$

Значение  $V_{Г}(X)$  приходит на инерционное звено первого порядка, которое моделирует инерцию в трубопроводе и имеет следующую передаточную функцию:

$$W_1(p) = \frac{1}{T_{об}p + 1}, \quad (8)$$

где  $T_{об}$  – постоянная времени объекта,  $p$  – дифференцирующий преобразователь Лапласа.

Формируется значение  $V_{1г}$ , которое приходит на второе инерционное звено первого порядка, которое моделирует инерцию передачи измерительного сигнала в систему управления с передаточной функцией:

$$W_2(p) = \frac{1}{\tau_3 p + 1}, \quad (9)$$

где  $\tau_3$  – время запаздывания.

Со второго инерционного звена выходит текущее измеренное значение расхода природного газа через фурму  $V_{2г}$ .

Сигнал на выходе ПИД-регулятора  $U(t)$  определим по формуле [10]:

$$U(t) = K_P \left( \varepsilon(t) + \frac{F(t)}{T_{из} p} + T_{II} \frac{\varepsilon(t) - \varepsilon(t - \Delta t)}{\Delta t} \right) + U(0), \quad (10)$$

где  $K_P$  – коэффициент передачи регулятора, %/(м³/ч);  $T_{из}$  – время издрома, с;  $T_{II}$  – время предварения, с;  $\varepsilon(t)$  – сигнал рассогласования, м³/ч;  $t$  – время, с;  $\Delta t$  – шаг дискретизации расчёта, с;  $U(0)$  – начальное значение управляющего воздействия, %;  $F(t)$  – интегральная часть ПИД-закона, вычисляемая по формуле

$$F(t) = F(t - \Delta t) + \varepsilon(t) \cdot \Delta t. \quad (11)$$

На элемент сравнения ЭСЗ приходит сигнал о текущем положении вала  $X(t)$  и значение управляющего воздействия  $U(t)$ , вычисляется разность:

$$U^*(t) = U(t) - X(t) \quad (12)$$

Сигнал  $U^*$  приходит на релейный элемент (РЭ), где определяется направление движения исполнительного механизма (ИМ). Знак переключающей функции  $\sigma(t)$  определяется по условию:

$$\sigma(t) = \begin{cases} 1, & \text{если } U^*(t) \geq Z_H, \\ 0, & \text{если } -Z_H < U^*(t) < Z_H, \\ -1, & \text{если } U^*(t) \leq -Z_H. \end{cases} \quad (13)$$

где  $Z_H$  – зона нечувствительности переключающего реле.

В автоматической системе регулирования используются ИМ постоянной скорости  $K_{им} = \text{const}$ . Положение вала ИМ на следующем шаге расчёта  $t + \Delta t$  определяется по формуле:

$$X(t + \Delta t) = X(t) + \sigma(t) K_{им} \Delta t \quad (14)$$

ИМ перемещает дроссельную заслонку для изменения расхода природного газа на фурму, что влечёт за собой изменение значения расхода газа в сторону достижения заданной величины  $V_3$ . Для расчета переходных процессов в системе управления применяется метод Эйлера, методика подробно изложена в [12].

#### РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМЕ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Расчёт переходных процессов выполнен в среде Microsoft Office Excel по формулам (4)–(14). Постоянная времени объекта  $T_{об} = 5$ , время запаздывания  $\tau_3 = 2$  с. Статическая характеристика рассчитывается по уравнению (7).

Известно, что для регулирования расхода применяется электрический однооборотный ИМ. Например, для МЭО-40/25-0,25М-93, время полного хода  $T_m$  из положения 0 %

в положение 100 % равно 25 с. Значит, максимальная скорость ИМ в таком случае будет равна  $K_{им} = 100/25 = 4$  %/с.

Объект управления имеет нелинейную статическую характеристику. Продифференцировав уравнение (7) получим зависимость для коэффициента передачи объекта  $K_{об}(X)$ :

$$K_{об}(X) = -0,282X + 29,557. \quad (15)$$

Методом модального оптимума [12] были рассчитаны настройки регулятора

$$K_P = \frac{T_{об}}{2K_{об}\tau_3}, \quad T_{из} = T_{об}, \quad T_{об} = \tau_3. \quad (16)$$

Для положения вала ИМ 30 % значения  $K_{об}(30) = 21$  м³/ч/% и настройки регулятора  $K_P = 0,06$  %/(м³/ч),  $T_{из} = 5$  с;  $T_{II} = 2$  с.

Зададим начальные условия  $X(0) = 10$  %,  $V_{1г}(0) = V_{2г}(0) = V_1(0) = 319,93$  м³/ч. Шаг дискретизации  $\Delta t = 0,1$  с. Изменение положения ИМ ограничено значениями 0 и 100 %, соответствующими конечным выключателям. Начальные условия для регулятора:  $U(0) = X(0) = 10$  %,  $F(0) = 0$ ,  $D(0) = 0$ . Ограничение на величину интегральной составляющей закона регулирования  $F_{MAX} = 3000$ . Зона нечувствительности релейного элемента  $Z_H = 1,5$  %.

Допустим, что при определённых условиях опорное задание контура регулирования расхода газа  $V_1(оп) = 800$  м³/ч и измеренный расход дутья  $V_d = 8000$  м³/ч, тогда  $V_{расч} = 863,4$  и  $V_{кор} = 63,4$  м³/ч. Для  $K = 0,5$  по формуле (6) заданное значение  $V_3$  составит 831,7 м³/ч. Переходный процесс представлен на рис. 3

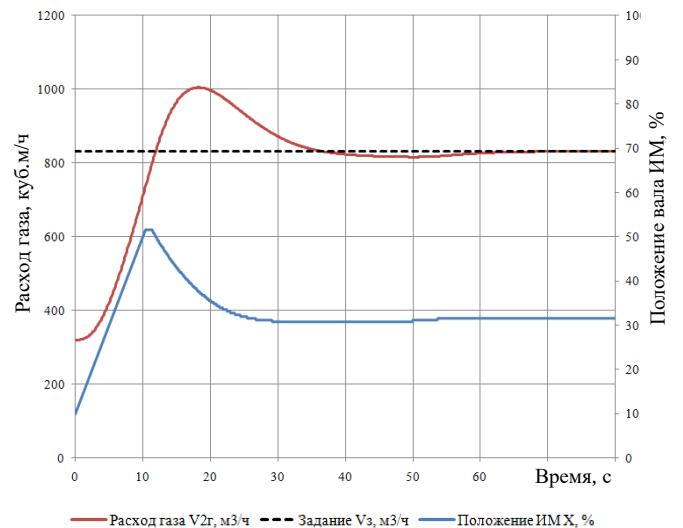


Рис. 3. Переходный процесс в системе с ПИД-регулятором  $K_P = 0,06$  %/(м³/ч),  $T_{из} = 5$  с,  $T_{II} = 2$  с

Прямые показатели качества данного процесса на рис. 3: первое время достижения заданного значения  $t_{p1} = 12$  с, время регулирования  $t_{p2} = 32$  с, перерегулирование 33 %. Для уменьшения перерегулирования вручную были подобраны настройки регулятора:  $K_P = 0,04$  %/(м³/ч),  $T_{из} = 6,5$  с;  $T_{II} = 1,3$  с. График переходного процесса в системе автоматического регулирования расхода газа представлен на рис. 4.

Полученный переходный процесс незначительно отличается по временным показателям от предыдущего. Первое время достижения заданного значения  $t_{p1} = 14$  с, время

регулирования  $t_{p2} = 34$  с, но перерегулирование снизилось до 8,5 %.

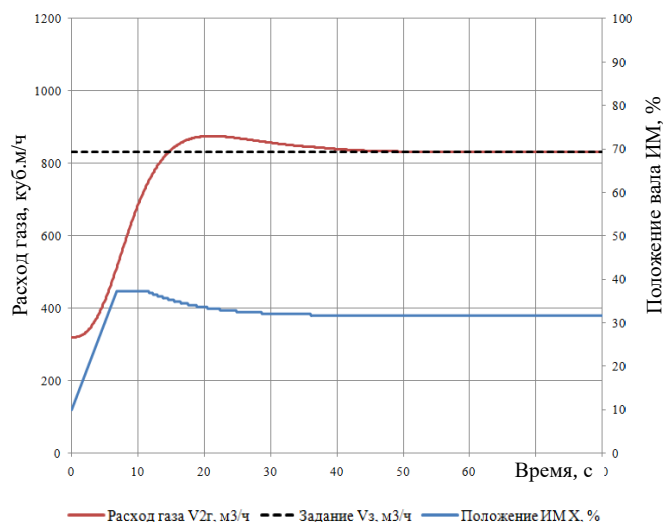


Рис. 4. Переходный процесс в системе с ПИД-регулятором,  $K_p = 0,04 \text{ \%}/(\text{м}^3/\text{ч})$ ,  $T_{из} = 6,5$  с,  $T_{п} = 1,3$  с

#### ТЕХНИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ КОНТУРА РЕГУЛИРОВАНИЯ РАСХОДА ПРИРОДНОГО ГАЗА

Для контура регулирования расхода природного газа по фурмам была разработана соответствующая структурная схема комплекса технических средств (КТС). Структурные схемы КТС и средств автоматизации конкретизируют технические решения, принятые при разработке структурных схем измерения и управления.

На рис. 5 представлена структурная схема КТС регулирования расхода природного газа на фурму доменной печи, для остальных фурм схема аналогична.

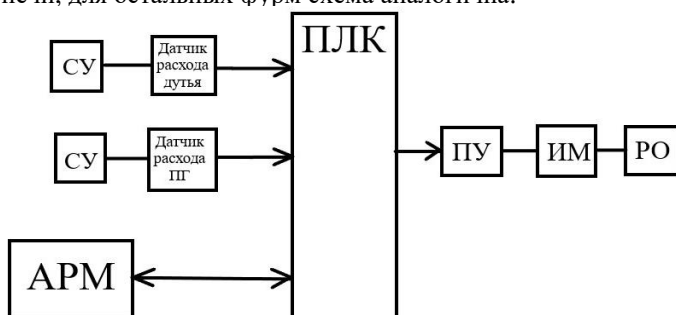


Рис. 5. Структурная схема КТС контура регулирования соотношения расходов дутья и природного газа на фурму доменной печи

В соответствии с разработанной структурной схемой КТС были подобраны технические средства автоматизации.

В качестве сужающих устройств (СУ) были выбраны стандартные камерные диафрагмы ДКС 0,6-65 для природного газа и ДКС 0,6-150 для дутья, где 0,6 – максимально допустимое давление среды (МПа), а обозначения 65 и 150 – условные проходы (мм). В данном контуре ДКС используются как первичные преобразователи расхода для измерения методом переменного перепада давления в комплекте с датчиками разности давлений.

В качестве датчиков расхода дутья и газа в контуре выбраны датчики разности давлений Метран-100-ДД, модель 1442. Максимальный верхний предел измерений датчика составляет 0,63 МПа. Предельно допустимое рабо-

чее избыточное давления 16 МПа.

В качестве программируемого логического контроллера (ПЛК) в контуре, как и для всей доменной печи №2 в настоящее время, применяется SIMATIC S7-400 [13]. На рис. 6 представлена конфигурация стойки с модулями в программной среде SIMATIC Manager. Состав модулей описан далее.

Блок питания с выходом 24 В типа PS 407 4A.

Центральный процессор CPU 412-1 способен решать задачи автоматизации среднего уровня сложности. Наличие комбинированного интерфейса MPI/DP позволяет использовать данный процессор для обслуживания систем распределенного ввода-вывода на основе сети PROFIBUS DP.

Модуль ввода аналоговых сигналов AI16 16Bit с оптоэлектронным разделением внешних и внутренних цепей, имеет 16 аналоговых входов U/I/R, 16 бит.

Модуль вывода дискретных сигналов DO16 DC 24V/2A с оптоэлектронным разделением внешних и внутренних цепей имеет 16 дискретных выходов 24V/2A.

| Slot | Module         | Order number        | Firmware | MPI address | I address | Q address | Comment |
|------|----------------|---------------------|----------|-------------|-----------|-----------|---------|
| 1    | PS 407 4A      | 6ES7 407-0AA00-0AA0 |          |             |           |           |         |
| 2    |                |                     |          |             |           |           |         |
| 3    |                |                     |          |             |           |           |         |
| 4    | CPU 412-1(1)   | 6ES7 412-1XJ05-0AB0 | V5.3     | 2           |           |           |         |
| 5    | MPI/DP         |                     |          | 2           | 4096*     |           |         |
| 6    | AI16x16Bit     | 6ES7 431-7QH00-0AB0 |          |             | 512...543 |           |         |
| 7    | DO16xDC 24V/2A | 6ES7 422-1BH01-0AA0 |          |             |           | 0...1     |         |
| 8    |                |                     |          |             |           |           |         |
| 9    |                |                     |          |             |           |           |         |

Рис. 6. Конфигурация стойки модулей контроллера в Simatic Manager

В качестве исполнительного механизма (на схеме ИМ) в контуре регулирования применяется механизм электрический однооборотный МЭО-40/25-0,25М-93.

В качестве пускового устройства (ПУ) исполнительного механизма выбран бесконтактный реверсивный пускатель ПБР-3А. Пускатель ПБР-3А предназначен для бесконтактного управления электрическими исполнительными механизмами, в приводе которых используются трёхфазные электродвигатели с изолированной нейтралью.

В качестве автоматизированного рабочего места (АРМ) выбран промышленный компьютер Simatic RACK PC IL 43.

Регулирующим органом (РО) является шиберная заслонка в фурменном приборе.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная система автоматического регулирования расхода природного газа по фурмам доменной печи с учётом соотношения фактически расходов природного газа и дутья, поступающих через соответствующую фурму, позволит стабилизировать соотношение расходов. Стабильное соотношение расходов газа и дутья приведет к более эффективному использованию газа, что позволит снизить удельный расход кокса [6].

#### ЛИТЕРАТУРА

- Бигеев В.А. Основы металлургического производства: учебник для вузов / В.А. Бигеев, К.Н. Вдовин, В.М. Колокольцев и др. – Санкт-Петербург: Лань, 2024. – 616 с. – URL: <https://e.lanbook.com/book/397271> (дата обращения: 15.04.2024).
- Парсункин Б.Н. Снижение удельного количества кокса при оптимизации управления подачей природного

газа в доменную печь / Б.Н. Парсункин, С.М. Андреев, Б.К. Сеничкин, О.С. Логунова // Творческое наследие В.Е. Грум-Гржимайло: история, современное состояние, будущее: сб. докл. междунар. науч.-практ. конф. (Екатеринбург, 27–29 марта 2014 г.). – Екатеринбург: УрФУ, 2014. – С. 354-363.

3. Парсункин Б.Н. Автоматизация и оптимизация управления процессом выплавки чугуна в доменных печах: учеб. пособие / Б.Н. Парсункин, С.М. Андреев, Т.Г. Сухонослова. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2018. – 215 с.

4. Парсункин Б.Н. Адаптивное поисково-динамическое управление подачей природного газа в дутье доменной печи / Б.Н. Парсункин, С.М. Андреев, Т.Г. Сухонослова // Электротехнические системы и комплексы. – 2022. – № 2(55). – С. 40-46.

5. Баранкова М.В. Оптимизация управления подачей природного газа в доменную печь с целью минимизации расхода кокса / М. В. Баранкова, Б. Н. Парсункин // Автоматизированные технологии и производства. – 2014. – № 6. – С. 159-164.

6. Сибгатуллин С.К. Стабилизация соотношения расходов природного газа и дутья по фурмам доменной печи / С.К. Сибгатуллин, А.С. Харченко, А.А. Полинов, А.В. Павлов, М.А. Семенюк, В.А. Бегинюк // Теория и технология металлургического производства. – 2014. – № 1(14). – С. 23-25.

7. Макарова И.В. Совершенствование доменной плавки вдуванием горячих восстановительных газов в шахту / И.В. Макарова, Н.Ю. Свечникова, Н.И. Муравьев // Технологии металлургии, машиностроения и материаловедения. – 2022. – № 21. – С. 38-42.

8. Ярошенко Ю.Г. Влияние параметров комбинированного дутья на энергетические затраты при вдувании дополнительного топлива. Энергетическая эффективность

вдувания в доменную печь природного газа / Ю.Г. Ярошенко, Б.К. Сеничкин // Современные научные достижения металлургической теплотехники и их реализация в промышленности: сб. докл. II Междунар. науч.-практ. конф. (Екатеринбург, 18–21 сентября 2017 г.). – Екатеринбург: УрФУ, 2018. – С. 197-203.

9. Парсункин Б.Н. Совершенствование автоматического управления процессом промышленного сжигания газа путем энергосберегающего пропорционирования расходов топлива и воздуха / Б.Н. Парсункин, С.М. Андреев, Т.Г. Сухонослова // Теория и технология металлургического производства. – 2017. – № 2(21). – С. 21-26.

10. 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.

11. Парсункин Б.Н. Задачи по синтезу автоматизированных систем управления технологическими процессами и производством: учеб. пособие / Б.Н. Парсункин, Т.Г. Сухонослова. – Магнитогорск: МГТУ, 2016. – 54 с. – URL: <https://host.megaprolib.net/MP0109/Download/MObject/20773> (дата обращения: 15.04.2024).

12. Парсункин Б.Н. Системы автоматизации и управления: учеб. пособие / Б.Н. Парсункин, С.М. Андреев, Т.Г. Сухонослова, Е.С. Рябчикова. – Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова, 2021. – URL: <https://host.megaprolib.net/MP0109/Download/MObject/3128> (дата обращения: 15.04.2024).

13. 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.

## SYSTEM OF AUTOMATIC CONTROL OF NATURAL GAS FLOW IN BLAST FURNACE TUYERES

T.G. Sukhonosova, T.E. Abdulin, S.A Emelyanov

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation

**Abstract.** The paper presents a system for automatic regulation of natural gas consumption through blast furnace tuyeres. When forming the reference action on gas consumption, it is proposed to take into account the coefficient of the ratio of blast and natural gas consumption individually for each tuyere. The results of mathematical modeling of transient processes are presented. Technical means for implementing the system are selected. Gas consumption is regulated automatically based on the actual amount of blast coming through the corresponding tuyere. This will ensure more efficient use of natural gas and, as a result, a reduction in the overall cost of iron smelting in a blast furnace.

**Keywords:** blast furnace, gas flow rate through tuyeres, automatic control, control loop, air flow coefficient, gas-to-blast flow ratio.

### REFERENCES

1. Bigeev V.A., Vdovin K.N., Kolokoltsev V.M. et al. *Osnovy metallurgicheskogo proizvodstva: uchebnik dlya vuzov* [Fundamentals of metallurgical production: textbook for universities], Saint Petersburg, Lan Publ., 2024. Available at: <https://e.lanbook.com/book/397271> (accessed 15 April 2013).

2. Parsunkin B.N., Andreev S.M., Senichkin B.K., Logunova O.S. Reducing the specific amount of coke when

optimizing the control of natural gas supply to the blast furnace [Snizhenie udelnogo kolichestva koksa pri optimizatsii upravleniya podachey prirodnogo gaza v domennuyu pech], *Tvorcheskoe nasledie V.E. Grum-Grzhimajlo: istoriya, sovremennoe sostoyanie, budushchee: sb. dokl. mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Creative heritage of V.E. Grum-Grzhimailo: history, current state, future: collection of scientific papers of the international scientific and

practical conf., Ekaterinburg, March 27–29, 2014], Ekaterinburg, UrFu Publ., 2014, pp. 354-363.

3. Parsunkin B.N., Andreev S.M., Sukhonosova T.G. *Avtomatizatsiya i optimizatsiya protsessov vyplavki chuguna v domennykh pechakh* [Automation and optimization of process control of iron smelting in blast furnaces], Magnitogorsk, Publ. NMSTU, 2018, 215 p.

4. Parsunkin B.N., Andreev S.M., Sukhonosova T.G. Adaptive search-dynamic control of natural gas supply in blast furnace [Adaptivnoe poiskovo-dinamicheskoe upravlenie podachej prirodnogo gaza v dut'e domennoj pechi], *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2022, no.2(55), pp. 40-46.

5. Barankova M.V., Parsunkin B.N. Coke consumption minimization by means of natural gas consumption controlling optimization to the blast furnace [Optimizatsiya upravleniya podachej prirodnogo gaza v domennuyu pech s celyu minimizatsii raskhoda koksa], *Avtomatizirovannye tehnologii i proizvodstva* [Automation of technologies and production], 2014, no.6, pp. 159-164.

6. Sibagatullin S.K., Kharchenko A.S., Polinov A.A. Stabilization of the natural gas to blast ratio in blast furnace tuyeres [Stabilizatsiya sootnosheniya raskhodov prirodnogo gaza i dutya po furmam domennoj pechi], *Teoriya i tekhnologiya metallurgicheskogo proizvodstva* [The Theory and process engineering of metallurgical production], 2014. no. 1(14), pp. 23-25.

7. Makarova I.V., Svechnikova N.Yu., Muravyov N.I. Improvement of blast furnace smelting by blowing hot reducing gases into the shaft [Sovershenstvovanie domennoj plavki vduvaniem goryachih vosstanovitel'nykh gazov v shahtu], *Tekhnologii metallurgii, mashinostroeniya i materialobrabotki* [Technologies of metallurgy, mechanical engineering and materials processing], 2022, no.21, pp. 38-42.

8. Yaroshenko Yu.G., Senichkin B.K. Influence of combined blast parameters on energy costs when injecting additional fuel. Energy efficiency of natural gas injection into a blast furnace [Vliyaniye parametrov kombinirovannogo dutya na energeticheskie zatraty pri vduvanii dopolnitel'nogo topliva. Energeticheskaya effektivnost vduvaniya v domennuyu pech prirodnogo gaza], *Sovremennye nauchnye dostizheniya metallurgicheskoy teplotekhniki i ih realizatsiya v promyshlennosti: sb. dokl. II Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., Ekaterin-*

*burg, 18–21 sentyabrya 2017* [Modern scientific achievements in metallurgical heat engineering and their implementation in industry: collection of scientific papers of the II Int. scientific-practical. conf., Ekaterinburg, September 18–21, 2017], Ekaterinburg, UrFu Publ., 2018, pp. 197-203.

9. Parsunkin B.N., Andreev S.M., Sukhonosova T.G. Improvement of automatic control of the gas combustion industrial process by the energy-saving volumetric proportioning flow of fuel and air [Sovershenstvovanie avtomaticheskogo upravleniya processom promyshlennogo szhiganiya gaza putem energosberegayushchego porcionirovaniya raskhodov topliva i vozduha], *Teoriya i tekhnologiya metallurgicheskogo proizvodstva* [The Theory and process engineering of metallurgical production], 2017, no.2(21), pp. 21-26.

10. 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 smeshannogo gaza v prohodnykh pechakh listoprokatnykh stanov], *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2022, no. 1(54), pp. 68-74.

11. Parsunkin B.N., Sukhonosova T.G. *Zadachi po sintezu avtomatizirovannykh sistem upravleniya tekhnologicheskimi processami i proizvodstvom: ucheb. posobie* [Tasks on the synthesis of automated control systems for technological processes and production], Magnitogorsk, NMSTU Publ., 2016, 54 p. Available at: <https://host.megaprolib.net/MP0109/Download/MObject/20773> (accessed 15 April 2013).

12. Parsunkin B.N., Andreev S.M., Sukhonosova T.G., Ryabchikova E.S. *Sistemy avtomatizatsii i upravleniya: ucheb. posobie* [Automation and control systems], Magnitogorsk, NMSTU Publ., 2016, 54 p. Available at: <https://host.megaprolib.net/MP0109/Download/MObject/3128> (accessed 15 April 2013).

13. Korchagin A. Yu., Mukhina E. Yu. System for automatic optimization of natural gas flow control to minimize the specific amount of coke [Sistema avtomaticheskoy optimizatsii upravleniya raskhodom prirodnogo gaza s celyu minimizatsii udel'nogo kolichestva koksa], *Avtomatizirovannye tehnologii i proizvodstva* [Automation of technologies and production], 2022, no.1(25), pp.4-8.

Сухоносова, Т.Г. Система автоматического регулирования расхода природного газа по фурмам доменной печи / Т.Г. Сухоносова, Т.Э. Абдулин, С.А. Емельянов // Автоматизированные технологии и производства. 2024. №1(29). С.38-43.

T.G. Sukhonosova, T.E. Abdulin, S.A. Emelyanov System of Automatic Control of Natural Gas Flow in Blast Furnace Tuyeres. *Avtomatizirovannye tehnologii i proizvodstva* [Automation of technologies and production], 2024, no.1(29), pp.38-43. (in Russian).

УДК 331.548

## ИТОГИ МНОГОПРОФИЛЬНОЙ ОЛИМПИАДЫ ШКОЛЬНИКОВ «ПУТЬ К УСПЕХУ» СЕКЦИЯ «АВТОМАТИКА» 2024

В.С. Новак, Н.А. Антипанов

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

nik.antipanov.05@bk.ru

**Аннотация.** На кафедре автоматизированных систем управления института энергетики и автоматизированных систем ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И.Носова» весной 2024 года была проведена Многопрофильная олимпиада школьников «Путь к успеху» секции «Автоматика». Участие в Олимпиаде по автоматике приняли 90 школьников и студентов Магнитогорска и других городов России.

**Ключевые слова:** многопрофильная олимпиада, профориентация, автоматика, путь к успеху.

На кафедре автоматизированных систем управления ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И.Носова» впервые проводилась Многопрофильная олимпиада для школьников «Путь к успеху» по секции «Автоматика» (далее Олимпиада). Олимпиада проводилась в два тура с декабря 2023 по март 2024 года.

В Олимпиаде по автоматике приняли участие 90 учащихся образовательных учреждений Магнитогорска, а также городов и сел Челябинской, Калужской областей, республики Адыгея (город Обнинск). Участниками Олимпиады были школьники 10-11 классов и учащиеся колледжей.

Отборочный тур Олимпиады проходил дистанционно и включал 10 вопросов, на которые нужно было ответить за 30 минут. Из 90 участников отборочный тур прошло 20 учащихся.

Заключительный тур состоялся 16 февраля 2024 г. в лаборатории электроники и общей электротехники кафедры АСУ. Участникам заключительного этапа необходимо было ответить на ряд вопросов и выполнить практические задания, рис. 1.

Состав рабочей группы по Олимпиаде: заведующий кафедры АСУ Сергей Михайлович Андреев, старший преподаватель Татьяна Геннадьевна Сухоносова, старший преподаватель Альбина Робертовна Бондарева, учебный мастер Владимир Сергеевич Новак.

Учащиеся соревновались в навыках расчета и сбора электрических схем на лабораторных стендах, преобразовании логических функций, расчете погрешности измерения и программировании.

Работы участников заключительного этапа оценивали члены жюри: доцент кафедры АСУ Рябчиков Михаил

Юрьевич, руководитель проектов проектного офиса ЗАО «Консом СКС» Прасолов Александр Сергеевич и старший преподаватель кафедры АСУ Самарина Ирина Геннадьевна.

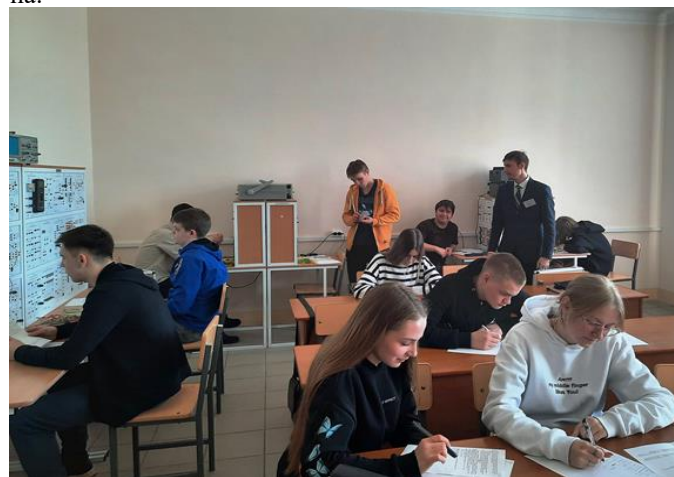


Рис. 1. Заключительный тур Олимпиады  
«Путь к успеху» секция «Автоматика»

На основе экспертного анализа работ жюри определило победителя и призеров Олимпиады, всего присуждено пять призовых мест. Победителем Олимпиады по автоматике стал студент 4 курса ГАПОУ ЧО «ПК» Метальников Ярослав, набрав 25,4 балла, рис. 2.

Второе место разделили: студент 4 курса ГАПОУ ЧО «ПК» Нелюбин Андрей (24,7 балла) и студент 2 курса ФГБОУ ВО МГТУ «МпК» Матвеев Антон (22 балла).

Третье место присуждено студенту 2 курса ГАПОУ ЧО «ПК» Тюриков Дмитрий (17,5 балла) и студенту 4 курса ГАПОУ ЧО «ПК» Кутаяков Дмитрий (16,5 балла), наставник Анна Александровна Платонова.

Победителям и призерам Олимпиады «Путь к успеху»

в торжественной обстановке были вручены почетные дипломы и сувениры с символикой вуза.

Подробную информацию об Олимпиаде «Путь к успеху» можно узнать на официальном сайте <http://molimp.ru>, а также на странице кафедры АСУ [1].



Рис 2. Андрей Нелюбин (2 место) и Ярослав Метальщиков (1 место) с преподавателем Людмилой Юрьевной Чередниченко

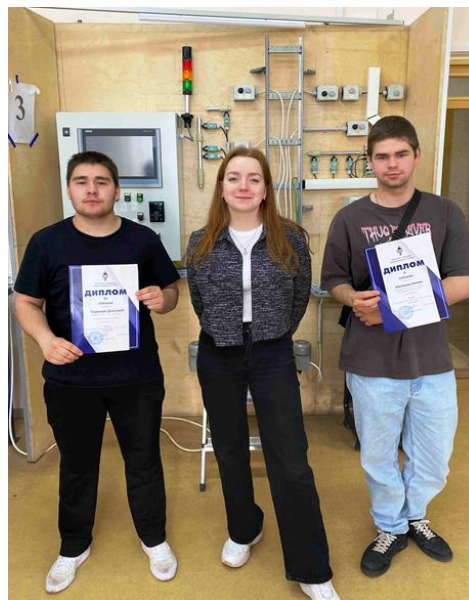


Рис 3. Дмитрий Тюриков (3 место) и Антон Матвеев (2 место) с преподавателем Юлией Сергеевной Урахчиной

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Интернет-страница кафедры АСУ МГТУ им. Г.И. Носова. – URL: <https://www.magtu.ru/sveden/struct/instituty-fakultety-kafedry/institut-energetiki-i-avtomatizirovannykh-sistem/kafedry-instituta/napravlenie-avtomatizirovannye-sistemy/kafedra-avtomatizirovannykh-sistem-upravleniya.html> (дата обращения 01.06.2024).

## RESULTS OF THE MULTIDISCIPLINARY SCHOOLCHILDREN'S OLYMPIAD «WAY TO SUCCESS» SECTION «AUTOMATICS» 2024

V.S. Novak, N.A. Antipanov

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation

**Abstract.** At the Department of Automated Control Systems of the Institute of Energy and Automated Systems of the Nosov Magnitogorsk State Technical University in the spring of 2024 the Multidisciplinary Olympiad for schoolchildren «Way to Success» was held in the section «Automatics». 90 schoolchildren and students from Magnitogorsk and other cities of Russia took part in the Olympiad in automatics.

**Keywords:** multidisciplinary olympiad, career guidance, automatics, way to success.

#### REFERENCES

1. Internet-stranica kafedry ASU MGTU im. G.I. Nosova [Page of the department of Automated Control Systems of Nosov Magnitogorsk State Technical University], URL: [https://www.magtu.ru/sveden/struct/instituty-fakultety-](https://www.magtu.ru/sveden/struct/instituty-fakultety-kafedry/institut-energetiki-i-avtomatizirovannykh-sistem/kafedry-instituta/napravlenie-avtomatizirovannye-sistemy/kafedra-avtomatizirovannykh-sistem-upravleniya.html)

[kafedry/institut-energetiki-i-avtomatizirovannykh-sistem/kafedry-instituta/napravlenie-avtomatizirovannye-sistemy/kafedra-avtomatizirovannykh-sistem-upravleniya.html](https://www.magtu.ru/sveden/struct/instituty-fakultety-kafedry/institut-energetiki-i-avtomatizirovannykh-sistem/kafedry-instituta/napravlenie-avtomatizirovannye-sistemy/kafedra-avtomatizirovannykh-sistem-upravleniya.html) (accessed 1 June 2024).

Новак, В.С. Итоги многопрофильной олимпиады школьников «Путь к успеху» секция «Автоматика» 2024 / В.С. Новак, Н.А. Антипанов // Автоматизированные технологии и производства. 2024. №1(29). С.44-45.

V.S. Novak, N.A. Antipanov Results of The Multidisciplinary Schoolchildren's Olympiad «Way To Success» Section «Automatics» 2024. Avtomatizirovannye tehnologii i proizvodstva [Automation of technologies and production], 2024, no.1(29), pp.44-45. (in Russian).

## ИТОГИ УНИВЕРСИАДЫ «ПУТЬ К УСПЕХУ» СЕКЦИИ «МЕТРОЛОГИЯ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ» 2024 ПО НАПРАВЛЕНИЮ ПОДГОТОВКИ 27.03.04 «УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ»

Т.Г. Сухоносова, С.А. Емельянов

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

tgobuhova@gmail.com

**Аннотация.** На кафедре автоматизированных систем управления института энергетики и автоматизированных систем ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И.Носова» весной 2024 года прошла Универсиада «Путь к успеху» по направлению «Управление в технических системах. Метрология и средства измерения». Участие в Универсиаде приняли более 130 студентов из разных регионов России.

**Ключевые слова:** универсиада, метрология, измерения, управление в технических системах, путь к успеху.

На базе кафедры автоматизированных систем управления ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И.Носова» была проведена третья Всероссийская Универсиада «Путь к успеху» секции «Метрология и средства измерения» по направлению подготовки 27.03.04 «Управление в технических системах профиль: системы и средства автоматизации технологических процессов» (далее Универсиада).

Универсиада проводилась с декабря 2023 по март 2024 года и включала в себя два этапа. Первый отборочный этап проводился в дистанционном формате и включал тестовые вопросы и задачи. За 50 минут надо было ответить на 20 вопросов о рабочих средствах и эталонах, единицах измерения, методах измерения, видах погрешностей, аналоговых и цифровых средствах измерения, рассчитать погрешность измерения или класс точности прибора и т.д.



Рис. 1. Выполнение практической части заданий заключительного этапа Универсиады

Второй заключительный этап проходил в очном формате в лаборатории кафедры АСУ 14 марта 2024 г и содержал теоретические и практические задания, см. рис. 1. В практическом задании с помощью комплекта приборов необходимо было определить градуировочную характеристику датчика, выполнить необходимые расчеты, построить графики [1, 2].

Комплект заданий для проведения Универсиады был разработан преподавателями кафедры АСУ под руководством заведующего кафедрой Сергея Михайловича Андреева.

Работы участников заключительного этапа оценивали члены жюри: д.т.н., доцент, заведующий кафедрой АСУ Сергей Михайлович Андреев, руководитель проектов проектного офиса ЗАО «Консом СКС» Александр Сергеевич Прасолов и старший преподаватель кафедры АСУ Мухина Елена Юрьевна.

Общее количество участников Универсиады составило 133 обучающихся в вузах и выпускников прошлых лет, в том числе студентов, проживающих в других городах и регионах России, среди которых Москва, Санкт-Петербург, Екатеринбург, а также города и села Челябинская области и Республики Башкортостан.

По итогам Универсиады было присуждено шесть призовых мест. Победителем Универсиады стала студентка третьего курса гр. АТСб-21-1 Васильева Елена, рис. 2. Второе место разделили студенты четвертого курса Гавриленко Богдан из гр. АНб-20-1и Бузмаков Максим из гр. АТСб-20-1. Третье призовое место заняли студенты четвертого курса Ковалева Любовь и Чернов Владислав из гр. АТСб-20-1 и студент третьего курса Плисс Федор из гр. АНб-21-1. Наставники и преподаватели призеров Универсиады – Ирина Геннадьевна Самарина и Альбина Робертовна Бондарева.

Победителю и призерам Универсиады вручены почетные дипломы и сувениры, а также предоставлены дополнительные баллы при поступлении в магистратуру МГТУ им. Г.И. Носова по профилю 27.04.04 «Цифровые системы управления технологическими комплексами».

Подробная информация о прошедших Универсиадах

размещена на официальном сайте Универсиады «Путь к успеху» <http://univer.magtu.ru>, а также странице кафедры автоматизированных систем управления [3, 4].



Рис. 2. Победитель Универсиады Васильева Елена

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Самарина, И. Г. Метрология и технические измерения: практикум / И. Г. Самарина, Е. Ю. Мухина, А. Р. Бондарева. – Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2021. – 57 с.
2. Бондарева, А. Р. Электрические измерения: Практикум / А. Р. Бондарева, И. Г. Самарина. – Магнитогорск : Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2022. – 95 с.
3. Интернет-страница кафедры АСУ МГТУ им. Г.И. Носова. – URL: <https://www.magtu.ru/sveden/struct/instituty-fakultety-kafedry/institut-energetiki-i-avtomatizirovannykh-sistem/kafedry-instituta/napravlenie-avtomatizirovannye-sistemy/kafedra-avtomatizirovannykh-sistem-upravleniya.html> (дата обращения 01.06.2024).
4. Сухонослова, Т.Г. Итоги Универсиады 2023 года «Путь к успеху» по метрологии и средствам измерения по направлению «Управление в технических системах» // Автоматизированные технологии и производства. 2023. №1(27), С. 30-31.

## RESULTS OF THE UNIVERSIADE «WAY TO SUCCESS» IN METROLOGY AND MEASURING MEANS IN THE DIRECTION «MANAGEMENT IN TECHNICAL SYSTEMS» 2024

**T.G. Sukhonosova, S.A. Emelyanov**

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation

**Abstract.** At the Department of Automated Control Systems of the Institute of Energy and Automated Systems of the Nosov Magnitogorsk State Technical University in the spring of the Universiade 2024 «Way to Success» was held in the direction «Control in technical systems (metrology and measuring means)». More than 130 students from different regions of Russia participated in the Universiade.

**Keywords:** universiade, metrology, measuring, control in technical systems, way to success.

#### REFERENCES

1. Samarina, I. G., Mukhina E. Yu., Bondareva A. R. *Metrologiya i tekhnicheskie izmereniya: praktikum* [Metrology and technical measuring: workshop], Magnitogorsk, Publ. Magnitogorsk State Technical University G.I. Nosova, 2021, p. 57.
2. Bondareva A. R., Samarina, I. G. *Elektricheskie izmereniya: praktikum* [Electrical Measurements: Workshop], Magnitogorsk, Publ. Magnitogorsk State Technical University G.I. Nosova, 2022, p. 95.
3. *Internet-stranica kafedry ASU MGTU im. G.I. Nosova* [Page of the department of Automated Control Systems of

Nosov Magnitogorsk State Technical University], URL: <https://www.magtu.ru/sveden/struct/instituty-fakultety-kafedry/institut-energetiki-i-avtomatizirovannykh-sistem/kafedry-instituta/napravlenie-avtomatizirovannye-sistemy/kafedra-avtomatizirovannykh-sistem-upravleniya.html> (accessed 1 june 2024).

4. Sukhonosova T.G. Results of the Universiade 2023 «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(27), pp. 30-31.

Сухонослова, Т.Г. Итоги универсиады «путь к успеху» секции «метрология и средства измерения» 2024 по направлению подготовки 27.03.04 «управление в технических системах» / Т.Г. Сухонослова, С.А. Емельянов // Автоматизированные технологии и производства. 2024. №1(29). С.46-47.

T.G. Sukhonosova, S.A. Emelyanov Results of The Universiade «Way To Success» In Metrology And Measuring Means In The Direction «Management In Technical Systems» 2024. *Avtomatizirovannye tehnologii i proizvodstva* [Automation of technologies and production], 2024, no.1(29), pp.46-47. (in Russian).