

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПРОИЗВОДСТВА

№1(33) 2026

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПРОИЗВОДСТВА

№1 (33) июнь 2026 г.

Международный научно-технический журнал

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

О журнале

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

Основные направления журнала: Автоматизированные системы управления; обработка данных, информационное и программное обеспечение автоматизированных систем управления; автоматизированные технологии в образовании; математическое моделирование технологических систем и объектов управления; автоматизация контроля и испытаний; математические модели процессов в металлургии.

Редакция и редакционный совет

Редакционный совет

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

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

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

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

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

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

Редакция

Главный редактор:
Андреев Сергей Михайлович – доктор технических наук, доцент

Ответственный редактор
Самарина Ирина Геннадьевна

Контакты

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

Адрес редакции: 455000, г. Магнитогорск,
пр. Ленина, 38.
E-mail: atp@magtu.ru
Выходит в свет 06.2026.

СОДЕРЖАНИЕ

Математическое моделирование технологических систем и объектов управления

И.П. Попов

Последовательно-параллельное соединение элементов мехатронных систем 3

В.И. Безденежных, П.П. Безденежных

Функции статуса дисперсного материала при вынужденных колебаниях 7

В.Д. Павлов

Проблема динамики решетных сепараторов и пути ее решения 11

Д.О. Сниткин, С.М. Андреев

Сравнительный анализ методов машинного обучения для прогнозирования механических свойств холодного проката на основе данных системы охлаждения прокатного стана 14

В.И. Безденежных, П.П. Безденежных

LLL осциллятор 20

И.П. Попов

Параллельно-последовательное соединение элементов мехатронных систем при вынужденных колебаниях 23

А.П. Яковлева

Математическая модель нагрева многослойного прокатного вала в пламенной печи в процессе термообработки 27

Р.Ш. Якупов, С.М. Андреев

Исследование изменения характеристик воздухонагревателя доменной печи при управлении процессом нагрева насадки 32

Технические средства автоматизации

В.Д. Павлов

Механические реактансы элементов мехатронных систем 37

Автоматизированные системы управления

В.Д. Савенков, Е.Ю. Мухина

Регулирование соотношения газ/воздух в методической печи стана 2000 горячей прокатки 40

Краткие сообщения

Т.Г. Суханосова, М.А. Михальченко

Итоги универсиады «Путь к успеху» секция «Метрология и средства измерения» 2026 45

Т.Г. Суханосова, Н.А. Антипанов

Итоги многопрофильной олимпиады школьников «Путь к успеху» секция «Автоматика» 2026 47

CONTENTS

Mathematic and simulation of control systems and objects

I.P. Popov

Series-Parallel Connection of Elements of Mechatronic Systems 3

V.I. Bezdeneshnykh, P.P. Bezdeneshnykh

Functions of The Status of Dispersed Material Under Forced Oscillations..... 7

V.D. Pavlov

The Problem of Dynamics of Sieve Separators and Ways to Solve It 11

D.O. Snitkin, S.M. Andreev

Comparative Analysis of Machine Learning Methods for Predicting The Mechanical Properties of Cold Rolls Based on Data From The Rolls Cooling System 14

V.I. Bezdeneshnykh, P.P. Bezdeneshnykh

LLL Oscillator 20

I.P. Popov

Parallel-Serial Connection of Elements of Mechatronic Systems Under Forced Oscillations 23

A.P. Yakovleva

Mathematical model of heating a multilayer rolling roll in a fuel-fired furnace during heat treatment 27

R.S. Yakupov, S.M. Andreev

Study of Changes In The Characteristics of a Blast Furnace Air Heater When Controlling The Heating Process of Refractory Packaging 32

Automation equipment

V.D. Pavlov

Mechanical Reactances of Elements of Mechatronic Systems 37

Automated Control Systems

V. D. Savenkov, E. Yu. Mukhina

Control of Gas/Air Ratio in a Continuous Furnace of Hot Rolling Mill 2000 37

Summary statement

T.G. Sukhonosova, M.A. Mihalchenko

Results of the Universiade «Way To Success» in Metrology And Measuring Means » 2026 45

T.G. Sukhonosova, N.A. Antipanov

Results of the Multidisciplinary Schoolchildren's Olympiad «Way to Success» Section «Automatics» 2026..... 47

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ

Оформление

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

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

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

При оформлении статьи рекомендуется придерживаться следующих правил:

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

Самоецитирование: не рекомендуется более 30% 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

Предоставление материалов

УДК 681.5.015.32

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

Б.Н. Парсушкин¹, Т.Г. Сухоносова²

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

² tgobuhova@gmail.com

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

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

Введение

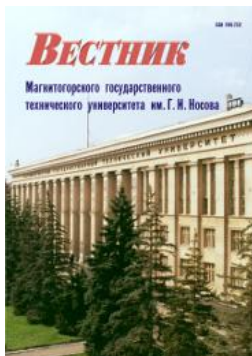
При адаптации современного микропроцессорного регулирующего комплекса (МРК) к управляемому технологическому процессу приоритетной задачей является оперативное и достоверное определение динамических параметров объектов управления: коэффициента передачи объекта $K_{об}$, постоянной

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

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

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

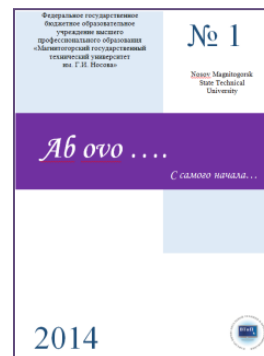
Другие рекомендуемые периодические издания



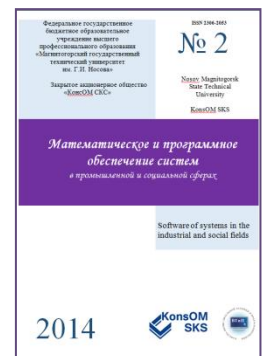
Вестник магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова



Электротехнические системы и комплексы



Журнал молодых исследователей: магистров и аспирантов



Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах

УДК 62-932.4

ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО-ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ

И.П. Попов

Курганский государственный университет, Курган, Российская Федерация

uralakademia@kurganstalmost.ru

Аннотация. Для рассмотренного последовательно-параллельного соединения элементов мехатронных систем классические методы, основанные на решении дифференциальных уравнений второго порядка, многократно усложняются и требуют решения систем уравнений, которые сводятся к дифференциальным уравнениям более высоких порядков. Использование символического (комплексного) описания механических процессов и систем позволяет применять вместо этого простые и компактные алгебраические методы, трудоемкость которых меньше в десятки раз.

Ключевые слова: потребители механической мощности, вынужденные колебания, параллельное, последовательное соединение, резонанс сил, резонанс скоростей.

Последовательно-параллельное соединение элементов мехатронных систем представлено на рис. 1.

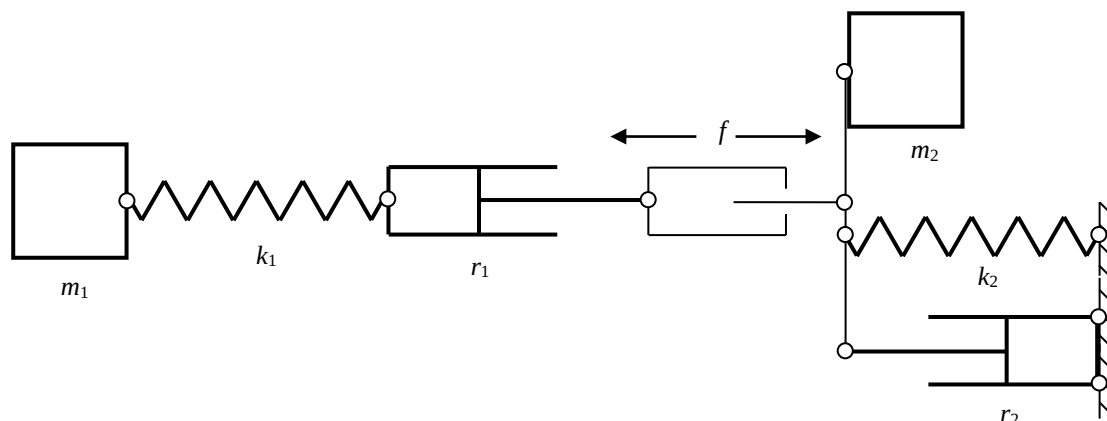


Рис. 1. Схема последовательно-параллельного соединения

Ранее [1] было установлено, что

$$\underline{y} = \frac{1}{\underline{z}}, \quad (1)$$

$$\underline{y} = \sum_{j=1}^n \underline{y}_j, \quad (2)$$

$$\dot{\underline{V}} = \underline{y} \dot{\underline{F}} = Y e^{i\varphi} F e^{i\frac{\pi}{2}} = Y F e^{i(\varphi + \frac{\pi}{2})},$$

где $\underline{y}$ – адмитанс в комплексном изображении [2], $\underline{z}$ –

импеданс в комплексном изображении [3-5], $\dot{\underline{V}}$ – ком-

плексная гармоническая скорость, $\dot{\underline{F}}$ – комплексная гармоническая сила [5, 6], φ – фазовый сдвиг между ними [7-10].

С учетом (1)

$$\underline{y}_2 = \frac{1}{\underline{z}_2}.$$

С учетом (2)

$$y = y_1 + y_2.$$

Пример 1. $\dot{F} = 100e^{i0}$ (Н), $\omega = 2$ рад/с, $m = 10$ кг, $k = 20$ (кг·с⁻²), $r = 7$ (кг·с⁻¹). Определить все остальные параметры.

$$\underline{y}_2 = \frac{1}{z_2} = \frac{1}{12,207 e^{i55^\circ}} = 8,192 \cdot 10^{-2} e^{-i55^\circ} (\kappa \mathcal{E}^{-1} \cdot c),$$

$$\begin{aligned}\underline{y} = \underline{y}_1 + \underline{y}_2 &= 15,135 \cdot 10^{-2} e^{i19,29^\circ} + 8,192 \cdot 10^{-2} e^{-i55^\circ} = \\ &= 19,061 \cdot 10^{-2} e^{-i5,126^\circ} (\kappa Z^{-1} \cdot c),\end{aligned}$$

$$\dot{V} = \dot{F}_y = 100 \cdot 19,061 \cdot 10^{-2} e^{-i5,126^\circ} = 19,061 e^{-i5,126^\circ} (\mathcal{M} \cdot \mathcal{C}^{-1}),$$

$$\dot{V}_2 = \dot{F} y_2 = 100 \cdot 8,192 \cdot 10^{-2} e^{-i55^\circ} = 8,192 e^{-i55^\circ} (\mathcal{M} \cdot \text{c}^{-1}).$$

$$-\dot{V}_1 + \dot{V}_2 = 15,135e^{i19,29^\circ} + 8,192e^{-i55^\circ} =$$

$$= 19,061 e^{-i5,126^\circ} \text{ (M} \cdot \text{c}^{-1}) = \dot{V}.$$

Данным примера 1 соответствует векторная диаграмма на рисунке 2.

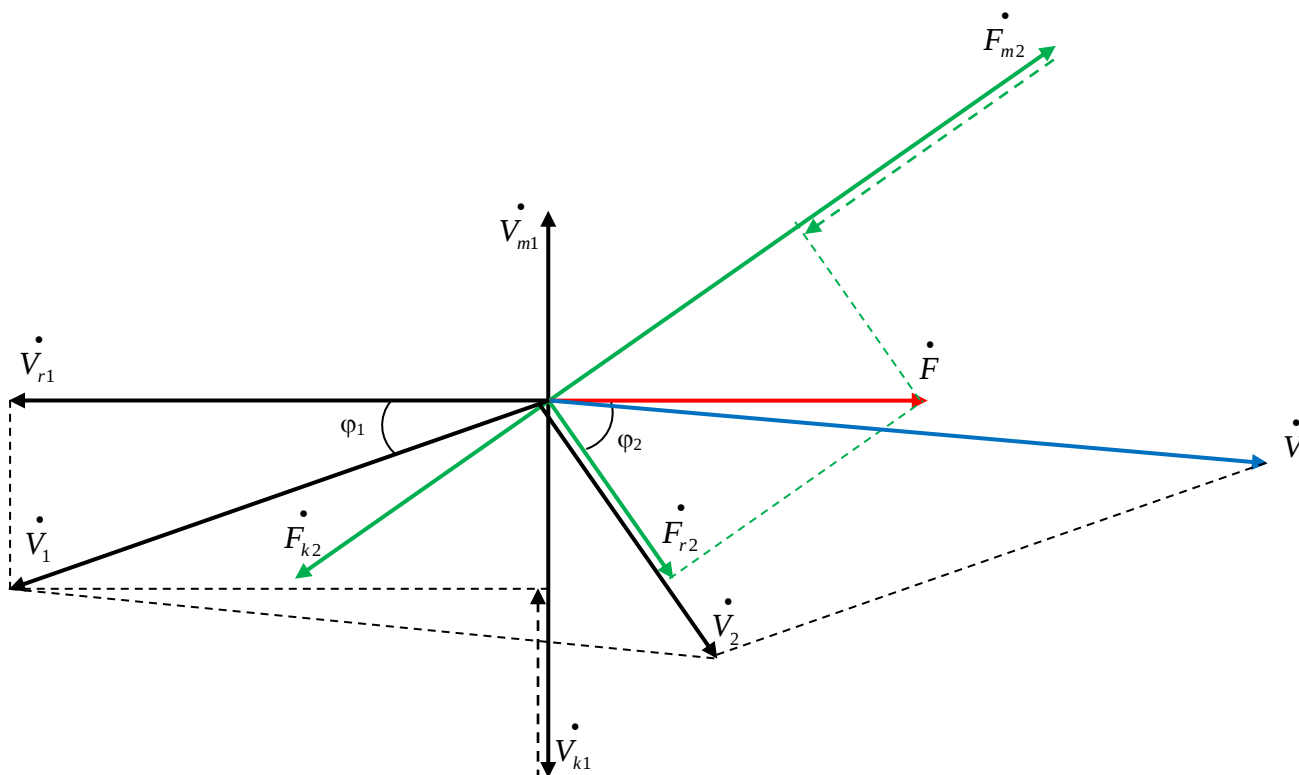


Рис. 2. Последовательно-параллельное соединение

Пример 2. Для последовательно-параллельного (двойного) резонанса. Отличие от примера 1 состоит в том, что $k = 40 \text{ (кг} \cdot \text{с}^{-2}\text{)}$.

$$\underline{y}_1 = \frac{1}{z_1} = g_1 = \underline{y}_2 = \frac{1}{z_2} = g_2 =$$

$$= \frac{1}{12,207 e^{j55^\circ}} = 14,286 \cdot 10^{-2} e^{j0^\circ} (\text{ke}^{-1} \cdot \text{c}),$$

$$y = y_1 + y_2 = 2 \cdot 14,286 \cdot 10^{-2} e^{i0^\circ} = 28,571 \cdot 10^{-2} e^{i0^\circ} (\kappa \mathcal{Z}^{-1} \cdot c),$$

$$\dot{V} = \dot{F}_y = 100 \cdot 28,571 \cdot 10^{-2} e^{i0^\circ} = 28,571 e^{i0^\circ} (M \cdot c^{-1}),$$

$$\dot{V} = -\dot{V}_1 + \dot{V}_2,$$

$$-\dot{V}_1 = -\dot{F} y_1 = \dot{V}_2 = \dot{F} y_2 =$$

$$= 100 \cdot 14,286 \cdot 10^{-2} e^{i0^\circ} = 14,286 e^{i0^\circ} (\mathcal{M} \cdot c^{-1}),$$

$$-\dot{V}_{m1} = b_{m1} \dot{F} = 5 \cdot 10^{-2} e^{-i90^\circ} \cdot 100 e^{i0^\circ} = 5 e^{-i90^\circ} \text{ (M} \cdot \text{c}^{-1}\text{)},$$

$$-\dot{V}_{k1} = \dot{b}_{k1} F = 5 \cdot 10^{-2} e^{i90^\circ} \cdot 100 e^{i0^\circ} = 5 e^{i90^\circ} (\text{M} \cdot \text{c}^{-1}),$$

$$-\dot{V}_{r_1} = -q_1 \dot{F} = 14,286 \cdot 10^{-2} \cdot 100 e^{i0^\circ} = 14,286 e^{i0^\circ} (\text{M} \cdot \text{c}^{-1}),$$

$$\dot{F}_{m_2} = x_{m_2} \dot{V}_2 = 20e^{i90^\circ} \cdot 14,286e^{i0^\circ} = 285,714e^{i90^\circ} \text{ (H)},$$

$$\dot{F}_{k2} = x_{k2} \dot{V}_2 = 20e^{-i90^\circ} \cdot 14,286e^{i0^\circ} = 285,714e^{-i90^\circ} \text{ (H)},$$

$$\dot{F}_{r_2} = \dot{F}_2 = \dot{F} = r_2 \dot{V}_2 = 7e^{i0} \cdot 14,286e^{i0^\circ} = 100e^{i0^\circ} \text{ (H)}.$$

Данным примера 2 соответствует векторная диаграмма на рисунке 3.

Для рассмотренного последовательно-параллельного соединения элементов мехатронных систем классические методы, основанные на решении дифференциальных уравнений второго порядка, многократно усложняются и требуют решения систем уравнений, которые сводятся к дифференциальным уравнениям более высоких порядков.

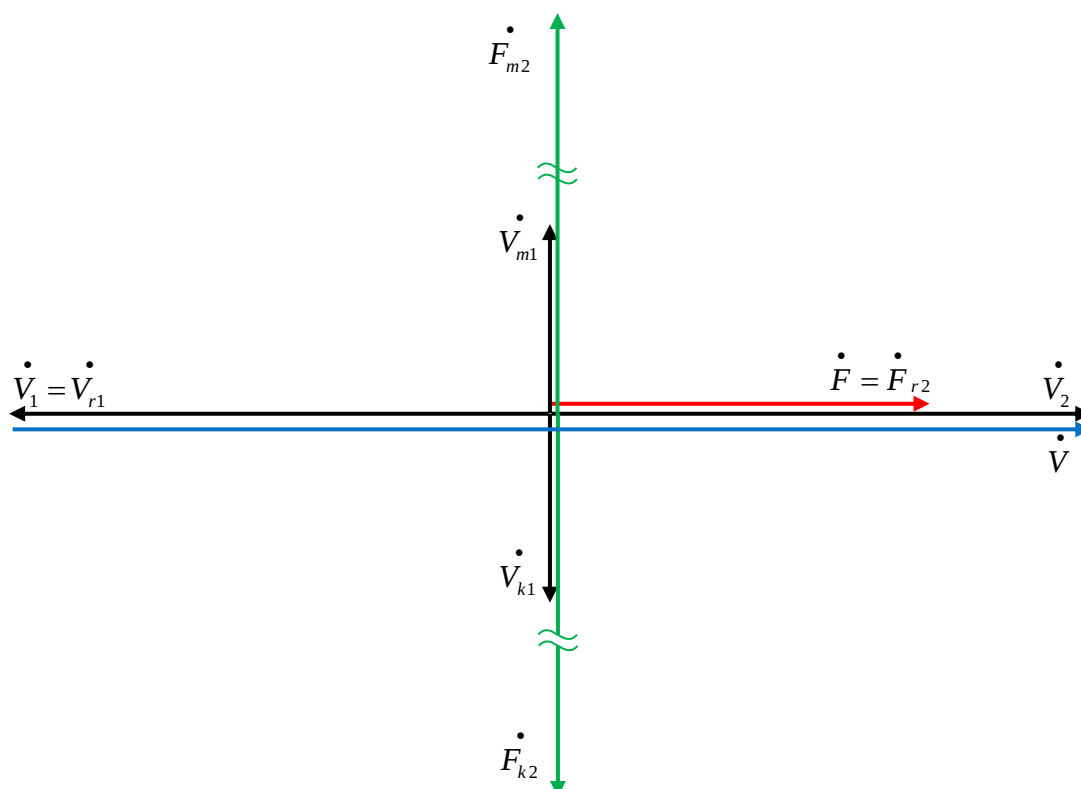


Рис. 3. Последовательно-параллельный (двойной) резонанс

Использование символического (комплексного) описания механических процессов и систем позволяет применять вместо этого простые и компактные алгебраические методы, трудоемкость которых меньше в десятки раз.

Векторные диаграммы, не являясь необходимой составляющей исследования механических систем, имеют существенное методическое значение, поскольку показывают количественные и фазные соотношения между параметрами систем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Попов И.П. Связь между механическими величинами мехатронных систем при вынужденных колебаниях / И.П. Попов // Автоматизированные технологии и производства. 2025. № 2(32). С.18-20.
2. Попов, И.П. Реактансы и сассептансы мехатронных систем при параллельном соединении элементов / И.П. Попов // Автоматизированные технологии и производства. 2025. №1(31). С.10-14.
3. Попов И.П. Спонтанные упруго-индуктивные колебания в технических средствах автоматизации / И.П. Попов // Автоматизированные технологии и производства. 2019. № 1 (19). С. 18-20.
4. Попов И.П. Инертно-индуктивные колебания в мехатронных системах / И.П. Попов // Автоматизированные технологии и производства. 2022. № 1 (25). С. 23–25.
5. Попов И.П. Резонанс сил в мехатронных системах / И.П. Попов // Автоматизированные технологии и производства. 2024. № 1 (29). С. 17-19.
6. Попов И.П. О возможности автоматизированной балансировки вибрационных механизмов / И.П. Попов // Автоматизированные технологии и производства. 2020. № 1 (21). С. 10-12.
7. Попов И.П. Попутная оптимизация производительной мощности решетных сортировальных машин / И.П. Попов // Автоматизированные технологии и производства. 2020. № 1 (21). С. 19-21.
8. Павлов В.Д. Паразитные вибрации в автоматизированных комплексах / И.П. Попов // Автоматизированные технологии и производства. 2024. № 1 (29). С. 10-12.
9. Павлов В.Д. Вибратор для автоматизированных комплексов / И.П. Попов / И.П. Попов // Автоматизированные технологии и производства. 2024. № 1 (29). С. 20-22.
10. Павлов В.Д. Условия автобалансировки вибрационных механизмов с постоянным приведенным моментом инерции // Автоматизированные технологии и производства. 2024. №2(30). С.16-18.

I.P. Popov

Kurgan State University, Kurgan, Russia

e-mail: uralakademia@kurganstalmost.ru

Abstract. For the series-parallel connection of mechatronic system elements discussed above, classical methods based on solving second-order differential equations are greatly complicated and require solving systems of equations that reduce to higher-order differential equations. Using a symbolic (complex) description of mechanical processes and systems allows for the use of simple and compact algebraic methods instead, which are tens of times less labor-intensive.

Keywords: mechanical power consumers, forced oscillations, parallel and series connections, force resonance, velocity resonance.

REFERENCES

1. Popov I.P. The relationship between mechanical quantities of mechatronic systems under forced vibrations [Svyaz' mezhdu mekhanicheskimi velichinami mekhatronnykh sistem pri vyznuzhennykh kolebaniyakh]. *Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva [Automated technologies and production]*, 2025. no. 2(32). pp.18-20. (In Russian).
2. Popov I.P. Reactance and Susceptions of Mechatronic Systems With Parallel Connection of Elements [Reaktansy i sasseptansy mekhatronnykh sistem pri parallel'nom soyedinenii elementov]. *Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva [Automated technologies and production]*, 2025. no. 1(31), pp.10-14. (In Russian).
3. Popov I.P. Spontaneous elastic-inductive oscillations 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)
4. Popov I.P. Inertial-inductive oscillations in mechatronic systems [Inertno-induktivnyye kolebaniya v mekhatronnykh sistemakh]. *Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva [Automated technologies and production]*, 2022, no. 1 (25), pp. 23–25. (In Russian)
5. Popov I.P. Resonance of forces in mechatronic systems [Rezonans sil v mekhatronnykh sistemakh]. *Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva [Automated technologies and production]*, 2024, no. 1 (29), pp. 17-19. (In Russian)
6. Popov I.P. On the possibility of automated balancing of vibration mechanisms [O vozmozhnosti avtomatizirovannoy balansirovki vibratsionnykh mekhanizmov]. *Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva [Automated technologies and production]*, 2020, no. 1 (21), pp. 10-12. (In Russian)
7. Popov I.P. Concurrent optimization of the productive capacity of screen sorting machines [Poputnaya optimizatsiya proizvoditel'noy moshchnosti reshetnykh sortiroval'nykh mashin]. *Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva [Automated technologies and production]*, 2020, no. 1 (21), pp. 19-21. (In Russian)
8. Pavlov V.D. Parasitic vibrations in automated complexes [Parazitnyye vibratsii v avtomatizirovannykh kompleksakh]. *Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva [Automated technologies and production]*, 2024, no. 1 (29), pp. 10-12. (In Russian)
9. Pavlov V.D. Vibrator for automated complexes [Vibrator dlya avtomatizirovannykh kompleksov]. *Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva [Automated technologies and production]*, 2024, no. 1 (29), pp. 20-22. (In Russian)
10. Pavlov, V.D. Conditions of auto-balancing of vibration mechanisms with a constant reduced moment of inertia [Usloviya avtobalansirovki vibratsionnykh mekhanizmov s postoyannym privedennym momentom inertsii]. *Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva [Automated technologies and production]*, 2024, no. 2(30), pp.16-18. (In Russian)

Попов, И.П. Последовательно-параллельное соединение элементов мехатронных систем / И.П. Попов // Автоматизированные технологии и производства. 2026. №1(33). С.3-6.

I.P. Popov Series-Parallel Connection of Elements Of Mechatronic Systems. *Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva [Automated technologies and production]*, 2026. no.1(33), pp.3-6. (In Russian).

ФУНКЦИИ СТАТУСА ДИСПЕРСНОГО МАТЕРИАЛА ПРИ ВЫНУЖДЕННЫХ КОЛЕБАНИЯХ

В.И. Безденежных, П.П. Безденежных

Курганский государственный университет, Курган, Россия

uralakademia@kurganstalmost.ru

Аннотация. При сортировке (вибрационном просеивании) дисперсного материала следует принимать во внимание его динамические свойства, установление которых является целью настоящей работы. Методика исследования заключается в представлении статуса исследуемой системы в виде комбинации ее диаметрально противоположных предельных статусов. Рассматривается дисперсный материал, расположенный на платформе, совершающей гармонические колебания. Главная проблема при установлении динамических свойств дисперсного материала заключается в невозможности вычисления усредненного коэффициента динамического трения, т.к. на его значение оказывает влияние взаимодействие дисперсных частиц между собой во всей массе материала, а не только с поверхностью платформы. Описание динамического статуса дисперсного материала в форме композиции его неустойчивого и устойчивого статусов дает ключ к разрешению этой и сходных проблем. Предметом исследования являются системы с равновеликими предельными статусами. Этот метод является универсальным и применим для самых разнообразных систем с иными статусами и параметрами.

Ключевые слова: дисперсный материал, динамические свойства, статус системы, комбинация статусов, платформа, устойчивость/неустойчивость.

ВВЕДЕНИЕ

Настоящая работа является продолжением публикации [1].

Для оценки неустойчивости (или устойчивости) дисперсного материала относительно платформы [2-4] вводится безразмерная величина ξ .

Ее предельными значениями являются ξ_a – абсолютная устойчивость (полная неподвижность) относительно платформы и ξ_z – абсолютная неустойчивость.

Композиция предельных значений может быть представлена в виде:

$$\xi = \varphi_a \xi_a + \varphi_z \xi_z. \quad (1)$$

Здесь φ_a и φ_z – функции статуса.

Для равновеликих предельных статусов

$$|\xi| = |\xi_a| = |\xi_z|. \quad (2)$$

ФУНКЦИИ СТАТУСА

Далее переменная статуса обозначается x , $x \in [x_a, x_z] \subset \mathbb{R}$. Переменная статуса играет роль аргумента функции статуса.

В самых простых случаях функции статуса являются линейными.

$$\varphi_a(x) = 1 - p(x - x_a), \quad p \in \mathbb{R}, \quad (3)$$

$$\varphi_z(x) = p(x - x_a),$$

$$p(x_z - x_a) = 1.$$

Часто функции статуса не являются линейными, и их математическая формула, как правило, не определена.

В большинстве практических случаев функции статуса не претерпевают разрывов и являются монотонными на отрезке $[x_a, x_z]$. На этом отрезке функция статуса φ_a пробегает значения от единицы до нуля, а φ_z – от нуля до единицы. Из этого следует, что такие функции статуса можно рассматривать как аналитические на отрезке $[x_a, x_z]$ и поэтому их можно описывать с помощью функциональных рядов, в т.ч., степенного ряда

$$\begin{aligned} \varphi_a(x) &= \varphi_a(x_w) + \varphi'_a(x_w)(x - x_w) + \\ &+ \frac{\varphi''_a(x_w)}{2!}(x - x_w)^2 + \dots + \frac{\varphi^{(n)}_a(x_w)}{n!}(x - x_w)^n \end{aligned} \quad (4)$$

при обязательном условии его сходимости.

Очевидно, что

$$x_w \in [x_a, x_z].$$

Вполне распространенный случай (3) фактически тоже является рядом Тейлора (вырожденным).

Значения

$$\varphi_a(x_w), \varphi'_a(x_w), \varphi''_a(x_w), \dots, \varphi^{(n)}_a(x_w) \quad (5)$$

являются параметрами функции статуса.

Они определяются следующим образом.

Экспериментально находятся $\varphi_a(x_w)$ и еще n величин $\varphi_a(x_1), \varphi_a(x_2), \dots, \varphi_a(x_n)$. С помощью этих значений и ряда (4) составляется n уравнений с n неизвестными, объединенными в систему. Решением системы уравнений являются величины (5), которые однозначно определяют функцию статуса в форме (4).

По известной функции статуса и ее предельным значениям (нуль и единица) находятся конкретные значения границ отрезка $[x_a, x_z]$.

Так как ξ_a – абсолютная устойчивость, а ξ_z – абсолютная неустойчивость дисперсного материала, то $\varphi_a(x)$ уместно трактовать как *функцию устойчивости*, а $\varphi_z(x)$ – напротив, как *функцию неустойчивости*.

В соответствии с этим величины (5) можно рассматривать как параметры функций устойчивости и неустойчивости.

Подобным способом можно устанавливать функции для иных статусов.

ПРИМЕР

Имея в виду, что $n = \omega/2\pi$, опытным путем установлены величины: $n_w = 8\text{с}^{-1}$ (оптимальная частота [5-7]), $\varphi_a(n_w) = 0,320$; $n_1 = 3\text{с}^{-1}$, $\varphi_a(n_1) = 0,822$; $n_2 = 5\text{с}^{-1}$, $\varphi_a(n_2) = 0,579$; $n_3 = 12\text{с}^{-1}$, $\varphi_a(n_3) = 0,122$.

С помощью этих значений и ряда (4) составляется три уравнения с тремя неизвестными, объединенные в систему.

$$\begin{cases} 0,822 = 0,320 + \varphi'_a(8)(3-8) + \frac{\varphi''_a(8)}{2!}(3-8)^2 + \frac{\varphi'''_a(8)}{3!}(3-8)^3 \\ 0,579 = 0,320 + \varphi'_a(8)(5-8) + \frac{\varphi''_a(8)}{2!}(5-8)^2 + \frac{\varphi'''_a(8)}{3!}(5-8)^3 \\ 0,122 = 0,320 + \varphi'_a(8)(12-8) + \frac{\varphi''_a(8)}{2!}(12-8)^2 + \frac{\varphi'''_a(8)}{3!}(12-8)^3 \end{cases}$$

Эта система имеет следующие решения:

$$\varphi'_a(8) = -6,825 \cdot 10^{-2},$$

$$\frac{\varphi''_a(8)}{2!} = 5,456 \cdot 10^{-3},$$

$$\frac{\varphi'''_a(8)}{3!} = -1,977 \cdot 10^{-4}.$$

В соответствии с этим и формулой (4) определяется функция устойчивости

$$\varphi_a(n) = 0,320 - 6,825 \cdot 10^{-2}(n-8) + 5,456 \cdot 10^{-3}(n-8)^2 - 1,977 \cdot 10^{-4}(n-8)^3.$$

Функция неустойчивости

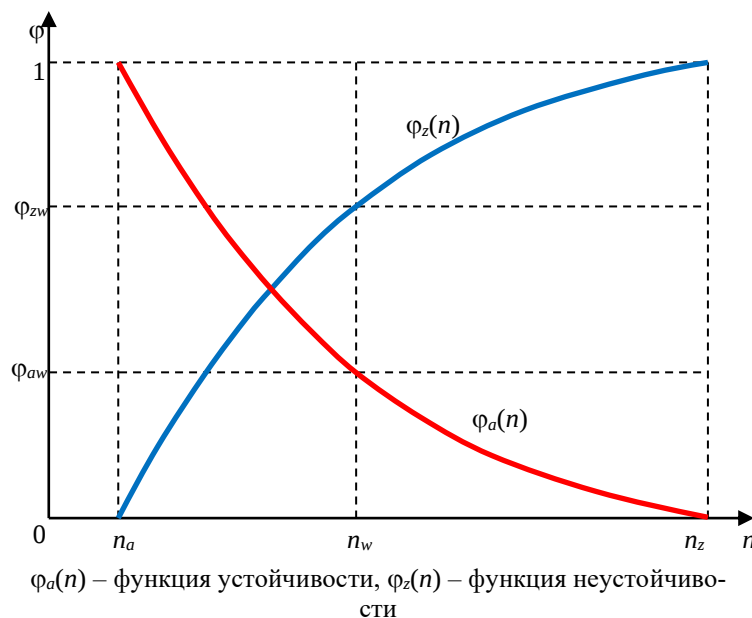
$$\varphi_z(n) = 0,680 + 6,825 \cdot 10^{-2}(n-8) - 5,456 \cdot 10^{-3}(n-8)^2 + 1,977 \cdot 10^{-4}(n-8)^3.$$

Очевидно, что аргументом обеих функций является частота колебаний [8-10].

По известной функции устойчивости и ее предельным значениям (нуль и единица) находятся конкретные значения границ отрезка $[n_a, n_z]$.

$$n_a = 1,8\text{с}^{-1}, \quad n_z = 17,2\text{с}^{-1}.$$

Функции статуса для полученных данных представлены на рисунке.



Статус дисперсного материала на оптимальной частоте колебаний $n_w = 8\text{с}^{-1}$ является композицией его предельных статусов

$$\begin{aligned} \xi &= \varphi_a(n_w)\xi_a + \varphi_z(n_w)\xi_z = \\ &= 0,32\xi_a + 0,68\xi_z. \end{aligned} \quad (6)$$

Для выполнения инженерных расчетов композицию предельных статусов целесообразно обобщить на массу дисперсного материала m . С этой целью в формуле (6) достаточно заменить величины ξ на величины m (формально разделить (6) на ξ и умножить на m).

$$m = \varphi_a(n_w)m_a + \varphi_z(n_w)m_z =$$

$$= 0,32m + 0,68m.$$

Это выражение наглядно демонстрирует, что (условно) часть дисперсного материала ($0,32m$) осуществляет колебания вместе с платформой, увеличивая суммарную инерционную нагрузку, при этом другая часть дисперсного материала ($0,68m$) перемещается по платформе, увеличивая суммарную диссипативную нагрузку (тепловые потери).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученный результат актуален в первую очередь для сыпучих материалов (полезных ископаемых, стройматериалов, зерна и т.п.). Теперь, когда установлено, что вычисляемая часть материала осуществляет колебания вместе с платформой (условно), а другая часть материала – нет, динамика груза рассчитывается по отдельности для этих двух частей и не представляет никакой трудности. Результаты могут быть использованы при проектировании мехатронных устройств

Предложенный метод является универсальным и применим для самых разнообразных систем с иными статусами и параметрами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Безденежных В.И. Представление динамического статуса дисперсного материала в виде композиции его предельных статусов / В.И. Безденежных // Автоматизированные технологии и производства. 2025. №1(31). С.15-17.
2. Безденежных В.И. Трехмассовый осциллятор для мехатронных систем / В.И. Безденежных // Автоматизированные технологии и производства. 2025. №1(31). С.21-23.

3. Попов И.П. Попутная оптимизация производительной мощности решетных сортировальных машин / И.П. Попов // Автоматизированные технологии и производства. 2020. № 1 (21). С. 19-21.

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

5. Попов И.П. О возможности автоматизированной балансировки вибрационных механизмов / И.П. Попов // Автоматизированные технологии и производства. 2020. № 1 (21). С. 10-12.

6. Павлов В.Д. Условия автобалансировки вибрационных механизмов с постоянным приведенным моментом инерции / В.Д. Павлов // Автоматизированные технологии и производства. 2024. №2(30). С.16-18.

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

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

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

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

FUNCTIONS OF THE STATUS OF DISPERSED MATERIAL UNDER FORCED OSCILLATIONS

V.I. Bezdeneshnykh, P.P. Bezdeneshnykh

Kurgan State University, Kurgan, Russia

e-mail: uralakademia@kurganstalmost.ru

Abstract. When sorting (vibrating screening) of a dispersed material, its dynamic properties should be taken into account, the establishment of which is the goal of this work. The research methodology consists in presenting the status of the system under study as a combination of its diametrically opposite limiting statuses. Considered is a dispersed material located on a platform that performs harmonic oscillations. The main problem in establishing the dynamic properties of a dispersed material is the impossibility of calculating the average coefficient of dynamic friction, since its value is influenced by the interaction of dispersed particles with each other in the entire mass of the material, and not only with the surface of the platform. The description of the dynamic status of a dispersed material in the form of a composition of its unstable and stable statuses provides the key to solving this and similar problems. The subject of the study are systems with equal limiting statuses. This method is universal and applicable to a wide variety of systems with different statuses and parameters.

Keywords: dispersed material, dynamic properties, system status, combination of statuses, platform, stability/instability.

REFERENCES

1. Bezdeneshnykh V.I. Representation of the dynamic status of dispersed material as a composition of its limiting statuses [Predstavleniye dinamicheskogo statusa dispersnogo materiala v vide kompozitsii yego predel'nykh statusov]. *Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva [Automated technologies and production]*, 2025, no. 1(31), pp.15-17. (In Russian)
2. Bezdeneshnykh V.I. Three-mass oscillator for mechatronic systems [Trekhmassovyy ostsillyator dlya mek-

hatronnykh sistem]. *Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva [Automated technologies and production]*, 2025, no. 1(31), pp.21-23. (In Russian)

3. Popov I.P. Concurrent optimization of the productive capacity of screen sorting machines [Poputnaya optimizatsiya proizvoditel'noy moshchnosti reshetnykh sortiroval'nykh mashin]. *Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva [Automated technologies and production]*, 2020, no. 1 (21), pp. 19-21. (In Russian)

-
4. Pavlov V.D. Vibrator for automated complexes [Vibrator dlya avtomatizirovannykh kompleksov]. *Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva [Automated technologies and production]*, 2024, no. 1 (29), pp. 20-22. (In Russian)
5. Popov I.P. On the possibility of automated balancing of vibration mechanisms [O vozmozhnosti avtomatizirovannoy balansirovki vibratsionnykh mekhanizmov]. *Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva [Automated technologies and production]*, 2020, no. 1 (21), pp. 10-12. (In Russian)
6. Pavlov V.D. Conditions of auto-balancing of vibration mechanisms with a constant reduced moment of inertia [Usloviya avtobalansirovki vibratsionnykh mekhanizmov s postoyannym privedennym momentom inertsii]. *Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva [Automated technologies and production]*, 2024, no. 2(30), pp.16-18. (In Russian)
7. Popov I.P. Resonance of forces in mechatronic systems [Rezonans sil v mekhatronnykh sistemakh]. *Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva [Automated technologies and production]*, 2024, no. 1 (29), pp. 17-19. (In Russian)
8. Popov I.P. Spontaneous elastic-inductive oscillations 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)
9. Pavlov V.D. Parasitic vibrations in automated complexes [Parazitnyye vibratsii v avtomatizirovannykh kompleksakh]. *Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva [Automated technologies and production]*, 2024, no. 1 (29), pp. 10-12. (In Russian)
10. Popov I.P. Inertial-inductive oscillations in mechatronic systems [Inertno-induktivnyye kolebaniya v mekhatronnykh sistemakh]. *Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva [Automated technologies and production]*, 2022, no. 1 (25), pp. 23–25. (In Russian)
-

Безденежных, В.И. Функции статуса дисперсного материала при вынужденных колебаниях/ В.И. Безденежных, П.П. Безденежных // Автоматизированные технологии и производства. 2026. №1(33). С.7-10.

V.I. Bezdeneshnykh, P.P. Bezdeneshnykh Functions of The Status of Dispersed Material Under Forced Oscillations. *Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva [Automated technologies and production]*, 2026. no.1(33), pp.7-10. (In Russian).

ПРОБЛЕМА ДИНАМИКИ РЕШЕТНЫХ СЕПАРАТОРОВ И ПУТИ ЕЕ РЕШЕНИЯ

В.Д. Павлов

Владимирский электромеханический завод, Владимир, Россия

pavlov.val.75@mail.ru

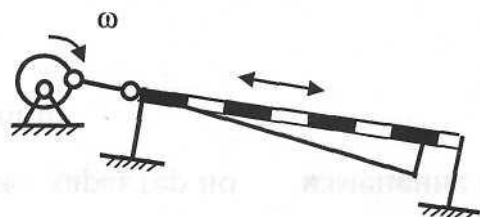
Аннотация. Рассмотрены основные варианты сообщения решетам колебательных движений: движение в плоскости решета; частичное движение по нормали к плоскости; вращательное движение; движение по нормали к плоскости с высокой частотой. Обосновывается применение кинематической схемы решетного сепаратора с взаимно нейтрализованными механическими инертными реактансами.

Ключевые слова: кинематическая схема, решетный сепаратор, колебания, реактивная мощность, инертный реактансы.

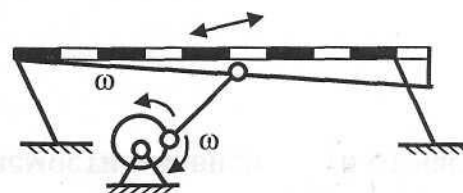
ОСНОВНЫЕ ВАРИАНТЫ СООБЩЕНИЯ РЕШЕТАМ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ ДВИЖЕНИЙ

На рисунке 1 приведены основные варианты сообщения решетам колебательных движений: а – движение в

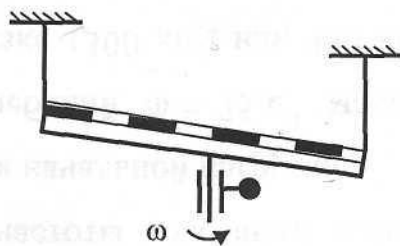
плоскости решета; б – частичное движение по нормали к плоскости; в – вращательное движение; г – движение по нормали к плоскости с высокой частотой.



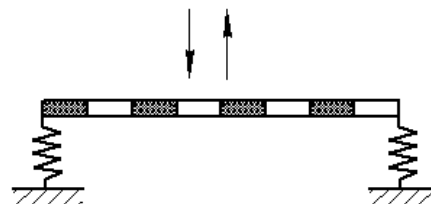
а



б



в



г

Рис. 1. Основные варианты сообщения решетам колебательных движений

Чаще всего применяется вариант «а». Он характеризуется наличием кинематически жесткого привода, который обеспечивает колебания решет близких к синусоидальным с неизменной амплитудой. Для преобразования вращательного движения электродвигателя в возвратно-поступательное движение решет, как правило, используется эксцентриковый механизм. Безусловным достоинством этого привода является простота.

Недостатком привода является передача значительных динамических воздействий на корпус машины. Для минимизации этих воздействий используются штатные схемы с

двумя решетными станами, совершающими колебания в противофазах.

Существенным недостатком решетных сепараторов с эксцентриковыми приводными механизмами с прямолинейными колебаниями решетных станом является развитие значительной реактивной механической мощности, доминирующей в составе полной механической и, соответственно, потребляемой электрической мощности.

ОСНОВНАЯ ПРОБЛЕМА ДИНАМИКИ РЕШЕТНЫХ ЗЕРНООЧИСТИТЕЛЬНЫХ МАШИН

В течение четверти периода основной (первой) гармоники колебаний привод сообщает массивному решетному стану существенную кинетическую энергию. В течение следующей четверти периода решетный стан возвращает приводу значительную часть полученной энергии. Развиваются существенные реактивная и полная мощности. Возникают сильные динамические нагрузки на корпус. Передача реактивной энергии по электрической сети сопровождается значительными тепловыми потерями в проводах и обмотках трансформаторов и электромеханических преобразователей. Применение схемы движения двух решетных станов в противоположных направлениях

снимает динамическую нагрузку на корпус зерноочистительной машины, но не решает проблему нейтрализации реактивных нагрузок привода решетного стана и питающей сети – момент на валу привода и потребляемая мощность остаются знакопеременными.

Это обстоятельство явилось побудительной причиной разработки кинематической схемы с взаимно нейтрализованными механическими инертными реактансами решетных станов (рис. 2) [1-10], которая позволяет полностью исключить указанные вредные проявления.

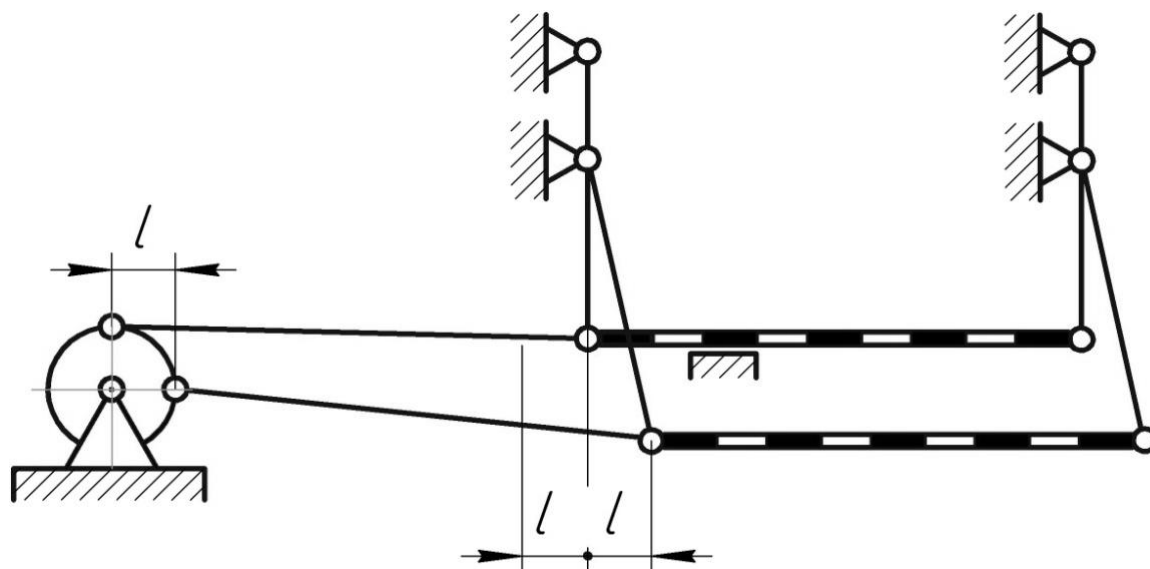


Рис. 2. Кинематическая схема с взаимно нейтрализованными механическими инертными реактансами решетных станов

ЛИТЕРАТУРА

1. Попов И.П. Попутная оптимизация производительной мощности решетных сортировальных машин / И.П. Попов // Автоматизированные технологии и производства. 2020. № 1 (21). С. 19-21.
2. Павлов В.Д. Вибратор для автоматизированных комплексов / В.Д. Павлов // Автоматизированные технологии и производства. 2024. № 1 (29). С. 20-22.
3. Безденежных В.И. Трехмассовый осциллятор для мехатронных систем / В.И. Безденежных // Автоматизированные технологии и производства. 2025. №1(31). С.21-23.
4. Попов И.П. Резонанс сил в мехатронных системах / И.П. Попов // Автоматизированные технологии и производства. 2024. № 1 (29). С. 17-19.
5. Попов И.П. Резонанс скоростей в мехатронных системах / И.П. Попов // Автоматизированные технологии и производства. 2024. № 2(30). С.11-13.
6. Попов, И.П. Реактансы и сассептансы мехатронных систем при параллельном соединении элементов / И.П.

Попов // Автоматизированные технологии и производства. 2025. №1(31). С.10-14.

7. Попов И.П. Связь между механическими величинами мехатронных систем при вынужденных колебаниях / И.П. Попов // Автоматизированные технологии и производства. 2025. № 2(32). С.18-20.

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

9. Попов И.П. Упруго-деформационная и другие виды мощности для целей мониторинга энергосберегающих технологий / И.П. Попов // Автоматизированные технологии и производства. 2023. № 2 (28). С. 33–35.

10. Павлов В.Д. Реактивная механическая мощность в мехатронных системах / В.Д. Павлов // Автоматизированные технологии и производства. 2025. № 1(31). С.18-20.

THE PROBLEM OF DYNAMICS OF SIEVE SEPARATORS AND WAYS TO SOLVE IT

V.D. Pavlov

Vladimir Electromechanical Plant, Vladimir, Russia

pavlov.val.75@mail.ru

Abstract. The main options for imparting oscillatory motion to screens are considered: motion in the screen plane; partial motion normal to the plane; rotational motion; and high-frequency motion normal to the plane. The use of a screen separator kinematic scheme with mutually neutralized mechanical inert reactances is substantiated.

Keywords: kinematic diagram, sieve separator, oscillations, reactive power, inert reactances.

REFERENCES

1. Popov I.P. Concurrent optimization of the productive capacity of screen sorting machines [Poputnaya optimizatsiya proizvoditel'noy moshchnosti reshetnykh sortiroval'nykh mashin]. *Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva [Automated technologies and production]*, 2020, no. 1 (21), pp. 19-21. (In Russian)
2. Pavlov V.D. Vibrator for automated complexes [Vibrator dlya avtomatizirovannykh kompleksov]. *Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva [Automated technologies and production]*, 2024, no. 1 (29), pp. 20-22. (In Russian)
3. Bezdeneshnykh V.I. Three-mass oscillator for mechatronic systems [Trehmassovyy ostsillyator dlya mekhatronnykh sistem]. *Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva [Automated technologies and production]*, 2025, no. 1(31), pp.21-23. (In Russian)
4. Popov I.P. Resonance of forces in mechatronic systems [Rezonans sil v mekhatronnykh sistemakh]. *Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva [Automated technologies and production]*, 2024, no. 1 (29), pp. 17-19. (In Russian)
5. Popov I.P. Velocity resonance in mechatronic systems [Rezonans skorostey v mekhatronnykh sistemakh]. *Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva [Automated technologies and production]*, 2024, no. 2(30), pp.11-13. (In Russian).
6. Popov I.P. Reactance and Susceptions of Mechatronic Sys-tems With Parallel Connection of Elements [Reaktansy i sasseptansy mekhatronnykh sistem pri parallel'nom soyedinenii elementov]. *Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva [Automated technologies and production]*, 2025. no. 1(31), pp.10-14. (In Russian).
7. Popov I.P. The relationship between mechanical quantities of mechatronic systems under forced vibrations [Svyaz' mezhdru mekhanicheskimi velichinami mekhatronnykh sistem pri vyzhdennykh kolebaniyakh]. *Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva [Automated technologies and production]*, 2025. no. 2(32). pp.18-20. (In Russian).
8. Popov I.P. Mechanical reactive inertial power for monitoring energy-saving technologies [Mekhanicheskaya reaktivnaya inertsionnaya moshchnost' dlya tseley monitoringa energosberegayushchikh tekhnologiy]. *Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva [Automated technologies and production]*, 2022, no. 1 (25), pp. 17–19. (In Russian).
9. Popov I.P. Elastic-deformational 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).
10. Pavlov V.D. Reactive mechanical power in mechatronic systems [Reaktivnaya mekhanicheskaya moshchnost' v mekhatronnykh sistemakh]. *Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva [Automated technologies and production]*, 2025, no. 1(31), pp.18-20. (In Russian).

Павлов, В.Д. Проблема динамики решетных сепараторов и пути ее решения / В.Д. Павлов // Автоматизированные технологии и производства. 2026. №1(33). С.11-13.

V.D. Pavlov The Problem of Dynamics of Sieve Separators and Ways to Solve It. *Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva [Automated technologies and production]*, 2026. no.1(33), pp.11-13. (In Russian).

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ХОЛОДНОГО ПРОКАТА НА ОСНОВЕ ДАННЫХ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ПРОКАТНОГО СТАНА

Д.О. Сниткин, С.М. Андреев

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

daniljust4fun@gmail.com

Аннотация. В статье представлены результаты сравнительного анализа методов машинного обучения для прогнозирования механических свойств холоднокатаного металла на основе данных мониторинга. Проведён обзор современных подходов к прогнозированию механических свойств материалов, включая нейросетевые модели, ансамблевые алгоритмы и регрессионный анализ. Экспериментальное исследование выполнено на временном ряде данных системы охлаждения за период с января по май 2025 года. Для решения задач кластеризации, классификации и прогнозирования временных рядов применены методы K-Means++, Random Forest, градиентный спуск и ARIMA. Наилучшие результаты в кластеризации показал алгоритм K-Means++ ($ARI = 0,937$, $NMI = 0,901$), в классификации — Random Forest (точность 94,7%), в прогнозировании — модель ARIMA(2,1,2) со средней абсолютной процентной ошибкой $MAPE = 3,12\%$. На основе полученных результатов предложены рекомендации по выбору метода в зависимости от типа решаемой задачи и наличия размеченных данных. Разработанные программные реализации могут служить основой для создания систем поддержки принятия решений в управлении технологическими процессами холодного проката.

Ключевые слова: машинное обучение, кластеризация, классификация, прогнозирование временных рядов, система охлаждения, ARIMA, Random Forest.

ВВЕДЕНИЕ

Современные промышленные системы управления холодным прокатом представляют собой инженерные объекты, эффективность функционирования которых напрямую влияет на производительность оборудования, энергопотребление и стабильность технологических процессов. В условиях непрерывного производства, характеризующегося высокой динамикой изменения нагрузок и внешних условий, задача оперативного управления натяжением или отжигом стальной полосы приобретает необходимое значение. Традиционные подходы к управлению, основанные на регламентных режимах, не позволяют обеспечить оптимальное сочетание энергетической эффективности и надёжности работы технического оборудования.

Особый интерес представляет задача прогнозирования механических свойств готовой продукции (предела текучести, временного сопротивления) на основе данных, регистрируемых в процессе охлаждения, что позволяет оперативно корректировать технологические режимы.

ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

В статье [1] предлагается метод прогнозирования предела текучести арматурной стали с использованием искусственных нейронных сетей (ИНС). Ключевая особенность подхода заключается в том, что обучение модели происходит на данных, полученных из физико-математической модели процесса ускоренного охлаждения, что позволяет справиться с дефицитом реальных экспериментальных данных.

Ключевая инновация работы — это способ получения данных для обучения нейросети. Поскольку сбор большого количества реальных данных с производства не представляется возможным, авторы используют генерацию производственных данных. С помощью модели, основанной на теоретических данных, генерируется большой набор данных, который связывает входные параметры, такие как состав, режимы охлаждения с выходным параметром предел текучести.

Процесс обучения нейронной сети проводится при переменном количестве нейронов в скрытом слое и с разными целевыми параметрами. После обучения проводится анализ результатов, который заключается в сравнении предсказаний нейросети с данными, полученными по эталонной физико-математической модели.

В работе оцениваются возможности использования таких нейросетевых моделей для оптимизации технологии охлаждения. Авторы приходят к выводу о перспективности данного направления и предлагают его для дальнейших исследований.

В статье [2] для прогнозирования и управления механическими свойствами используется комплексный подход, основанный на предиктивной аналитике и уравнениях множественной регрессии, интегрированных в систему машинного зрения. Этот метод позволяет оперативно корректировать процесс шаговой формовки (JCQE) для получения труб с заданной геометрией.

Ключевая идея заключается в том, что разброс механических свойств листовой стали напрямую влияет на итоговую геометрию трубы, что особенно критично для крупногабаритной продукции.

Исследователи установили, что колебания предела текучести листового проката даже в пределах 100 МПа приводят к значительным геометрическим отклонениям, которые недопустимы по стандартам (например, по овальности). Для компенсации этого влияния было разработано уравнение множественной регрессии. Оно позволяет рассчитать величину необходимой корректировки процесса формовки на каждом шаге для достижения идеальной цилиндрической формы.

Предиктивный метод заключается не в прямом расчете механических свойств по химическому составу, а в управлении геометрией через оперативную коррекцию технологических режимов на основе данных о текущем поведении металла в процессе формовки.

В статье [3] для предсказания механических свойств (модуля объёмной упругости B и коэффициента Пуассона ν) используется комплексный подход на основе машинного обучения. Основная идея — заменить дорогостоящие квантово-механические расчёты (DFT) быстрыми и точными моделями, обученными на имеющихся данных.

Наилучшие результаты для модуля объёмной упругости (B) показала модель градиентного бустинга (GB): $R^2 = 96,4\%$, $RMSE = 14,9$ ГПа. Для коэффициента Пуассона (ν) лучшей также оказалась модель GB: $R^2 = 65,9\%$, $RMSE = 0,035$. Ансамблевые методы (RF, GB) продемонстрировали более устойчивое поведение на независимой выборке по сравнению с нейросетями. Предиктивный метод в данной работе — градиентный бустинг, обученный на широком наборе химических и структурных дескрипторов. Этот подход позволяет быстро и с приемлемой точностью оценивать упругие свойства новых сплавов Гейслера, что делает его пригодным для высокопроизводительного скрининга материалов.

В статье [4] прогнозирование механических свойств происходит с помощью эмпирического метода, основанного на регрессионном анализе экспериментальных данных. Метод заключается в экстраполяции результатов лабораторных испытаний на реальные условия эксплуатации. Основная задача — предсказать, как изменяется относительное удлинение при разрыве ϵ во времени.

Процесс включает в себя следующие этапы. Изучение условий эксплуатации при котором определяются факторы, которые влияют на свойства (температура, влажность, радиация). Следующий этап - математическое описание кинетики изменения свойств. Необходимо подобрать уравнение, которое опишет экспериментальные данные. Последний этап заключается в экстраполяции и оценки точности. Полученное уравнение используется для прогноза на дальнейшие периоды.

В работе показано, что процесс старения полиэтиленовой пленки подчиняется экспоненциальной зависимости. Авторы используют следующую модель для относительного удлинения при разрыве (ϵ):

$$\epsilon = A - B \cdot 10^{\alpha \cdot t}, \quad (1)$$

Ключевой момент для прогнозирования — знание критического значения свойства. Для пленки-экрана критическим является относительное удлинение $\epsilon_{кр} = 17\%$, при котором она теряет свои защитные свойства. Используя полученное уравнение и критическое значение, можно рассчитать, через сколько времени свойство достигнет

этого предела — это и будет прогнозируемый срок службы.

Ключевой предиктивный метод в данной работе — это регрессионный анализ (метод наименьших квадратов) с последующей экстраполяцией, основанный на эмпирически подобранной математической модели, описывающей кинетику старения. Это классический эмпирический подход, который авторы в заключении называют «полуэмпирическим», так как он часто дополняется физико-химическими представлениями о процессах старения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Набор данных [5] представляет собой временной ряд, содержащий результаты мониторинга и управления системой охлаждения прокатного стана. Данные включают почасовую регистрацию температурных режимов (температура на входе и выходе из зоны охлаждения), параметров работы охлаждающего оборудования, а также интегральный показатель механического свойства — категорию прочности (поле Output), определённую по результатам контроля готовой продукции. Данные собраны с почасовым интервалом за период с 1 января 2025 года по 26 мая 2025 года (включительно). Общее количество записей — 3467. Набор данных предназначен для анализа эффективности системы охлаждения, прогнозирования механических свойств стали и разработки оптимальных стратегий управления охлаждением.

Для сравнения различных методов кластеризации и классификации необходимы количественные метрики для решения конкретной задачи. Метрики дают возможность численно измерить, насколько точно модель восстанавливает структуру данных или предсказывает целевые значения. Это дает возможность обоснованно выбрать метод для практического применения.

ARI (Adjusted Rand Index) — это метрика для оценки качества кластеризации, которая измеряет степень совпадения между полученным разбиением данных на кластеры и эталонным (истинным) разбиением. Чем больше показатель ARI стремится к 1, тем больше совпадение с эталоном. Расчёт ARI представлен в формуле (2).

$$ARI = \frac{\sum_{i,j} \binom{n_{ij}}{2} - \frac{\sum_i \binom{n_i}{2} \sum_j \binom{n_j}{2}}{\binom{n}{2}}}{\frac{1}{2} \left(\sum_i \binom{n_i}{2} + \sum_j \binom{n_j}{2} \right) - \frac{\sum_i \binom{n_i}{2} \sum_j \binom{n_j}{2}}{\binom{n}{2}}}, \quad (2)$$

Метрика NMI измеряет количество информации, которое одно разбиение содержит о другом. NMI принимает значения от 0 до 1 и описывается следующей формулой:

$$NMI = \frac{2 \cdot I(Y; \tilde{Y})}{H(Y) + H(\tilde{Y})}, \quad (3)$$

Точность — это метрика, используемая только для задач классификации. Определяется следующей формулой (4):

$$Accuracy = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \cdot 100\%, \quad (4)$$

Полнота — доля объектов класса, правильно идентифицированных моделью.

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN} \cdot 100\%, \quad (5)$$

Средняя абсолютная процентная ошибка (MAPE) – это метрика для оценки качества регрессионных моделей и прогнозирования временных рядов. Она показывает, насколько процентов в среднем модель ошибается относительно истинного значения. Метрика описывается следующим выражением:

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| \cdot 100\%, \quad (6)$$

Значение MAPE = X % означает, что в среднем модель ошибается на 3,12% относительно фактических значений.

РЕЗУЛЬТАТЫ КЛАСТЕРИЗАЦИИ

Оценка качества кластеризации осуществлялась с использованием индекса скорректированного Рэнда (ARI) и нормализованной взаимной информации (NMI). Данные метрики позволяют объективно сравнить полученное разбиение с эталонным, представленным в исходных данных. Все алгоритмы запускались с фиксированным числом кластеров $k = 5$. Иерархическая кластеризация выполнялась с методом одиночной связи.

Реализация программного кода на языке Python заключается в запуске пяти методов кластеризации: K-Means, K-Means++, K-Medoids (PAM), иерархическая кластеризация с методом одиночной связи и гауссовы смеси (GMM) [6 – 10]. Для каждого алгоритма фиксируется время выполнения, а качество кластеризации оценивается по описанным ранее метрикам.

В результате выполнения вычислительного эксперимента получены следующие значения метрик качества для каждого из исследованных методов.

Как видно из таблицы 1, наилучшие результаты по обоим метрикам демонстрирует алгоритм K-Means++ (ARI = 0,937, NMI = 0,901). Это объясняется его улучшенной стратегией инициализации центроидов, снижающей риск попадания в локальные оптимумы.

Таблица 1
Сравнительная оценка методов кластеризации

Алгоритм	ARI	NMI	Время выполнения, с
K-Means	0,912	0,887	1,24
K-Means++	0,937	0,901	1,41
K-Medoids (PAM)	0,894	0,876	12,63
Иерархическая (single)	0,823	0,845	15,87
GMM	0,918	0,892	9,54

РЕЗУЛЬТАТЫ КЛАССИФИКАЦИИ

Для решения задачи классификации были выбраны два метода, показавшие высокую эффективность в задачах подобного типа: Random Forest (RF) и градиентный спуск [11 – 13]. Выбор методов обусловлен тем, что RF позволяет учитывать нелинейные взаимодействия признаков, тогда как градиентный спуск обеспечивает высокую интерпретируемость модели и скорость обучения.

Для оценки качества классификации использовались такие метрики, как точность и полнота, которые были описаны ранее. Для воспроизводимости результатов был реализован код вычислительного эксперимента по клас-

сификации на языке Python. Суть реализации заключается в разделении на обучающую (70 %) и тестовую (30 %) выборки с сохранением пропорции классов. Запускаются два метода классификации: Random Forest и градиентный спуск. Для каждого алгоритма фиксируется время выполнения и рассчитываются метрики качества.

Цель эксперимента заключалась в выборе наиболее эффективного метода классификации для прогнозирования оптимальных механических свойств на основе текущих технологических параметров.

Таблица 2
Сравнительная оценка методов классификации

Метод	Точность (Accuracy), %	Полнота (Recall), %	Время обучения, с
Random Forest	94,7	94,7	2,34
Градиентный спуск (SGD)	89,3	89,3	0,89

Проведённый вычислительный эксперимент по классификации категорий механических свойств на основе текущих технологических параметров системы охлаждения показал, что метод Random Forest показал лучшее качество классификации и может быть использован в тех случаях, когда критична точность прогноза. Градиентный спуск уступает по точности, но значительно быстрее, что делает его пригодным для задач управления малоинерционными объектами управления, такими как прокатный стан.

РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВРЕМЕННОГО РЯДА

В рамках настоящего исследования решалась задача прогнозирования отклонения температуры — одного из ключевых параметров, непосредственно определяющих формирование механических свойств стали в процессе охлаждения. Точное прогнозирование этого параметра позволяет оперативно корректировать режимы охлаждения для обеспечения заданных свойств продукции.

В отличие от кластеризации и классификации, задача прогнозирования временных рядов относится к области обучения с учителем и заключается в предсказании будущих значений последовательности на основе её прошлых наблюдений. В рамках настоящего исследования решалась задача прогнозирования отклонения температуры — одного из ключевых параметров, характеризующих эффективность работы системы охлаждения. Для решения задачи прогнозирования временного ряда был выбран метод ARIMA, который является классическим и наиболее распространённым подходом в данной области [13].

Для оценки качества прогнозирования временных рядов использовалась метрика средней абсолютной процентной ошибки (MAPE), которая описывалась ранее.

Для воспроизводимости результатов был реализован программный код вычислительного эксперимента по прогнозированию временного ряда на языке Python. Так как ARIMA требует стационарности для корректного моделирования первоначально необходимо провести соответствующую проверку. Перебор комбинаций порядков авторегрессии (p), интегрируемости (d) и скользящего среднего (q) позволяет выбрать модель с минимальным значением информационного критерия Акаике (AIC), что га-

рантирует точность модели. Время прогноза составляет 8 часов.

Таблица 3
Результаты прогнозирования временного ряда методом ARIMA

Параметр	Значение
Оптимальный порядок модели	ARIMA(2, 1, 2)
MAPE	3,12 %
Время подбора модели	2,87 с

Оптимальная модель ARIMA была выбрана на основе минимума AIC. Модель обладает двумя лагами авторегрессии, то есть текущее значение отклонения температуры зависит от двух предыдущих значений. Ряд был приведён к стационарному виду путём однократного взятия разности. Текущее значение зависело от двух предыдущих ошибок прогноза. Значение MAPE = 3,12 % означает ошибку прогнозируемых значений от фактических, что также свидетельствует о высокой точности модели. Время подбора модели составляет 2,87 с, что в свою очередь позволяет при прокате металлической полосы пересматривать прогнозы по мере поступления новых данных в систему.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Выбор метода определяется постановкой задачи. В случае отсутствия разметки оптимальным будет метод кластеризации (K-Means++). При наличии разметки и требования к высокой точности прогнозирования Random Forest. Когда требуется интерпретируемая линейная модель и стоит задача оптимизации используется градиентный спуск. При прогнозировании временного ряда лучшим выбором будет ARIMA.

Таблица 4

Сводная таблица результатов

Метод	Тип задачи	Требуется разметка	Основная метрика	Значение
K-Means++ (лучший из кластеризаций)	Кластеризация	Нет	ARI	0,937
Градиентный спуск (SGD)	Оптимизация	Да	Точность	89,3%
Random Forest	Классификация	Да	Точность	94,7%
ARIMA	Прогнозирование рядов	Да	MSE	0,234

ЗАКЛЮЧЕНИЕ (Выводы)

В результате проведённого исследования выполнен системный анализ современных методов машинного обучения и их применимости для задач прогнозирования механических свойств на основе данных о технологических режимах системы охлаждения. На основе обзора литературы [1–4] установлено, что методы искусственных нейронных сетей, ансамблевых алгоритмов и регрессионного анализа успешно

применяются для прогнозирования механических свойств материалов и оптимизации технологических процессов.

Методы машинного обучения различных классов, таких как кластеризация, классификация, прогнозирование временных рядов могут быть эффективно применены для решения широкого круга задач управления холодным прокатом. Разработанные программные реализации и полученные количественные оценки могут служить основой для создания систем поддержки принятия решений и предиктивной аналитики в области управления технологическими процессами [14].

ЛИТЕРАТУРА

1. Оценка возможностей использования нейросетевых моделей для оптимизации технологии охлаждения арматурной стали / В.С. Солод, В.М. Зуев, С.Б. Иванова // Проблемы искусственного интеллекта. 2025. Т. 3, № 38. С. 65-77. DOI: 10.24412/2413-7383-2025-3-38-65-77
2. Разработка технологии и освоение производства труб диаметром 2520 мм / Г.С. Баталов, С.В. Шандер, А.Б. Гизатуллин и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2024. Т. 24, № 2. С. 29–40. DOI: 10.14529/met240204
3. Предсказание упругих свойств кристаллической структуры сплавов гейслера в рамках машинного обучения / Д.М. Моисеев, Д.Р. Байгутлин, В.В. Соколовский, В.Д. Бучельников // Челябинский физико-математический журнал. 2025. Т. 10, № 2, С. 286-296. DOI: 10.47475/2500-0101-2025-10-2-286-296
4. Эмпирический метод прогнозирования эксплуатационных свойств полимерных материалов / В.З. Алоев, З.М. Жирикова, М.А. Тарчокова // Известия Кабардино-Балкарского ГАУ. 2019. Т. 26, № 4. С. 36-40.
5. Programmer3. Data Center Cold Source Control Dataset : [набор данных для оптимизации энергопотребления систем охлаждения ЦОД] / Programmer3 // Kaggle. – 2025. – 1 файл (CSV, 551,07 КБ). – URL: <https://www.kaggle.com/datasets/programmer3/data-center-cold-source-control-dataset/data> (дата обращения: 13.06.2026). – Режим доступа: свободный.
6. Лихтина Е. В. Сравнение алгоритмов кластеризации / Е. В. Лихтина ; науч. рук. О. В. Чубарова // Актуальные проблемы авиации и космонавтики : сборник трудов XXV Международной научно-практической конференции (Красноярск, 15–19 апреля 2019 г.) / Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. – Красноярск, 2018. – Т. 1. – С. 123–125.
7. Дмитриев И.Н. Быстрый алгоритм кластерного анализа k-medoids // Прикладная дискретная математика. 2018. № 39. С. 116–127. DOI: 10.17223/20710410/39/11
8. Arthur D. k-means++: The Advantages of Careful Seeding / D. Arthur, S. Vassilvitskii // Proceedings of the Eighteenth Annual ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms. – Philadelphia : Society for Industrial and Applied Mathematics, 2007. – P. 1027–1035.
9. Никитин О. Р. Метод иерархической кластеризации цифровых многоспектральных изображений в задачах экологического мониторинга / О. Р. Никитин, А. Н. Кисляков // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2021. – № 4. – С. 49–57. – ISSN 2221-2574

10. Fault detection algorithm for Gaussian mixture noises: An application in lidar/IMU integrated localization systems / P. Yan, Z. Li, F. Huang, W. Wen, L. -T. Hsu // NAVIGATION. 72(1). P. 49–56 <https://doi.org/10.33012/navi.684>.

11. Мартынов А. В., Кандыба В. Е. Метод градиентного спуска в машинном обучении // Шаг в науку. – 2022. – № 4. – С. 4–8.

12. Svetnik V., Liaw A., Tong C., Culberson J. C., Sheridan R. P., Feuston B. P. Random Forest: A Classification and Regression Tool for Compound Classification and QSAR

Modeling // Journal of Chemical Information and Computer Sciences. – 2003. – Vol. 43. – № 6. – P. 1947–1958.

13. Box G. E. P., Jenkins G. M., Reinsel G. C., Ljung G. M. Time Series Analysis: Forecasting and Control. – 5th ed. – Hoboken: John Wiley & Sons, 2015. – 712 p. – ISBN 978-1-118-67502-1.

14. Использование модели нагрева полосы при управлении температурным режимом в протяжной печи башенного типа / М. Ю. Рябчиков, Б. Н. Парсункин, С. М. Андреев, Н. А. Головки // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. – 2011. – № 5. – С. 41–50. – EDN NTMBGD.

COMPARATIVE ANALYSIS OF MACHINE LEARNING METHODS FOR PREDICTING THE MECHANICAL PROPERTIES OF COLD ROLLS BASED ON DATA FROM THE ROLLS COOLING SYSTEM

D.O. Snitkin, S.M. Andreev

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation

Abstract. The article presents the results of a comparative analysis of machine learning methods for predicting the mechanical properties of cold-rolled steel based on monitoring data. A review of modern approaches to predicting the mechanical properties of materials, including neural network models, ensemble algorithms, and regression analysis, is provided. The experimental study was conducted on a time series of cooling system data from January to May 2025. K-Means++, Random Forest, gradient descent, and ARIMA methods were used to solve the problems of clustering, classification, and forecasting of time series. The best results in clustering were shown by the K-Means++ algorithm (ARI = 0,937, NMI = 0,901), in classification – by Random Forest (accuracy 94.7%), in forecasting – by the ARIMA(2,1,2) model with the average absolute percentage error MAPE = 3.12%. Based on the results obtained, recommendations are proposed for choosing a method depending on the type of problem solved and the availability of labeled data. The developed software implementations can serve as a basis for creating decision support systems for managing cold rolling technological processes.

Keywords: machine learning, clustering, classification, time series forecasting, cooling system, ARIMA, Random Forest.

REFERENCES

1. Solod V.S., Zuev V.M., Ivanova S.B. Otsenka vozmozhnostey ispol'zovaniya neyrosetevykh modeley dlya optimizatsii tekhnologii okhlazhdeniya armaturnoy stali [Evaluation of the Possibilities of Using Neural Network Models to Optimize the Cooling Technology of Reinforcing Steel]. *Problemy iskusstvennogo intellekta* [Problems of Artificial Intelligence], 2025, vol. 3, no. 38, pp. 65–77. DOI: 10.24412/2413-7383-2025-3-38-65-77

2. Batalov G.S., Shander S.V., Gizatullin A.B., et al. Razrabotka tekhnologii i osvoenie proizvodstva trub diametrom 2520 mm [Development of Technology and Production Mastering of Pipes with a Diameter of 2520 mm]. *Vestnik YuUr-GU. Seriya «Metallurgiya»* [Bulletin of SUSU. Series "Metallurgy"], 2024, vol. 24, no. 2, pp. 29–40. DOI: 10.14529/met240204

3. Moiseev D.M., Baygutlin D.R., Sokolovskiy V.V., Buchelnikov V.D. Predskazanie uprugikh svoystv kristallicheskoy struktury splavov geyslera v ramkakh mashinnogo obucheniya [Prediction of Elastic Properties of the Crystal Structure of Heusler Alloys Using Machine Learning]. *Chelyabinskiy fiziko-matematicheskii zhurnal* [Chelyabinsk Physical and Mathematical Journal], 2025, vol. 10, no. 2, pp. 286–296. DOI: 10.47475/2500-0101-2025-10-2-286-296

4. Alov V.Z., Zhirikova Z.M., Tarchokova M.A. Empiricheskiy metod prognozirovaniya ekspluatatsionnykh svoystv polimernykh materialov [Empirical Method for Predicting the Operational Properties of Polymeric Materials]. *Izvestiya Kabardino-Balkarskogo GAU* [Proceedings of the Kabardino-Balkarian State Agrarian University], 2019, vol. 26, no. 4, pp. 36–40.

5. Programmer3. Data Center Cold Source Control Dataset. *Kaggle*, 2025, 1 file (CSV, 551.07 KB). Available at: <https://www.kaggle.com/datasets/programmer3/data-center-cold-source-control-dataset/data> (accessed: 13.06.2026).

6. Likhtina E.V. Sravnenie algoritmov klasterizatsii [Comparison of Clustering Algorithms]. In: *Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavтики: sbornik trudov XXV Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii (Krasnoyarsk, 15–19 aprelya 2019 g.)* [Current Problems of Aviation and Cosmonautics: Proceedings of the XXV International Scientific and Practical Conference (Krasnoyarsk, April 15–19, 2019)]. Krasnoyarsk, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, 2018, vol. 1, pp. 123–125.

7. Dmitriev I.N. Bystryy algoritm klasternogo analiza k-medoids [Fast k-medoids Clustering Algorithm]. *Prikladnaya diskretnaya matematika* [Applied Discrete Mathematics], 2018, no. 39, pp. 116–127. DOI: 10.17223/20710410/39/11

8. Arthur D., Vassilvitskii S. k-means++: The Advantages of Careful Seeding. In: *Proceedings of the Eighteenth Annual ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms*. Philadelphia, Society for Industrial and Applied Mathematics, 2007, pp. 1027–1035.
9. Nikitin O.R., Kislyakov A.N. Metod ierarkhicheskoy klasterizatsii tsifrovyykh mnogospektral'nykh izobrazheniy v zadachakh ekologicheskogo monitoringa [Method of Hierarchical Clustering of Digital Multispectral Images in Environmental Monitoring Tasks]. *Radiotekhnicheskie i telekommunikatsionnye sistemy* [Radio Engineering and Telecommunication Systems], 2021, no. 4, pp. 49–57. ISSN 2221-2574
10. Yan P., Li Z., Huang F., Wen W., Hsu L.-T. Fault Detection Algorithm for Gaussian Mixture Noises: An Application in Lidar/IMU Integrated Localization Systems. *NAVIGATION*, 72(1), pp. 49–56. DOI: 10.33012/navi.684
11. Martynov A.V., Kandyba V.E. Metod gradientnogo spуска v mashinnom obuchenii [Gradient Descent Method in Machine Learning]. *Shag v nauku* [Step into Science], 2022, no. 4, pp. 4–8.
12. Svetnik V., Liaw A., Tong C., Culberson J.C., Sheridan R.P., Feuston B.P. Random Forest: A Classification and Regression Tool for Compound Classification and QSAR Modeling. *Journal of Chemical Information and Computer Sciences*, 2003, vol. 43, no. 6, pp. 1947–1958.
13. Box G.E.P., Jenkins G.M., Reinsel G.C., Ljung G.M. *Time Series Analysis: Forecasting and Control*. 5th ed. Hoboken, John Wiley & Sons, 2015, 712 p. ISBN 978-1-118-67502-1.
14. Ryabchikov M.Yu., Parsunkin B.N., Andreev S.M., Golovko N.A. Ispol'zovanie modeli nagreva polosy pri upravlenii temperaturnym rezhimom v protyazhnoj pechi bashennogo tipa [Use of Heating of a Band Model for Temperature Mode Control in The Tower Type Lingered Furnace]. *Nejro-komp'yutery: razrabotka, primeneniye* [Neurocomputers: development, application], 2011, no. 5, pp. 41-50.

Сниткин Д.О. Сравнительный анализ методов машинного обучения для прогнозирования механических свойств холодного проката на основе данных системы охлаждения прокатного стана / Д.О. Сниткин, С.М. Андреев // Автоматизированные технологии и производства. 2026. №1(33). С.14-19.

D.O. Snitkin, S.M. Andreev Comparative Analysis of Machine Learning Methods for Predicting The Mechanical Properties of Cold Rolls Based on Data From The Rolls Cooling System. *Avtomatizirovannye tekhnologii i proizvodstva* [Automated technologies and production], 2026. no.1(33), pp.14-19. (In Russian).

LLL ОСЦИЛЛЯТОР

В.И. Безденежных, П.П. Безденежных

Курганский государственный университет, Курган, Россия

uralakademia@kurganstalmost.ru

Аннотация. Существуют осцилляторы с взаимным преобразованием кинетической энергии груза в энергию магнитного поля или с взаимным преобразованием кинетической энергии груза в энергию электрического поля. А также осцилляторы с взаимным преобразованием потенциальной энергии пружины в энергию электрического поля или с взаимным преобразованием потенциальной энергии пружины в энергию магнитного поля. Целью работы является построение математической модели трииндуктивного осциллятора. В LLL осцилляторе происходят свободные колебания тока (без питания извне). Это значит, что любая фаза является источником реактивной мощности двух других фаз. Это обстоятельство создает предпосылку снижения потока реактивной мощности в сети за счет взаимной компенсации реактивной мощности фаз. Другими словами, фазы симметричной нагрузки, по крайней мере, частично могут обмениваться реактивной мощностью между собой, а не с сетью.

Ключевые слова: осциллятор, энергия, трииндуктивный, колебания, реактивная мощность, фаза.

Известны два основных вида колебаний. Первое обусловлено взаимным преобразованием кинетической энергии груза в потенциальную энергию пружины. Второе – энергии магнитного поля катушки в энергию электрического поля конденсатора.

Относительно недавно описаны mL осцилляторы с взаимным преобразованием кинетической энергии груза в энергию магнитного поля [1] с собственной частотой колебаний

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{y}{mL}},$$

где y – параметрический коэффициент.

Или с взаимным преобразованием кинетической энергии груза в энергию электрического поля (mC осцилляторы) [2] с собственной частотой колебаний

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{y}{mC}}.$$

А также kC осцилляторы с взаимным преобразованием потенциальной энергии пружины в энергию электрического поля [3] с собственной частотой колебаний

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{yC}}.$$

Или с взаимным преобразованием потенциальной энергии пружины в энергию магнитного поля (kL осцилляторы) [4] с собственной частотой колебаний

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{yL}}.$$

Почти сразу возник вопрос, а нельзя ли создать осциллятор с взаимным преобразованием энергии магнитного поля в энергию магнитного же поля другой катушки? Подобный принцип известен в механике [5-7].

Целью работы является построение математической модели такого осциллятора.

На рисунке представлена схема LLL осциллятора.

Электрические уравнения LLL осциллятора:

$$\begin{aligned} BlnR \frac{d\varphi}{dt} \cos \varphi &= L \frac{di_1}{dt}, \\ BlnR \frac{d\varphi}{dt} \cos \left(\frac{2}{3} \pi - \varphi \right) &= L \frac{di_2}{dt}, \\ BlnR \frac{d\varphi}{dt} \cos \left(-\frac{2}{3} \pi - \varphi \right) &= L \frac{di_3}{dt}. \end{aligned}$$

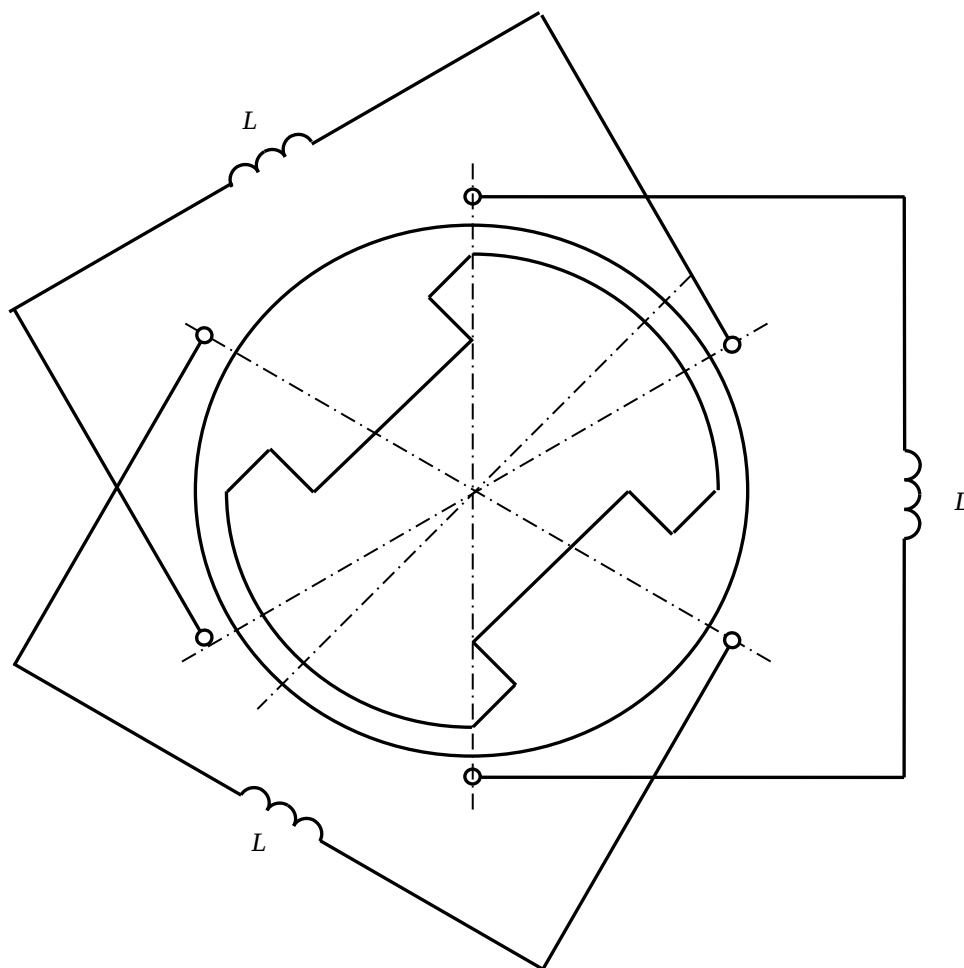
Отсюда

$$\begin{aligned} i_1 &= -\frac{BlnR}{L} \sin \varphi, \\ i_2 &= \frac{BlnR}{L} \sin \left(\frac{2}{3} \pi - \varphi \right), \\ i_3 &= \frac{BlnR}{L} \sin \left(-\frac{2}{3} \pi - \varphi \right). \end{aligned}$$

Механический момент равен

$$\begin{aligned} Bln_1 R \cos \varphi + Bln_2 R \cos \left(\frac{2}{3} \pi - \varphi \right) + Bln_3 R \cos \left(-\frac{2}{3} \pi - \varphi \right) &= \\ &= -Bln \frac{BlnR}{L} \sin \varphi R \cos \varphi + \\ &+ Bln \frac{BlnR}{L} \sin \left(\frac{2}{3} \pi - \varphi \right) R \cos \left(\frac{2}{3} \pi - \varphi \right) + \\ &+ Bln \frac{BlnR}{L} \sin \left(-\frac{2}{3} \pi - \varphi \right) R \cos \left(-\frac{2}{3} \pi - \varphi \right) = \\ &= -\frac{(BlnR)^2}{2L} \sin 2\varphi + \frac{(BlnR)^2}{2L} \sin \left(\frac{4}{3} \pi - 2\varphi \right) + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{(BlnR)^2}{2L} \sin\left(-\frac{4}{3}\pi - 2\varphi\right) = & + \frac{(BlnR)^2}{2L} \left(-\sin\frac{4}{3}\pi \cos 2\varphi - \cos\frac{4}{3}\pi \sin 2\varphi\right) = 0. \\ = -\frac{(BlnR)^2}{2L} \sin 2\varphi + & \\ + \frac{(BlnR)^2}{2L} \left(\sin\frac{4}{3}\pi \cos 2\varphi - \cos\frac{4}{3}\pi \sin 2\varphi\right) + & \end{aligned}$$



Модель LLL осциллятора

Это означает, что ротор вращается без ускорения и
 $\varphi = \omega_0 t$

Следовательно,

$$\begin{aligned} i_1 &= -\frac{BlnR}{L} \sin \omega_0 t, \\ i_2 &= \frac{BlnR}{L} \sin\left(\frac{2}{3}\pi - \omega_0 t\right), \\ i_3 &= \frac{BlnR}{L} \sin\left(-\frac{2}{3}\pi - \omega_0 t\right). \end{aligned}$$

Таким образом, в LLL осцилляторе происходят свободные колебания тока (без питания извне). Это значит, что любая фаза является источником реактивной мощности двух других фаз.

Это обстоятельство создает предпосылку снижения потока реактивной мощности в сети за счет взаимной

компенсации реактивной мощности фаз. Другими словами, фазы симметричной нагрузки, по крайней мере, частично могут обмениваться реактивной мощностью между собой, а не с сетью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Попов И.П. Инертно-индуктивные колебания в мехатронных системах / И.П. Попов // Автоматизированные технологии и производства. 2022. № 1 (25). С. 23–25.
2. Павлов В.Д. Паразитные вибрации в автоматизированных комплексах / В.Д. Павлов // Автоматизированные технологии и производства. 2024. № 1 (29). С. 10–12.
3. Павлов В.Д. Управляемая искусственная упругость в мехатронных системах / В.Д. Павлов // Автоматизированные технологии и производства. 2022. № 1 (25). С. 20–22.
4. Попов И.П. Спонтанные упруго-индуктивные колебания в технических средствах автоматизации

/ И.П. Попов // Автоматизированные технологии и производства. 2019. № 1 (19). С. 18-20.

5. Безденежных В.И. Трехмассовый осциллятор для мехатронных систем / В.И. Безденежных // Автоматизированные технологии и производства. 2025. №1(31). С.21-23.

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

7. Попов И.П. Попутная оптимизация производительной мощности решетных сортировальных машин / И.П. Попов // Автоматизированные технологии и производства. 2020. № 1 (21). С. 19-21.

LLL OSCILLATOR

V.I. Bezdeneshnykh, P.P. Bezdeneshnykh

Kurgan State University, Kurgan, Russia

uralakademia@kurganstalmost.ru

Abstract. There are oscillators with the mutual transformation of the kinetic energy of the load into the energy of the magnetic field or with the mutual transformation of the kinetic energy of the load into the energy of the electric field. And also oscillators with the mutual transformation of the potential energy of the spring into the energy of the electric field or with the mutual transformation of the potential energy of the spring into the energy of the magnetic field. The aim of this work is to build a mathematical model of a tri-inductive oscillator. In the *LLL* oscillator, free current fluctuations occur (without external power supply). This means that any phase is a source of reactive power for the other two phases. This circumstance creates a prerequisite for reducing the flow of reactive power in the network due to the mutual compensation of the reactive power of the phases. In other words, the phases of a balanced load can at least partially exchange reactive power with each other, and not with the network.

Keywords: oscillator, energy, tri-inductive, oscillations, reactive power, phase.

REFERENCES

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

2. Pavlov V.D. Parasitic vibrations in automated complexes [Parazitnyye vibratsii v avtomatizirovannykh kompleksakh]. *Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva [Automated technologies and production]*, 2024, no. 1 (29), pp. 10-12. (In Russian)

3. 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)

4. Popov I.P. Spontaneous elastic-inductive oscillations 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)

5. Bezdeneshnykh V.I. Three-mass oscillator for mechatronic systems [Trehmassovyy ostsillyator dlya mekhatronnykh sistem]. *Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva [Automated technologies and production]*, 2025, no. 1(31), pp.21-23. (In Russian)

6. Pavlov V.D. Vibrator for automated complexes [Vibrator dlya avtomatizirovannykh kompleksov]. *Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva [Automated technologies and production]*, 2024, no. 1 (29), pp. 20-22. (In Russian)

7. Popov I.P. Concurrent optimization of the productive capacity of screen sorting machines [Poputnaya optimizatsiya proizvoditel'noy moshchnosti reshetnykh sortiroval'nykh mashin]. *Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva [Automated technologies and production]*, 2020, no. 1 (21), pp. 19-21. (In Russian)

Безденежных, В.И. LLL осциллятор/ В.И. Безденежных, П.П. Безденежных // Автоматизированные технологии и производства. 2026. №1(33). С.20-22.

V.I. Bezdeneshnykh, P.P. Bezdeneshnykh LLL Oscillator [Automated technologies and production], 2026. no.1(33), pp.20-22. (In Russian).

ПАРАЛЛЕЛЬНО-ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ ПРИ ВЫНУЖДЕННЫХ КОЛЕБАНИЯХ

И.П. Попов

Курганский государственный университет, Курган, Российская Федерация

uralakademia@kurganstalmost.ru

Аннотация. Для рассмотренного параллельно-последовательного соединения элементов мехатронных систем классические методы, основанные на решении дифференциальных уравнений второго порядка, многократно усложняются и требуют решения систем уравнений, которые сводятся к дифференциальным уравнениям более высоких порядков. Использование символического (комплексного) описания механических процессов и систем позволяет применять вместо этого простые и компактные алгебраические методы, трудоемкость которых меньше в десятки раз. Векторные диаграммы, не являясь необходимой составляющей исследования механических систем, имеют существенное методическое значение, поскольку показывают количественные и фазные соотношения между параметрами систем.

Ключевые слова: потребители механической мощности, вынужденные колебания, параллельное, последовательное соединение, резонанс сил, резонанс скоростей.

Параллельно-последовательное соединение элементов мехатронных систем представлено на рис. 1.

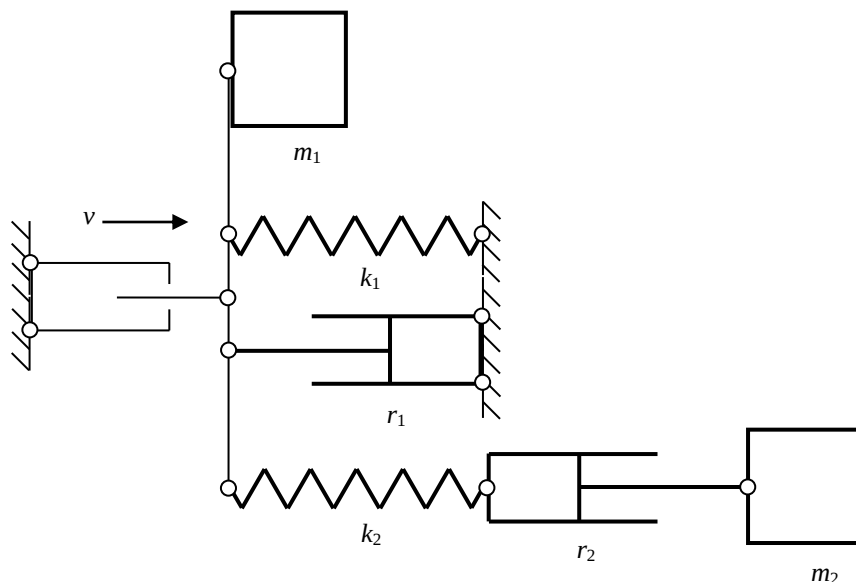


Рис. 1. Схема параллельно-последовательного соединения

Ранее [1] было установлено, что

$$\underline{y} = \frac{1}{\underline{z}}, \quad (1)$$

$$\underline{z} = \sum_{j=1}^n \underline{z}_j, \quad (2)$$

$$\dot{\underline{F}} = \underline{z} \dot{\underline{V}} = ZV e^{i\varphi}, \quad (3)$$

где $\underline{y}$ – адмитанс в комплексном изображении [2], $\underline{z}$ – импеданс в комплексном изображении [3-5], $\dot{\underline{F}}$ – комплексная гармоническая сила [5, 6], $\dot{\underline{V}}$ – комплексная гармоническая скорость, φ – фазовый сдвиг между ними [7-10].

С учетом (1)

$$\underline{z}_2 = \frac{1}{\underline{y}_2}.$$

С учетом (2)

$$\underline{z} = \underline{z}_1 + \underline{z}_2.$$

С учетом (3)

$$\dot{\underline{V}} = \frac{\dot{\underline{F}}}{\underline{z}}.$$

Пример 1. $\dot{\underline{F}} = 100e^{i0}$ (Н), $\omega = 2$ рад/с, $m = 10$ кг, $k = 20$ (кг·с⁻²), $r = 7$ (кг·с⁻¹). Определить все остальные параметры.

$$\underline{z}_2 = \frac{1}{\underline{y}_2} = \frac{1}{15,135 \cdot 10^{-2} e^{i19,29^\circ}} \approx 6,607e^{-i19,29^\circ} \text{ (кг} \cdot \text{с}^{-1}\text{)},$$

$$\underline{z} = \underline{z}_1 + \underline{z}_2 = 12,207e^{i55^\circ} + 6,607e^{-i19,29^\circ} = 15,372e^{i30,57^\circ} \text{ (кг} \cdot \text{с}^{-1}\text{)},$$

$$\dot{\underline{V}} = \frac{\dot{\underline{F}}}{\underline{z}} = \frac{100}{15,372e^{i30,57^\circ}} = 6,505e^{-i30,57^\circ} \text{ (м} \cdot \text{с}^{-1}\text{)},$$

$$\dot{F}_{m1} = \underline{x}_{m1} \dot{\underline{V}} = 20e^{i90^\circ} \cdot 6,505e^{-i30,57^\circ} = 130,1e^{i59,43^\circ} \text{ (Н)},$$

$$\dot{F}_{k1} = \underline{x}_{k1} \dot{\underline{V}} = 10e^{-i90^\circ} \cdot 6,505e^{-i30,57^\circ} = 65,05e^{-i120,57^\circ} \text{ (Н)},$$

$$\dot{F}_{r1} = \underline{r}_1 \dot{\underline{V}} = 7e^{i0} \cdot 6,505e^{-i30,57^\circ} = 45,535e^{-i30,57^\circ} \text{ (Н)},$$

$$\dot{F}_2 = \underline{z}_2 \dot{\underline{V}} = 6,607e^{-i19,29^\circ} \cdot 6,505e^{-i30,57^\circ} = 42,979e^{-i49,86^\circ} \text{ (Н)},$$

$$\begin{aligned} \dot{V}_{m2} &= \underline{b}_{m2} \dot{F}_2 = 5 \cdot 10^{-2} e^{-i90^\circ} \cdot 42,979e^{-i49,86^\circ} = \\ &= 2,149e^{-i139,86^\circ} \text{ (м} \cdot \text{с}^{-1}\text{)}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{V}_{k2} &= \underline{b}_{k2} \dot{F}_2 = 10 \cdot 10^{-2} e^{i90^\circ} \cdot 42,979e^{-i49,86^\circ} = \\ &= 4,298e^{i40,14^\circ} \text{ (м} \cdot \text{с}^{-1}\text{)}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{V}_{r2} &= \underline{g}_2 \dot{F}_2 = 14,286 \cdot 10^{-2} \cdot 42,979e^{-i49,86^\circ} = \\ &= 6,14e^{-i49,86^\circ} \text{ (м} \cdot \text{с}^{-1}\text{)}. \end{aligned}$$

Расчет с применением дифференциальных уравнений занял бы несколько страниц.

Данным примера 1 соответствует векторная диаграмма на рисунке 2.

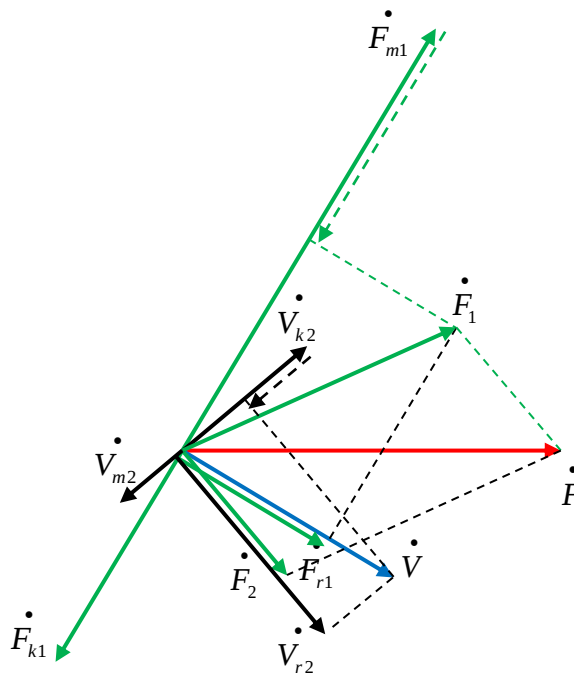


Рис. 2. Параллельно-последовательное соединение

Пример 2. Для параллельно-последовательного (двойного) резонанса. Отличие от примера 1 состоит в том, что $k = 40$ (кг·с⁻²).

$$\underline{z}_1 = \underline{z}_2 = r = 7e^{i0^\circ} \text{ (кг} \cdot \text{с}^{-1}\text{)},$$

$$\underline{z} = \underline{z}_1 + \underline{z}_2 = 2r = 14e^{i0^\circ} \text{ (кг} \cdot \text{с}^{-1}\text{)},$$

$$\dot{\underline{V}} = \frac{\dot{\underline{F}}}{\underline{z}} = \frac{100}{14e^{i0^\circ}} = 7,143e^{i0^\circ} \text{ (м} \cdot \text{с}^{-1}\text{)},$$

$$\dot{F}_{m1} = \underline{x}_{m1} \dot{\underline{V}} = 20e^{i90^\circ} \cdot 7,143e^{i0^\circ} = 142,857e^{i90^\circ} \text{ (Н)},$$

$$\dot{F}_{k1} = \underline{x}_{k1} \dot{\underline{V}} = 20e^{-i90^\circ} \cdot 7,143e^{i0^\circ} = 142,857e^{-i90^\circ} \text{ (Н)},$$

$$\dot{F}_{r1} = \underline{r}_1 \dot{\underline{V}} = 7e^{i0^\circ} \cdot 7,143e^{i0^\circ} = 50e^{i0^\circ} \text{ (Н)},$$

$$\dot{F}_2 = \underline{z}_2 \dot{\underline{V}} = 7e^{i0^\circ} \cdot 7,143e^{i0^\circ} = 50e^{i0^\circ} \text{ (Н)},$$

$$\dot{V}_{m2} = \underline{b}_{m2} \dot{F}_2 = 5 \cdot 10^{-2} e^{-i90^\circ} \cdot 50e^{i0^\circ} = 2,5e^{-i90^\circ} \text{ (м} \cdot \text{с}^{-1}\text{)},$$

$$\dot{V}_{k2} = \underline{b}_{k2} \dot{F}_2 = 10 \cdot 10^{-2} e^{i90^\circ} \cdot 50e^{i0^\circ} = 2,5e^{i90^\circ} \text{ (м} \cdot \text{с}^{-1}\text{)},$$

$$\dot{V}_{r2} = \underline{g}_2 \dot{F}_2 = 14,286 \cdot 10^{-2} \cdot 50e^{i0^\circ} = 7,143e^{i0^\circ} \text{ (м} \cdot \text{с}^{-1}\text{)}.$$

Данным примера 2 соответствует векторная диаграмма на рисунке 3.

Для рассмотренного параллельно-последовательного соединения элементов мехатронных систем классические методы, основанные на решении дифференциальных уравнений второго порядка, многократно усложняются и требуют решения систем уравнений, которые сводятся к дифференциальным уравнениям более высоких порядков.

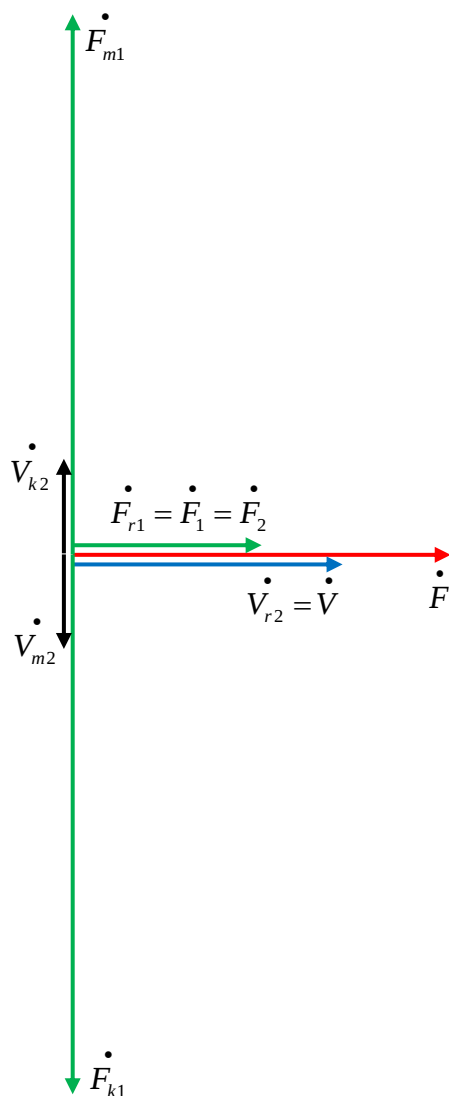


Рис. 3. Параллельно-последовательный (двойной) резонанс

Использование символического (комплексного) описания механических процессов и систем позволяет применять вместо этого простые и компактные алгебраические методы, трудоемкость которых меньше в десятки раз.

Векторные диаграммы, не являясь необходимой составляющей исследования механических систем, имеют существенное методическое значение, поскольку показывают количественные и фазные соотношения между параметрами систем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Попов И.П. Связь между механическими величинами мехатронных систем при вынужденных колебаниях / И.П. Попов // Автоматизированные технологии и производства. 2025. № 2(32). С.18-20.
2. Попов, И.П. Реактансы и сассептансы мехатронных систем при параллельном соединении элементов / И.П. Попов // Автоматизированные технологии и производства. 2025. №1(31). С.10-14.
3. Попов И.П. Спонтанные упруго-индуктивные колебания в технических средствах автоматизации / И.П. Попов // Автоматизированные технологии и производства. 2019. № 1 (19). С. 18-20.
4. Попов И.П. Инертно-индуктивные колебания в мехатронных системах / И.П. Попов // Автоматизированные технологии и производства. 2022. № 1 (25). С. 23–25.
5. Попов И.П. Резонанс сил в мехатронных системах / И.П. Попов // Автоматизированные технологии и производства. 2024. № 1 (29). С. 17-19.
6. Попов И.П. О возможности автоматизированной балансировки вибрационных механизмов / И.П. Попов // Автоматизированные технологии и производства. 2020. № 1 (21). С. 10-12.
7. Попов И.П. Попутная оптимизация производительной мощности решетчатых сортировальных машин / И.П. Попов // Автоматизированные технологии и производства. 2020. № 1 (21). С. 19-21.
8. Павлов В.Д. Паразитные вибрации в автоматизированных комплексах / И.П. Попов // Автоматизированные технологии и производства. 2024. № 1 (29). С. 10-12.
9. Павлов В.Д. Вибратор для автоматизированных комплексов / И.П. Попов / И.П. Попов // Автоматизированные технологии и производства. 2024. № 1 (29). С. 20-22.
10. Павлов В.Д. Условия автобалансировки вибрационных механизмов с постоянным приведенным моментом инерции // Автоматизированные технологии и производства. 2024. №2(30). С.16-18.

PARALLEL-SERIAL CONNECTION OF ELEMENTS OF MECHATRONIC SYSTEMS UNDER FORCED OSCILLATIONS

I.P. Popov

Kurgan State University, Kurgan, Russia

uralakademia@kurganstalmost.ru

Abstract. For the considered parallel-serial connection of elements of mechatronic systems, classical methods based on the solution of second-order differential equations are greatly complicated and require the solution of systems of equations that are reduced to differential equations of higher orders. Using a symbolic (complex) description of mechanical processes and systems allows for the use of simple and compact algebraic methods instead, which are tens of times less labor-intensive. Vector diagrams, while not a necessary component of mechanical system research, are of significant methodological value because they show the quantitative and phase relationships between system parameters.

Keywords: mechanical power consumers, forced oscillations, parallel and series connections, force resonance, velocity resonance.

REFERENCES

1. Popov I.P. The relationship between mechanical quantities of mechatronic systems under forced vibrations [Svyaz' mezhdru mekhanicheskimi velichinami mekhatronnykh sistem pri vynuzhdennykh kolebaniyakh]. *Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva [Automated technologies and production]*, 2025, no. 2(32), pp.18-20. (In Russian).
2. Popov I.P. Reactance and Susceptions of Mechatronic Sys-tems With Parallel Connection of Elements [Reaktansy i sasseptansy mekhatronnykh sistem pri parallel'nom soyedinenii elementov]. *Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva [Automated technologies and production]*, 2025, no. 1(31), pp.10-14. (In Russian).
3. Popov I.P. Spontaneous elastic-inductive oscillations 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)
4. Popov I.P. Inertial-inductive oscillations in mechatronic systems [Inertno-induktivnyye kolebaniya v mekhatronnykh sistemakh]. *Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva [Automated technologies and production]*, 2022, no. 1 (25), pp. 23–25. (In Russian)
5. Popov I.P. Resonance of forces in mechatronic systems [Rezonans sil v mekhatronnykh sistemakh]. *Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva [Automated technologies and production]*, 2024, no. 1 (29), pp. 17-19. (In Russian)
6. Popov I.P. On the possibility of automated balancing of vibration mechanisms [O vozmozhnosti avtomatizirovannoy balansirovki vibratsionnykh mekhanizmov]. *Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva [Automated technologies and production]*, 2020, no. 1 (21), pp. 10-12. (In Russian)
7. Popov I.P. Concurrent optimization of the productive capacity of screen sorting machines [Poputnaya optimizatsiya proizvoditel'noy moshchnosti reshetnykh sortiroval'nykh mashin]. *Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva [Automated technologies and production]*, 2020, no. 1 (21), pp. 19-21. (In Russian)
8. Pavlov V.D. Parasitic vibrations in automated complexes [Parazitnyye vibratsii v avtomatizirovannykh kompleksakh]. *Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva [Automated technologies and production]*, 2024, no. 1 (29), pp. 10-12. (In Russian)
9. Pavlov V.D. Vibrator for automated complexes [Vibrator dlya avtomatizirovannykh kompleksov]. *Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva [Automated technologies and production]*, 2024, no. 1 (29), pp. 20-22. (In Russian)
10. Pavlov, V.D. Conditions of auto-balancing of vibration mechanisms with a constant reduced moment of inertia [Usloviya avtobalansirovki vibratsionnykh mekhanizmov s postoyannym privedennym momentom inertsii]. *Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva [Automated technologies and production]*, 2024, no. 2(30), pp.16-18. (In Russian)

Попов, И.П. Параллельно-последовательное соединение элементов мехатронных систем при вынужденных колебаниях / И.П. Попов // Автоматизированные технологии и производства. 2026. №1(33). С.23-26.

I.P. Popov Parallel-Serial Connection of Elements of Mechatronic Systems Under Forced Oscillations. *Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva [Automated technologies and production]*, 2026, no.1(33), pp.23-26. (In Russian).

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НАГРЕВА МНОГОСЛОЙНОГО ПРОКАТНОГО ВАЛКА В ПЛАМЕННОЙ ПЕЧИ В ПРОЦЕССЕ ТЕРМООБРАБОТКИ

А.П. Яковлева

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

yakovleva_nastyusija@mail.ru

Аннотация. Качество закалки во многом определяет твёрдость, износостойкость и эксплуатационную стойкость дорогостоящего прокатного вала. Равномерный прогрев сечения без чрезмерных температурных перепадов, способных вызвать трещины и коробление, является обязательным условием. Для объёмной закалки крупных составных валков рационально применять пламенную печь. Она обеспечивает высокую тепловую мощность и большой объём камеры, равномерный сквозной нагрев, экономичность топлива и плавно управляемый режим «подъём – выдержка». В работе построена математическая модель нагрева двуслойного прокатного вала (износостойкий рабочий слой и стальная сердцевина) в пламенной печи при термической обработке. Модель основана на уравнении теплопроводности в цилиндрических координатах, записанном для каждого слоя, с условиями сопряжения на границе раздела. Задача решается неявной конечно-разностной схемой с гармоническим осреднением теплопроводности на гранях методом прогонки (упрощённым методом Томаса). Получены кривые нагрева и радиальные профили температуры, определены максимальный перепад по сечению и время выравнивания; показано, что прогрев лимитирует рабочий слой с наименьшим коэффициентом температуропроводности. Модель позволяет обоснованно назначать режим нагрева под закалку и снижать риск образования термических трещин.

Ключевые слова: прокатный валок, двуслойный цилиндр, пламенная печь, теплопроводность, термообработка, метод прогонки.

ВВЕДЕНИЕ

Прокатные валки относятся к наиболее ответственным и дорогостоящим элементам оборудования прокатных станков. Их стойкость и эксплуатационная надёжность во многом определяют качество готового проката и экономику производства. Современные валки часто изготавливают составными (многослойными). Износостойкий рабочий слой обеспечивает твёрдость и сопротивление износу контактной поверхности, а вязкая стальная сердцевина (ось) воспринимает изгибающие и крутящие нагрузки. Наиболее распространены двуслойные валки «рабочий слой — сердцевина», получаемые центробежной заливкой, электрошлаковой наплавкой или иными методами [1].

Эксплуатационные свойства вала формируются на стадии термической обработки – предварительного нагрева, нормализации, закалки и отпуска. Из-за большой массы и сравнительно низкой температуропроводности металла нагрев крупного вала протекает медленно, а по сечению возникают значительные перепады температуры. Перепады порождают термические напряжения, которые при превышении предела прочности приводят к образованию трещин и браку [2]. Назначение рационального режима нагрева – допустимой скорости подъёма температуры и достаточной длительности изотермической выдержки – требует знания температурного поля по сечению вала.

Термическую обработку крупных валков обычно проводят в пламенных (топливных) печах, где теплота к садке подводится за счёт сжигания топлива. Особенность таких печей состоит в том, что при характерных для термообработки температурах (700–900 °C) теплообмен между печной средой и поверхностью вала осуществляется преимущественно излучением факела, продуктов сгорания и раскалённой кладки [3].

Многослойность существенно усложняет задачу расчёта – слои различаются плотностью, теплоёмкостью и теплопроводностью, а на границах раздела происходит «преломление» теплового потока. Тепловую работу печей и режимы термообработки металла в них в настоящее время исследуют преимущественно методами математического моделирования [4]. Для составного вала с зависящими от температуры свойствами и существенно нелинейным радиационным теплообменом аналитические решения практически отсутствуют, что обуславливает необходимость численного моделирования.

Цель работы – построить математическую модель нагрева многослойного прокатного вала в пламенной печи при термообработке, учитывающую слоистую структуру, зависимость теплофизических свойств от температуры, реализовать её разностной схемой и на примере двуслойного вала проанализировать температурное поле и перепад температуры по сечению для обоснования режима нагрева.

СОВРЕМЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

В последние годы в России активно развиваются исследования тепловых процессов при изготовлении и термообработке прокатных валков. Работы ведутся по двум основным направлениям – численное моделирование нагрева с уточнением теплофизических свойств и создание составных (наплавленных, многослойных) рабочих слоёв с обоснованием температурных режимов их термообработки.

В области численного моделирования П.И. Жуков, А.В. Фомин и А.И. Глушенко развивают сеточные модели нестационарной теплопроводности для нагрева стали, предлагая «обучение» модели по технологическим данным вместо табличной аппроксимации теплофизических

коэффициентов. Обученная модель воспроизводит температуру со средней погрешностью около 18,8 °С, близкой к классической адаптации по справочным данным (18,1 °С) [5]. Исследование отражает тренд на построение «цифровых двойников» печей и подтверждает, что точность моделей определяется корректным заданием зависящих от температуры свойств.

В исследовании, опубликованном в журнале «Чёрные металлы», изучено структурообразование в трёхслойном сплаве, наплавленном на валок прокатного стана (порошковая проволока ПП-Нп-25Х5ФМС на сталь 9ХВ). Показано, что рационально выбранные температурные режимы термообработки, предварительного и сопутствующего подогрева после наплавки позволяют избежать макро- и микротрещин в зоне термического влияния [6]. Недостаточная скорость нагрева при наплавке приводит к формированию термических напряжений на границе сплавления и неоднородной структуре покрытия.

Современные российские исследования отражают переход к составным и многослойным рабочим слоям валков и необходимость точного расчёта и управления температурными полями при их нагреве и термообработке для предотвращения трещин на границах слоёв. Предлагаемая в работе модель нагрева двуслойного валка в пламенной печи соответствует направлению, обеспечивая оценку перепада температуры по сечению и обоснование режима закалки.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Рассматривается длинный валок, для бочки которого осевыми градиентами температуры можно пренебречь; тогда температурное поле осесимметрично и одномерно по радиальной координате r [7]. Валок образован двумя концентрическими слоями (рис. 1): стальной сердцевинной (слой 1, $0 \leq r < R_1$) и износостойким рабочим слоем (слой 2, $R_1 \leq r \leq R$), где R_1 – радиус границы раздела, R – наружный радиус валка.

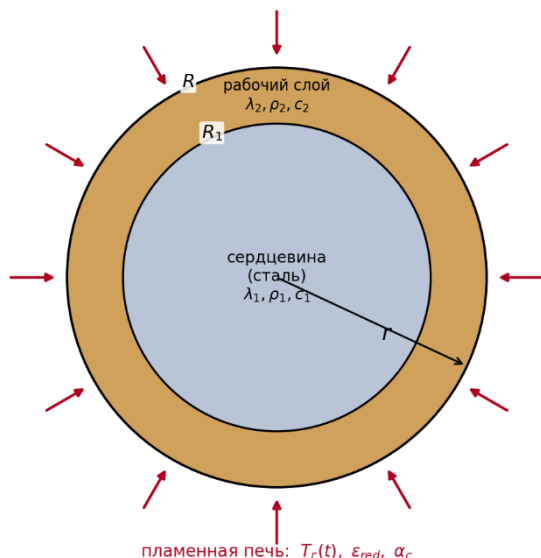


Рис. 1. Расчётная схема поперечного сечения двуслойного валка

Распределение температуры $T_i(r, t)$ в каждом из двух слоёв ($i = 1$ – сердцевина, $i = 2$ – рабочий слой) описывается уравнением теплопроводности в цилиндрических координатах:

$$\rho_i c_i(T) \frac{\partial T_i}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda_i(T) \frac{\partial T_i}{\partial r} \right), i = 1, 2 \quad (1)$$

где ρ_i — плотность; c_i — удельная теплоёмкость; λ_i — коэффициент теплопроводности i -го слоя, в общем случае зависящие от температуры; t — время.

Уравнение записывается в области $0 \leq r < R_1$ для слоя 1 и $R_1 \leq r \leq R$ для слоя 2.

Начальное условие — равномерная температура T_0 в обоих слоях:

$$T_i(r, 0) = T_0, i = 1, 2 \quad (2)$$

В центре валка из условия симметрии тепловой поток обращается в нуль:

$$\frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0 \quad (3)$$

На поверхности валка в пламенной печи теплообмен носит радиационно-конвективный характер с преобладанием излучения факела, продуктов сгорания и кладки [8]. Соответствующее граничное условие имеет вид:

$$-\lambda_2 \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R} = \varepsilon_{red} \sigma_0 \left[(T_g + 273)^4 - (T_R + 273)^4 \right] + \alpha_c (T_g - T_R) \quad (4)$$

где T_g — температура печных газов (среды); T_R — температура поверхности валка; ε_{red} — приведённая степень черноты системы «газ — кладка — поверхность»; α_c — коэффициент конвективной теплоотдачи от продуктов сгорания; $\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴) — постоянная Стефана — Больцмана; температуры в радиационном члене берутся в кельвинах.

Приведённая степень черноты учитывает многократное переотражение излучения между поверхностью садки и кладкой и в инженерной практике оценивается соотношением [9]

$$\varepsilon_{red} = \left[\frac{1}{\varepsilon_s} + \frac{A_s}{A_w} \left(\frac{1}{\varepsilon_w} - 1 \right) \right]^{-1} \quad (5)$$

где ε_s , ε_w — степени черноты поверхности валка и кладки; A_s , A_w — их площади. В отсутствие надёжных данных ε_{red} задаётся как эффективный параметр модели по результатам тепловых измерений в печи.

На границе раздела слоёв $r = R_1$ при идеальном тепловом контакте выполняются условия непрерывности температуры и теплового потока:

$$T_1(R_1, t) = T_2(R_1, t) \quad (6)$$

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} \Big|_{r=R_1} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} \Big|_{r=R_1} \quad (7)$$

При наличии термического сопротивления контакта R_k (например, на границе наплавленного или залитого слоя) второе условие заменяется условием непрерывности потока со скачком температуры:

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} \Big|_{R_1} = \frac{1}{R_k} [T_1(R_1, t) - T_2(R_1, t)] \quad (8)$$

Режим нагрева задаётся программой изменения температуры печных газов: линейный подъём со скоростью β до уставки T_{set} с последующей изотермической выдержкой:

$$T_g(t) = T_0 + \beta t \quad (t \leq t_1); \quad T_g(t) = T_{set} \quad (t > t_1) \quad (9)$$

Интенсивность прогрева слоёв характеризуется коэффициентом температуропроводности:

$$a_i = \frac{\lambda_i}{\rho_i c_i} \quad (10)$$

Сформулированная начально-краевая задача (1)–(10) полностью определяет нестационарное температурное поле двуслойного валка при заданной программе нагрева.

ЧИСЛЕННАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

Задача решается конечно-разностным методом. Радиус валка разбивается равномерной сеткой узлов r_i ($i = 0, 1, \dots$,

N) с шагом Δr ; производная по времени аппроксимируется по неявной схеме, а диффузионный член – центральными разностями в консервативной (потокковой) форме, что обеспечивает баланс теплоты и непрерывность потока на границе слоёв. Для внутреннего узла i получается трёхдиагональное уравнение, связывающее температуры трёх соседних узлов на новом временном слое:

$$A_i T_{i-1}^{n+1} + B_i T_i^{n+1} + C_i T_{i+1}^{n+1} = D_i, \quad i = 1, \dots, N-1 \quad (11)$$

с коэффициентами

$$A_i = -\frac{r_{i-1/2} \lambda_{i-1/2}}{r_i \Delta r^2}, \quad C_i = -\frac{r_{i+1/2} \lambda_{i+1/2}}{r_i \Delta r^2} \quad (12)$$

$$B_i = \frac{\rho_i c_i}{\Delta t} - A_i - C_i, \quad D_i = \frac{\rho_i c_i}{\Delta t} T_i^n \quad (13)$$

где Δt – шаг по времени; $r_{i\pm 1/2}$ – радиусы граней между узлами; верхние индексы n и $n+1$ относятся к предыдущему и искомому временным слоям. Коэффициент теплопроводности на грани между узлами, принадлежащими разным слоям, вычисляется как среднее гармоническое, что обеспечивает непрерывность теплового потока на границе раздела:

$$\lambda_{i+1/2} = \frac{2 \lambda_i \lambda_{i+1}}{\lambda_i + \lambda_{i+1}} \quad (14)$$

Граничные условия замыкают систему: в центре (узел 0) используется условие симметрии (3), на поверхности (узел N) – радиационно-конвективное условие (4), нелинейный лучистый член которого линейризуется на каждом шаге по времени с уточнением температуры поверхности.

Полученная система линейных алгебраических уравнений с трёхдиагональной матрицей решается упрощённым методом Томаса (методом прогонки). Прямым ходом, от центра к поверхности, последовательно вычисляются прогоночные коэффициенты:

$$\alpha_{i+1} = \frac{-C_i}{B_i + A_i \alpha_i}, \quad \beta_{i+1} = \frac{D_i - A_i \beta_i}{B_i + A_i \alpha_i} \quad (15)$$

После чего обратным ходом, от поверхности к центру, восстанавливается температурное поле на новом временном слое:

$$T_i^{n+1} = \alpha_{i+1} T_{i+1}^{n+1} + \beta_{i+1}, \quad i = N-1, \dots, 0 \quad (16)$$

Метод прогонки требует числа арифметических операций, пропорционального числу узлов (порядка N), и при выполнении условия диагонального преобладания $|B_i| \geq |A_i| + |C_i|$, обеспечиваемого неявной схемой, обладает устойчивым и экономичным счётом. Это позволяет вести расчёт с крупным шагом по времени на протяжении много часового цикла нагрева. Зависимость свойств $\lambda_i(T)$, $c_i(T)$ учитывается пересчётом коэффициентов по температуре с предыдущего временного слоя.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Расчёт выполнен для двуслойного вала радиусом $R = 300$ мм: стальная сердцевина 0-220 мм и высокохромистый рабочий слой 220-300 мм. Принятые теплофизические характеристики и соответствующие коэффициенты температуропроводности приведены в таблице. Программа

нагрева: подъём температуры печных газов от 20°C со скоростью $\beta = 80^\circ\text{C/ч}$ до уставки $T_{\text{set}} = 880^\circ\text{C}$ с последующей выдержкой; приведённая степень черноты $\varepsilon_{\text{red}} = 0,75$, коэффициент конвективной теплоотдачи $\alpha_c = 20 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$. При рабочих температурах печи ($700\text{--}880^\circ\text{C}$) на лучистый теплообмен приходится около 85-90 % подводимого к поверхности теплового потока, что подтверждает определяющую роль излучения в пламенной печи.

Таблица 1

Теплофизические характеристики слоёв вала

Слой	λ , Вт/(м·К)	ρ , кг/м ³	c , Дж/(кг·К)	a , м ² /с
Сердцевина (сталь)	38	7850	490	$9,88 \cdot 10^{-6}$
Рабочий слой	20	7500	540	$4,94 \cdot 10^{-6}$

На рис. 2 представлены кривые нагрева характерных точек сечения: поверхности, межслойной границы и центра вала, а также программная температура печных газов. Поверхность следует за температурой газов с заметным отставанием, а внутренние точки прогреваются с возрастающим запаздыванием по мере удаления от поверхности; наибольшее запаздывание имеет центр сердцевины.

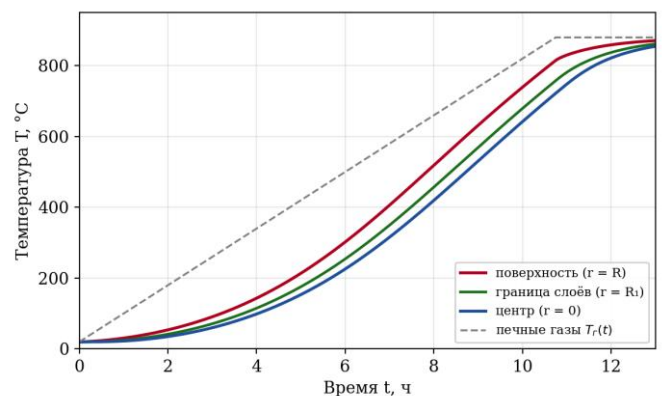


Рис. 2. Кривые нагрева характерных точек сечения и температура печных газов

Радиальные распределения температуры в различные моменты времени показаны на рис. 3. На межслойной границе наклон профиля изменяется скачкообразно из-за различия коэффициентов теплопроводности: в рабочем слое с меньшей теплопроводностью градиент температуры больше. Рабочий слой, обладающий наименьшим коэффициентом температуропроводности ($4,94 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ против $9,88 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ у стальной сердцевины), лимитирует скорость прогрева сечения.

Перепад $\Delta T(t)$ служит критерием термонапряжённого состояния. В первом приближении кольцевые термические напряжения оцениваются соотношением

$$\Delta T(t) = T_R(t) - T_C(t), \quad \sigma_\theta^{\text{max}} \approx \frac{E \alpha_T \Delta T_{\text{max}}}{1 - \nu} \leq [\sigma] \quad (17)$$

где E – модуль упругости; α_T – коэффициент линейного расширения; ν – коэффициент Пуассона; $[\sigma]$ – допускаемое напряжение.

Ограничение ΔT_{max} снизу определяет максимально допустимую скорость нагрева β , а условие достижения требуемого ΔT в конце цикла – длительность выдержки.

Модель позволяет выбирать скорость подъёма температуры и время выдержки, минимизируя как риск трещинообразования и непроизводительные затраты времени и энергии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана математическая модель нагрева многослойного прокатного валка в пламенной печи при термообработке, основанная на уравнении теплопроводности для составного цилиндра с условиями сопряжения на межслойных границах. Модель учитывает слоистую структуру, зависимость теплофизических свойств от температуры, преобладание теплообмена с факелом, продуктами сгорания и кладкой.

Численная реализация по неявной конечно-разностной схеме с гармоническим осреднением теплопроводности на гранях и решением трёхдиагональной системы упрощённым методом Томаса (прогонки) обеспечивает консервативность теплового потока и устойчивость счёта при крупном шаге по времени. Расчёты для двуслойного валка показали, что лимитирующим элементом прогрева является рабочий слой с наименьшим коэффициентом температуропроводности, а максимальный перепад температуры по сечению (около 101 °С) достигается в конце стадии подъёма температуры газов. Модель даёт количественную основу для назначения допустимой скорости нагрева и длительности изотермической выдержки и может быть использована при проектировании и оптимизации режимов термообработки составных валков в пламенных печах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мартини, Ф. Опорные и рабочие валки для станов горячей прокатки / Ф. Мартини, К.А. Гостев // *Сталь*. 1998. № 1. С. 42-44.
2. Современные высокопроизводительные прокатные валки, особенности и перспективы их эксплуатации / М. Синнаве, К. Гостев, В.В. Глухов, В.С. Смирнов // *Сталь*. 2001. № 8. С. 2-8.

3. Тимошпольский, В.И. Тепловая работа нагревательных печей прокатного производства в промышленных условиях. Сообщение 2. Экспериментальные исследования при нагреве заготовок в печах с механизированным подом / В.И. Тимошпольский, И.А. Трусова // *Литьё и металлургия*. 2011. № 1. С. 62-71.

4. Бирюков, А.Б. Математическое моделирование процесса тепловой обработки металла в печах / А.Б. Бирюков, А.И. Волошин, Т.Г. Олешкевич // *Сталь*. 2016. № 1. С. 71-75.

5. Жуков, П.И. Неявная адаптация сеточной модели нестационарной теплопроводности к нагреваемому веществу / П.И. Жуков, А.В. Фомин, А.И. Глушенко // *Управление большими системами: труды XVII Всероссийской школы-конференции молодых учёных*. М.: ИПУ им. В.А. Трапезникова РАН, 2021. С. 521-532.

6. Шляхова, Г.В. Исследование влияния электродуговой наплавки на структуру и свойства покрытий / Г.В. Шляхова, В.И. Данилов [и др.] // *Известия высших учебных заведений. Чёрная металлургия*. 2024. Т. 67, № 4. С. 433-439.

7. Малушин, Н.Н. Остаточные напряжения в закалённых и наплавленных рабочих валках холодной прокатки / Н.Н. Малушин, Н.С. Зубков, Л.Н. Рудакова // *Известия вузов. Чёрная металлургия*. 1983. № 10. С. 147.

8. Бирюков, А.Б. Математическое моделирование процессов тепловой обработки металла в печах с учётом окалинообразования / А.Б. Бирюков, С.И. Гинкул, П.А. Гниatieв, Т.Г. Олешкевич // *Сталь*. 2016. № 8. С. 85-90.

9. Математические модели для исследования теплового состояния тел и управления тепловыми процессами / О. С. Логунова, Е. Б. Агапитов, И. И. Баранкова, С.М. Андреев // *Электротехнические системы и комплексы*. – 2019. – № 2(43). – С. 25-34. – DOI 10.18503/2311-8318-2019-2(43)-25-34. – EDN NZQOBK.

MATHEMATICAL MODEL OF HEATING A MULTILAYER ROLLING ROLL IN A FUEL-FIRED FURNACE DURING HEAT TREATMENT

A.P. Yakovleva

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract. The quality of quenching largely determines the hardness, wear resistance and operational durability of an expensive rolling roll. Uniform heating of the section without excessive temperature fluctuations that can cause cracks and warping is a prerequisite. It is rational to use a flame furnace for volumetric quenching of large composite rolls. It provides high thermal power and a large chamber volume, uniform through-heating, fuel efficiency and a smoothly controlled "lift-hold" mode. The paper presents a mathematical model of heating a two-layer rolling roll (a wear-resistant working layer and a steel core) in a flame furnace during heat treatment. The model is based on the equation of thermal conductivity in cylindrical coordinates, written for each layer, with interface conditions at the interface. The problem is solved by an implicit finite difference scheme with harmonic averaging of thermal conductivity on the faces using the run-through method (simplified Thomas method). Heating curves and radial temperature profiles are obtained, the maximum cross-sectional difference and the leveling time are determined.; It is shown that heating limits the working layer with the lowest coefficient of thermal conductivity. The model allows you to reasonably set the heating mode for quenching and reduce the risk of thermal cracks.

Keywords: rolling roll, two-layer cylinder, fuel-fired furnace, heat conduction, heat treatment, Thomas algorithm.

REFERENCES

1. Martini F., Gostev K.A. Backup and work rolls for hot rolling mills [Opornye i rabochie valki dlya stanov goryachey prokatki], *Stal' [Steel]*, 1998, no. 1, pp. 42-44.
2. Sinnave M., Gostev K., Glukhov V.V., Smirnov V.S. Modern high-performance rolling rolls, features and prospects of their operation [Sovremennye vysokoproizvoditel'nye prokatnye valki, osobennosti i perspektivy ikh ekspluatatsii], *Stal' [Steel]*, 2001, no. 8, pp. 2-8.
3. Timoshpol'skiy V.I., Trusova I.A. Thermal operation of heating furnaces of rolling production in industrial conditions. Report 2. Experimental studies during heating of billets in furnaces with mechanized hearth [Teplovaya rabota nagrevatel'nykh pechey prokatnogo proizvodstva v promyshlennyykh usloviyakh. Soobshchenie 2. Eksperimental'nye issledovaniya pri nagreve zagotovok v pechakh s mekhanizirovannym podom], *Lit'yo i metallurgiya [Foundry and Metallurgy]*, 2011, no. 1, pp. 62-71.
4. Biryukov A.B., Voloshin A.I., Oleshkevich T.G. Mathematical modeling of the process of thermal treatment of metal in furnaces [Matematicheskoe modelirovanie protsessov teplovoy obrabotki metalla v pechakh], *Stal' [Steel]*, 2016, no. 1, pp. 71-75.
5. Zhukov P.I., Fomin A.V., Glushchenko A.I. Implicit adaptation of a grid model of non-stationary thermal conductivity to the heated substance [Neyavnaya adaptatsiya setochnoy modeli nestatsionarnoy teploprovodnosti k nagrevaemomu veshchestvu], *Trudy "Upravlenie bol'shimi sistemami: trudy XVII Vserossiyskoy shkoly-konferentsii molodykh uchonykh"* [Proc. "Management of Large Systems: Proceedings of the XVII All-Russian School-Conference of Young Scientists"], Moscow, IPU im. V.A. Trapeznikova RAN, 2021, pp. 521-532.
6. Shlyakhova G.V., Danilov V.I., et al. Investigation of the influence of electric arc surfacing on the structure and properties of coatings [Issledovanie vliyaniya elektrodugovoy naplavki na strukturu i svoystva pokrytiy], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Chernaya metallurgiya [Proceedings of Higher Educational Institutions. Ferrous Metallurgy]*, 2024, vol. 67, no. 4, pp. 433-439.
7. Malushin N.N., Zubkov N.S., Rudakova L.N. Residual stresses in hardened and surfaced work rolls of cold rolling [Ostatochnye napryazheniya v zakalyonnykh i naplavlennykh rabochikh valkakh kholodnoy prokatki], *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya [Proceedings of Higher Educational Institutions. Ferrous Metallurgy]*, 1983, no. 10, p. 147.
8. Biryukov A.B., Ginkul S.I., Gnatiev P.A., Oleshkevich T.G. Mathematical modeling of thermal treatment processes of metal in furnaces taking into account scale formation [Matematicheskoe modelirovanie protsessov teplovoy obrabotki metalla v pechakh s uchyotom okalinoobrazovaniya], *Stal' [Steel]*, 2016, no. 8, pp. 85-90.
9. Logunova O.S., Agapitov E.B., Barankova I.I., Andreev S.M. Mathematical models for studying the thermal state of bodies and controlling thermal processes [Matematicheskie modeli dlya issledovaniya teplovogo sostoyaniya tel i upravleniya teplovymi protsessami], *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы [Electrotechnical Systems and Complexes]*, 2019, no. 2 (43), pp. 25-34. – DOI 10.18503/2311-8318-2019-2(43)-25-34. – EDN NZQOBK.

Яковлева, А.П. Математическая модель нагрева многослойного прокатного вала в пламенной печи в процессе термообработки / А.П. Яковлева // Автоматизированные технологии и производства. 2026. №1(33). С.27-31.

A.P. Yakovleva Mathematical model of heating a multilayer rolling roll in a fuel-fired furnace during heat treatment. *Avtomatizirovannye tekhnologii i proizvodstva [Automated technologies and production]*, 2026. no.1(33), pp. 27-31. (In Russian).

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ВОЗДУХОНАГРЕВАТЕЛЯ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ ПРИ УПРАВЛЕНИИ ПРОЦЕССОМ НАГРЕВА НАСАДКИ

Р.Ш. Якупов, С.М.Андреев

ФГБОУ ВО “Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова”,
г. Магнитогорск, Россия

yakupovruslan24@gmail.com

Аннотация. В статье рассматриваются изменения теплотехнических характеристик воздухонагревателя доменной печи в процессе оптимизации режимов нагрева огнеупорной насадки. Целью работы является повышение тепловой эффективности аппарата и снижение расхода топлива путем совершенствования алгоритмов автоматического управления периодом нагрева. В качестве методов исследования используются линейные математические модели теплообменных процессов, а также проведен анализ экспериментальных данных, полученных на действующем доменном производстве. Результатом разработанной системы автоматического анализа являются количественные характеристики и прогноз работы воздухонагревателя, что позволит реализовать режим переключения, обеспечивающий максимальную производительность блока в целом и повысит температуру дутья. Выявлены потенциальные факторы, влияющие на термические напряжения в огнеупорах с учетом конструктивных особенностей внутренней камеры горения. Доказано, что динамическое управление соотношением “газ–воздух” сокращает время нагрева без риска разрушения футеровки. Внедрение современных автоматизированных систем управления (АСУ ТП), базирующихся на детерминированных математических моделях, позволяет находить оптимальные режимы работы оборудования без изменения его физической структуры. Область применения: результаты исследования могут быть использованы на металлургических предприятиях для модернизации АСУ ТП воздухонагревателей с внутренней камерой горения, а также для продления срока службы их огнеупорной насадки.

Ключевые слова: доменная печь, воздухонагреватель доменной печи, теплотехническое обследование, насадка.

ВВЕДЕНИЕ

В металлургии процесс получения чугуна выполняется в доменной печи, в результате сгорания железорудного сырья. Для того чтобы поддерживать интенсивное горение топлива необходимо загружать большой объем горячего воздуха. Горячее дутье обеспечивается воздухонагревателем доменной печи, в котором при повышенных температурах снижается качество кладки, что приводит к частому выходу из строя камеры горения и влечет к ухудшению характеристик работы воздухонагревателя. Это ограничивает температуру горячего дутья при длительной эксплуатации и требует частого проведения ремонтов. В связи с этим, большую ценность приобретают системы, позволяющие автоматически осуществлять анализ характеристик, выявлять связи и закономерности, а также выполнить прогноз будущего состояния [1].

Основной целью исследования является улучшение управляемости блока доменного воздухонагревателя путем визуализации связи изменения скорости нагрева насадки во времени с учетом соотношения компонентов смешанного газа. Для достижения цели требуется количественно оценить свойства воздухонагревателя, выполняя оценку по времени цикла.

ТЕХНОЛОГИЯ НАГРЕВА ВОЗДУХА

Одним из важнейших этапов в доменном производстве является нагрев дутья, развитие которого позволило снизить расходы горючего и повысить производительность доменных печей. Поиски путей повышения температуры дутья привели к созданию регенеративных теплообменников, показавших значительное преимущество по уровню

достигаемого нагрева воздуха и быстро вытеснивших из практики все ранее созданные конструкции. Таким образом, эти теплообменники стали основным устройством для нагрева дутья и актуальны до сих пор.

Очищенный доменный газ (или смесь доменного и коксового газов), подведенный к воздухонагревателю, подается в камеру горения газовой горелкой совместно с необходимым для сжигания газа воздухом, подаваемым специальной воздуходувной станцией. Продукты сгорания газа поднимаются вверх под купол воздухонагревателя, где происходит их полное сгорание и развивается максимальная температура. Далее продукты сгорания опускаются вниз через каналы насадки. Отдавая насадке свое тепло, они охлаждаются до 150–400 °С и затем отводятся через дымовые клапаны в боров к дымовой трубе. После нагрева насадки по достижении максимально допустимой температуры подкупольного пространства подача газа в камеру горения прекращается. Через поднасадочное пространство, насадку и камеру горения в обратном газу направлении подается воздух, который нагревается, проходя через горячую насадку, и затем через клапан горячего дутья направляется по воздухопроводу горячего дутья в доменную печь [2].

После охлаждения насадки воздухонагреватель вновь переводят на режим нагрева. Непрерывность подачи дутья обеспечивается наличием блока из 3–4 воздухонагревателей на печь, из которых попеременно два или три работают в режиме нагрева, а остальные на дутье, в зависимости от их числа и принятой схемы работы (одиночной или попарно параллельной). Режимы нагрева и охлаждения являются основными для работы воздухонагревателя.

Кроме этого, он может находиться на тяге или быть отключенным.

При работе воздухогревателя на тяге во время кратковременных остановок печей доменный газ, сгорающий частично в фурменных коленах и кольцевом воздухопроводе, отводится по воздушному тракту в камеру горения одного из воздухогревателей для полного сгорания. В проектах современных доменных печей эта операция отпадает, так как газ сжигают, помимо воздухогревателей, на специальных свечах, устанавливаемых около печи с соответствующим "отсечением" их от горячего воздухопровода.

Воздухогреватель отключают в случае перевода в горячий резерв или ремонта печи, т.е. воздухогреватель изолируют от газозабопроводов и дымового бора с трубой.

Воздухогреватель с внутренней камерой горения обеспечивает достаточно высокую температуру (до 1200 °C) дутья. Однако она имеет ряд существенных недостатков, связанных с расположением камеры горения и камеры насадки в одном кожухе [3]:

- "Короткое замыкание" или прямые перетоки газов между камерой горения и насадкой по трещинам и швам между кирпичами в разделительной стенке, что может снижать температуру дутья на 100 °C;

- Наклон камеры горения в сторону насадки (эффект "банана"), который возникает вследствие разных температур кладки камеры горения со стороны кожуха и со стороны насадки, что приводит к взаимным повреждениям и камеры горения и насадки;

- Деформация и обрушение кладки камеры горения, арок штуцера горячего дутья и горелки вследствие ползучести (крипа) огнеупоров под действием высоких температур и давлений в нижней части камеры горения, что особенно проявляется при высоких камерах горения;

- Неравномерное распределение продуктов горения по насадке, которое достигает +15%. Это снижает реальный коэффициент полезного действия воздухогревателей и приводит к появлению трещин в массиве насадки и повреждениям поднасадочных устройств;

- Пульсирующее горение, приводящее к сильной вибрации конструкций, разрушению кладки, нарушению нормального режима эксплуатации. Оно связано с акустическим возбуждением высокой камеры горения и его устранение представляет серьезную проблему. На практике часто вблизи горелки устанавливают большие емкости – антивибраторы, сильно загромазжающие пространство;

- Растрескивание огнеупора по условиям термической стойкости при резких колебаниях температур во время смены газового и дутьевого периодов. Наибольшее растрескивание наблюдается в верхней части керамических горелок, где колебания температур кладки между газовым и дутьевым периодом достигает 600 °C[4].

ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК ВОЗДУХОГРЕВАТЕЛЯ

Температура горячего дутья выступает ключевым фактором, от которого зависит эффективность доменной плавки. Повышение этого показателя стимулирует производительность печи, однако принципиально важно обеспечивать его жесткую стабильность.

Неизменность температуры дутья гарантирует устойчивый и высокоэффективный ход процесса, минимизирует температурные колебания в горне, а также стабилизирует тепловое состояние и химические свойства выпускаемого чугуна. При общем сроке службы доменной печи до 15 лет межремонтный цикл воздухогревателей обычно не превышает одного года. По этой причине в рамках одного блока могут одновременно эксплуатироваться аппараты с отличающимися теплотехническими характеристиками.

На рисунке 1 приведены графики, отражающие динамику изменения температуры дымовых газов для такого блока воздухогревателя.

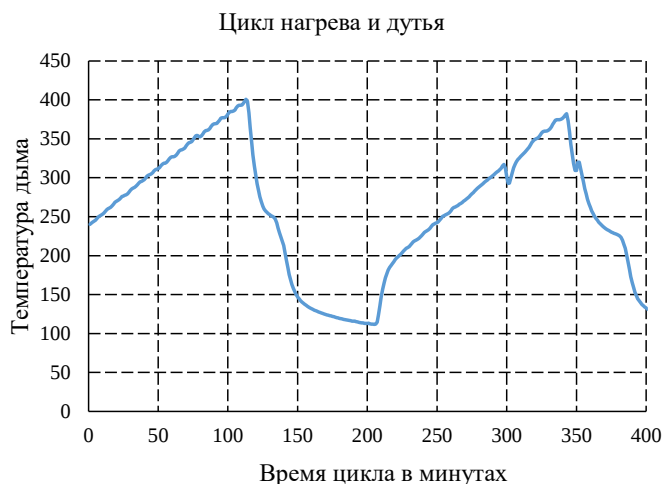


Рис. 1. График нагрева-дутья насадки

Чтобы оценить скорость нагрева насадки достаточно знать температуру дыма в камере горения. На рисунке 2 представлен график, показывающий изменение средней скорости нагрева насадки по неделям за 12 месяцев.

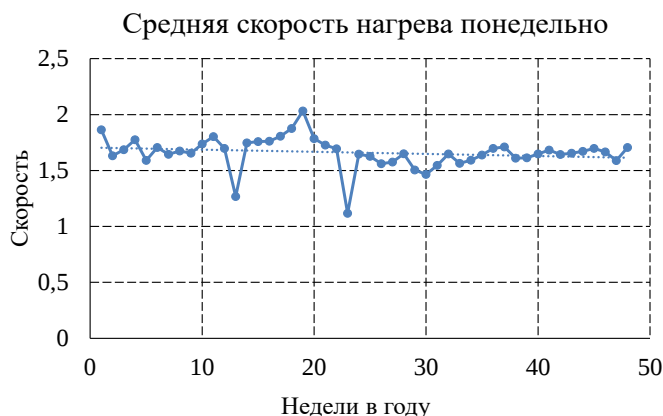


Рис. 2. Средняя скорость нагрева дыма по неделям за календарный год по всем данным

Для расчетов были взяты данные технологического процесса работы блока воздухонагревателей Доменной Печи №6 Магнитогорского Metallургического Комбината за период с 1 сентября 2023 г. по 31 августа 2024 г.

Ниже приведена формула расчета скорости нагрева дыма. Периоды нагрева были отобраны при помощи программы на языке VBA.

$$S = \frac{T}{tn - t1} \quad (1)$$

где T – длительность периода нагрева в минутах; tn – температура дыма в последнюю минуту периода нагрева; $t1$ – температура дыма в первую минуту периода нагрева; S – скорость нагрева дыма.

Коксовый и доменный газы используются в качестве смешанного топлива для нагрева дутья, подаваемого в доменную печь. Горение этой смеси обеспечивает стабильную и высокую температуру.

Конкретная пропорция смешивания коксового и доменного газов не является фиксированной величиной [5].

Главная цель смешивания — получить смешанный газ с строго заданной теплотой сгорания, которая требуется для конкретного металлургического агрегата.

Для того, чтобы рассчитать полученное насадкой теплоту, необходимо рассчитать долю коксового газа в подаваемом смешанном газе.

$$K = \frac{Q_{кг}}{(Q_{кг} + Q_{дг})} \quad (2)$$

где $Q_{кг}$ – расход коксового газа; $Q_{дг}$ – расход доменного газа; K – соотношение компонентов смешанного газа.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В этой главе представлены графики, показывающие изменение скорости нагрева насадки во времени (ось Y) с учетом соотношения компонентов смешанного газа (ось X). Скорости нагрева насадки была рассчитана по формуле 1, соотношения компонентов смешанного газа по формуле 2.

По изменениям графиков на рисунках 3.1–3.12 можно увидеть постепенное уменьшение количества циклов нагрева, что может быть связано с ухудшением теплотехнического состояния, дефектами оборудования или изменением режима работы воздухонагревателя.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРИ УПРАВЛЕНИИ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЕМ РЕЖИМОВ

Для построения графика на рисунке 4 были отобраны периоды нагрева со значением $K=1,2$.

По графику можно увидеть, что средняя скорость нагрева насадки при одинаковом соотношении коксового и доменного газа серьезно варьируется. Это может свидетельствовать о деформации и обрушении кладки [6].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе показано изменение скорости нагрева насадки в течении года. Эта скорость снижается с течением времени, что увеличивает цикл нагрева воздухонагревателя.

При использовании автоматизированной системы управления блоком воздухонагревателя необходимо учитывать изменения каждого каупера и в соответствии из-

менять режимную карту блока, загружая аппарат с более эффективной работой насадки.

Правильно выполненная оценка характеристик доменного воздухонагревателя приведет к улучшению управляемости объекта, что позволит повысить надежность и экономическую эффективность доменного процесса.

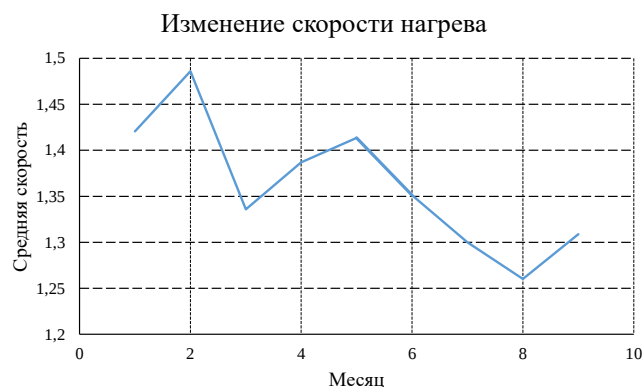


Рис.4. Изменение скорости нагрева насадки по месяцам

ЛИТЕРАТУРА

1. Андреев, С. М. Анализ и визуализация тесноты связи параметров технической системы в процессе принятия решений по управлению объектом / С. М. Андреев, Р. Ш. Якупов // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. – Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2024. – С. 164. – EDN BXGCDA.
2. Хаджинов, А. С. Математическое моделирование тепловой работы доменного воздухонагревателя / А. С. Хаджинов, Е. А. Хаджинов, В. А. Тищенко // Вестник Приазовского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2010. – № 20. – С. 154-159. – EDN TGGPYT.
3. Прасолов, А. С. Имитационная модель насадки воздухонагревателя доменной печи / А. С. Прасолов, С. М. Андреев, Р. Ш. Якупов // Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве. – Екатеринбург: Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2024. – С. 84-89. – EDN CQLOLI.
4. Хаджинов, А. С. Исследование влияния расхода топлива и геометрических размеров огнеупорных блоков насадки доменного воздухонагревателя на температуру нагрева дутья / А. С. Хаджинов, Е. А. Хаджинов, К. Э. Гриценко // Вестник Приазовского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2018. – № 36. – С. 81-87. – DOI 10.31498/2225-6733.36.2018.142528. – EDN YPMIUN.
5. Парсункин, Б. Н. Повышение эффективности нагрева дутья в доменных воздухонагревателях / Б. Н. Парсункин, С. М. Андреев, М. Ю. Рябчиков // Электротехнические системы и комплексы. – 2005. – № 11. – С. 131-137. – EDN QMNUIF.
6. Прасолов, А. С. Повышение эффективности работы блока воздухонагревателей доменной печи за счет оперативной коррекции режимной карты / А. С. Прасолов // Энергетики и металлургии настоящему и будущему России – Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2021. – С. 39-42.

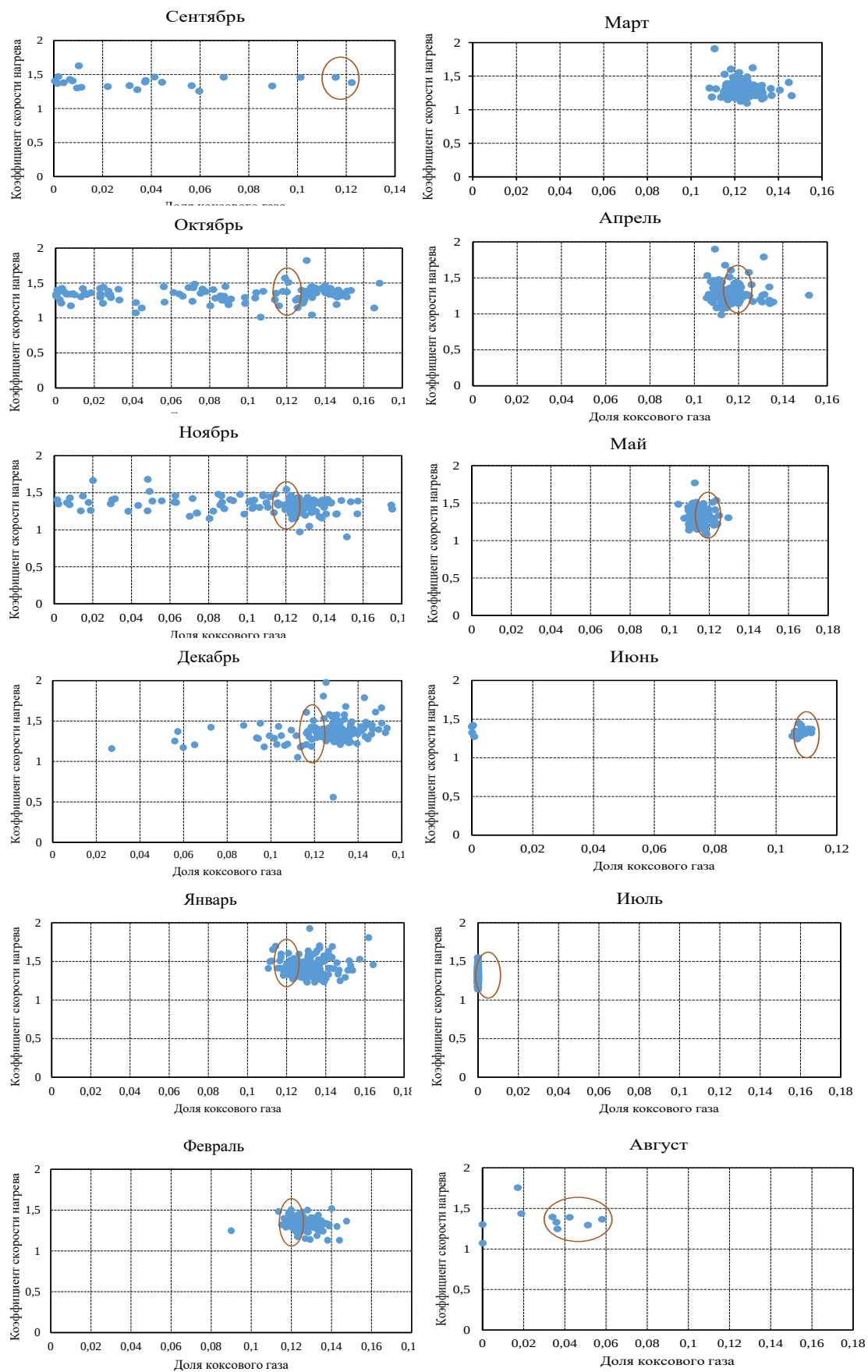


Рис. 3 Отношение скорости к доле газа по месяцам

STUDY OF CHANGES IN THE CHARACTERISTICS OF A BLAST FURNACE AIR HEATER WHEN CONTROLLING THE HEATING PROCESS OF REFRACTORY PACKAGING

R.S. Yakupov, S.M. Andreev

FSTBEI of HPE “Magnitogorsk state technical university named after G.I. Nosov”
Magnitogorsk, Russian Federation

Abstract. This article examines changes in the thermal performance of a blast furnace stove during optimization of refractory unit heating modes. The aim of the study is to improve power supply efficiency and reduce fuel consumption by developing algorithms for automatic control of the heating period. Linear mathematical models of heat exchange processes are used as the method, and an analysis of experimental data obtained in an operating blast furnace is conducted. The developed automatic analysis system results in numerous characteristics and a forecast of stove operation, which makes it possible to implement a switching mode, ensure the operability of the unit as a whole, and increase the blast temperature. Potential factors influencing changes in refractory stress are identified, taking into account the design features of the internal combustion chamber. It is proven that dynamic control of gas-air bonds reduces heating time without damaging the lining. The implementation of modern automated control systems (ACS) taking into account deterministic mathematical models makes it possible to find optimal operating modes without changing its physical structure. Scope: The results of the study can be used at metallurgical plants to modernize air heaters of automated process control systems with internal combustion, as well as to extend the service life of their refractory installation.

Keywords: Blast furnace, blast furnace hot air heater, thermal engineering survey, refractory packing.

REFERENCES

1. Andreev S.M., Yakupov R.Sh. Analiz i vizualizatsiya tesnoty svyazi parametrov tekhnicheskoy sistemy v protsesse prinyatiya resheniy po upravleniyu ob"yektom [Analysis and visualization of the closeness of connection between technical system parameters in the process of object management decision-making]. *Aktual'nyye problemy sovremennoy nauki, tekhniki i obrazovaniya*. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University Publ., 2024, p. 164. EDN: BXGCDA.

2. Khadzhinov A.S., Khadzhinov E.A., Tishchenko V.A. Matematicheskoye modelirovaniye teplovoy raboty domennogo vozduhonagrevatelya [Mathematical modeling of thermal operation of blast-furnace stove]. *Vestnik Priazovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskkiye nauki* [Reporter of the Priazovskiy State Technical University. Section: Technical Sciences], 2010, no. 20, pp. 154-159. EDN: TGGPYT.

3. Prasolov A.S., Andreev S.M., Yakupov R.Sh. Imitatsionnaya model' nasadki vozduhonagrevatelya domennoy pechi [Simulation model of the checkerwork of a blast furnace stove]. *Teplotekhnika i informatika v obrazovanii, nauke i proizvodstve*. Ekaterinburg: Ural Federal University Publ., 2024, pp. 84-89. EDN: CQLOLI.

4. Khadzhinov A.S., Khadzhinov E.A., Grytsenko K.E. Issledovaniye vliyaniya raskhoda topliva i geometricheskikh

razmerov ognepurnykh blokov nasadki domennogo vozduhonagrevatelya na temperaturu nagreva dut'ya [Investigation of the effect of fuel consumption and geometric dimensions of refractory blocks of blast furnace hot blast stove checkerwork on blast heating temperature]. *Vestnik Priazovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskkiye nauki* [Reporter of the Priazovskiy State Technical University. Section: Technical Sciences], 2018, no. 36, pp. 81-87. doi: 10.31498/2225-6733.36.2018.142528. EDN: YPMIUH.

5. Parsunkin B.N., Andreev S.M., Ryabchikov M.Yu. Povysheniye effektivnosti nagreva dut'ya v domennykh vozdukhonagrevatelyakh [Increasing the efficiency of blast heating in blast furnace air heaters]. *Elektrotekhnicheskkiye sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2005, no. 11, pp. 131-137. EDN: QMNUIF.

6. Prasolov A.S. Povysheniye effektivnosti raboty bloka vozduhonagrevatelye domennoy pechi za schet operativnoy korrektsii rezhimnoy karty [Improving the efficiency of the blast furnace stove block operation through operational correction of the operating map]. Neshporenko E.G. (ed.) *Energetiki i metallurgi nastoyashchemu i budushchemu Rossii*. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University Publ., 2021, pp. 39-42. EDN: DZGEPQ.

Якупов, Р.Ш. Исследование изменения характеристик воздухогревателя доменной печи при управлении процессом нагрева насадки / Р.Ш. Якупов, С.М. Андреев // Автоматизированные технологии и производства. 2026. №1(33). С.32-36.

R.S. Yakupov, S.M. Andreev Study of Changes In The Characteristics of a Blast Furnace Air Heater When Controlling The Heating Process of Refractory Packaging [Automated technologies and production], 2026. no.1(33), pp. 32-36. (In Russian).

УДК 534.014.3

МЕХАНИЧЕСКИЕ РЕАКТАНСЫ ЭЛЕМЕНТОВ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ

В.Д. Павлов

Владимирский электромеханический завод, Владимир, Российская Федерация

pavlov.val.75@mail.ru

Аннотация. В статье показано, что механические реактивная и полная мощности, развиваемые при гармонических колебаниях исполнительных органов мехатронных систем, напрямую связаны с их механическими реактантами, являющимися дуально-инверсными аналогами реактансов электрических цепей.

Ключевые слова: привод, активная, реактивная, полная мощности, инертный, упругий реактансы.

Задача корректного учета как активной, так и реактивной механических мощностей для целей энергосбережения, а также силовых конструкторских расчетов является актуальной [1-3].

Пусть к массивному исполнительному органу машины или механизма приложена синусоидальная сила [4]

$$f = F_m \cos \omega t. \quad (1)$$

В соответствии с основной аксиомой механики

$$F_m \cos \omega t = m \frac{dv}{dt}.$$

$$\int_0^v dv = \frac{F_m}{m} \int_0^t \cos \omega t dt,$$

$$v = \frac{F_m}{\omega m} \cos \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right).$$

Из этого следует, что амплитуда скорости [5] имеет вид:

$$V_m = \frac{F_m}{\omega m} = \frac{F_m}{X_m}.$$

Здесь X_m – инертный реактанс, кг·рад/с [6].

Полученное выражение можно представить в комплексном виде.

$$\dot{V} = -i \frac{\dot{F}}{\omega m} = \frac{\dot{F}}{i \omega m} = \frac{\dot{F}}{\underline{X}_m}, \quad (2)$$

Знак « $-i$ » обусловлен тем, фаза мгновенной скорости отстает от фазы силы на $\pi/2$. Комплексные величины, соответствующие синусоиде, обозначаются точкой сверху. Прочие – подчеркиваются снизу [7].

В соответствии с (2) инертный реактанс равен

$$\underline{X}_m = i \omega m.$$

Он характеризует свойство массивного тела оказывать сопротивление приводу, понуждающему его совершать колебания. Вполне закономерно, что он определяется не только массой, но и частотой. В механику реактансы введены А.Г. Вебстером (Webster) в начале XX века.

Дуально-инверсным аналогом формулы (2) является закон Ома для участка электрической цепи. При этом V

соответствует току, F – ЭДС, X_m – индуктивному реактивному сопротивлению.

В соответствии с выражением (1) вектор силы ориентирован вдоль вещественной оси комплексной плоскости, поэтому в соответствии с формулой (2) вектор скорости ориентирован вдоль мнимой оси (т.е. скорость – чисто мнимая). Мгновенное значение реактивной (инерционной) мощности равно [8]

$$q_i = \dot{f}v.$$

Эта величина является мнимой, поскольку является произведением мнимой величины v на действительную f .

Реактивная (инерционная) мощность в комплексном виде

$$\dot{Q}_i = \dot{F} \dot{V} \quad (3)$$

В электротехнике величина реактивной мощности отождествляется с ее амплитудой. Аналогично этому, учитывая (2), реактивная (инерционная) мощность равна

$$Q_i = \frac{F^2}{X_m} = V^2 X_m.$$

Пусть сила трения определяется формулой

$$f = rv,$$

где r – коэффициент пропорциональности, Н·с/м. Отсюда скорость равна

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

Дуально-инверсным аналогом этой формулы является закон Ома для участка электрической цепи. При этом v соответствует току, f – ЭДС, r – активному сопротивлению. Поскольку вектор силы ориентирован вдоль вещественной оси комплексной плоскости (см. (1)) и r – вещественная величина, величина v является тоже вещественной.

Мгновенное значение активной (тепловой) мощности равно

$$p = fv.$$

Активная мощность тоже вещественная величина, поскольку является произведением вещественных величин.

Активная (тепловая) мощность в комплексном виде

$$\underline{P} = \dot{\underline{F}} \dot{\underline{V}}.$$

В электротехнике величина активной мощности отождествляется с ее средним за период значением. Это положение обобщается и на механическую активную (тепловую) мощность P .

В соответствии с (3) и (2) реактивная (инерционная) мощность представляет собой чисто мнимую величину

$$\dot{Q}_i = \dot{\underline{F}} \dot{\underline{V}} = -i \frac{(\dot{\underline{F}})^2}{\omega m}.$$

Активная (тепловая) мощность при любом характере движения, например, развиваемая силой трения скольжения, является вещественной величиной. В этой связи реактивная и активная мощности являются условно «ортогональными». Следовательно, полная механическая мощность определяется выражением

$$S = \sqrt{Q^2 + P^2}. \quad (4)$$

Нетрудно показать, что формула упругого реактанса имеет вид:

$$\underline{X}_k = -i \frac{k}{\omega}.$$

Здесь k коэффициент упругости, Н/м.. $\underline{X}_k$ соответствует емкостному реактивному сопротивлению в электротехнике.

Реактивная (упруго-деформационная) мощность [9] определяется выражением

$$Q_d = \frac{F^2}{X_k} = V^2 X_k.$$

Эта мощность обусловлена способностью упругого тела запасать и возвращать потенциальную энергию упругой деформации. Реактивная (упругодеформационная) мощность является чисто мнимой величиной. Ее знак противоположен знаку реактивной (инерционной) мощности.

Полная мощность также вычисляется по формуле (4).

В механической системе, состоящей из пружины и груза сумма реактансов равна

$$\underline{X} = \underline{X}_m + \underline{X}_k = i\omega_0 m - i \frac{k}{\omega_0}.$$

Если она равна нулю, возникает резонанс.

$$i\omega_0 m - i \frac{k}{\omega_0} = 0,$$

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

Активная и реактивная [10] механические мощности, являясь условно «ортогональными», не складываются. Для полной мощности справедлив аналог теоремы Пифагора (точно также как в электротехнике). Инертный и упругий реактансы характеризуют свойства массивного и упругого тел оказывать сопротивление приводу, понуждающему их совершать колебания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Попов И.П. Попутная оптимизация производительной мощности решетных сортировальных машин / И.П. Попов // Автоматизированные технологии и производства. 2020. № 1 (21). С. 19-21.
2. Павлов В.Д. Вибратор для автоматизированных комплексов / В.Д. Павлов // Автоматизированные технологии и производства. 2024. № 1 (29). С. 20-22.
3. Безденежных В.И. Трехмассовый осциллятор для мехатронных систем / В.И. Безденежных // Автоматизированные технологии и производства. 2025. №1(31). С.21-23.
4. Попов И.П. Резонанс сил в мехатронных системах / И.П. Попов // Автоматизированные технологии и производства. 2024. № 1 (29). С. 17-19.
5. Попов И.П. Резонанс скоростей в мехатронных системах / И.П. Попов // Автоматизированные технологии и производства. 2024. № 2(30). С.11-13.
6. Попов, И.П. Реактансы и сассептансы мехатронных систем при параллельном соединении элементов / И.П. Попов // Автоматизированные технологии и производства. 2025. №1(31). С.10-14.
7. Попов И.П. Связь между механическими величинами мехатронных систем при вынужденных колебаниях / И.П. Попов // Автоматизированные технологии и производства. 2025. № 2(32). С.18-20.
8. Попов И.П. Механическая реактивная инерционная мощность для целей мониторинга энергосберегающих технологий / И.П. Попов // Автоматизированные технологии и производства. 2022. № 1 (25). С. 17–19.
9. Попов И.П. Упруго-деформационная и другие виды мощности для целей мониторинга энергосберегающих технологий / И.П. Попов // Автоматизированные технологии и производства. 2023. № 2 (28). С. 33–35.
10. Павлов В.Д. Реактивная механическая мощность в мехатронных системах / В.Д. Павлов // Автоматизированные технологии и производства. 2025. № 1(31). С.18-20.

MECHANICAL REACTANCES OF ELEMENTS OF MECHATRONIC SYSTEMS

V.D. Pavlov

Vladimir Electromechanical Plant, Vladimir, Russia

pavlov.val.75@mail.ru

Abstract. The article shows that mechanical reactive and apparent powers developed during harmonic oscillations of the actuators of mechatronic systems are directly related to their mechanical reactances, which are dual-inverse analogues of the reactances of electrical circuits.

Keywords: drive, active, reactive, apparent power, inertial, elastic reactances.

REFERENCES

1. Popov I.P. Concurrent optimization of the productive capacity of screen sorting machines [Poputnaya optimizatsiya proizvoditel'noy moshchnosti reshetnykh sortiroval'nykh mashin]. *Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva [Automated technologies and production]*, 2020, no. 1 (21), pp. 19-21. (In Russian)
2. Pavlov V.D. Vibrator for automated complexes [Vibrator dlya avtomatizirovannykh kompleksov]. *Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva [Automated technologies and production]*, 2024, no. 1 (29), pp. 20-22. (In Russian)
3. Bezdeneshnykh V.I. Three-mass oscillator for mechatronic systems [Trekhmassovyy ostsillyator dlya mekhatronnykh sistem]. *Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva [Automated technologies and production]*, 2025, no. 1(31), pp.21-23. (In Russian)
4. Popov I.P. Resonance of forces in mechatronic systems [Rezonans sil v mekhatronnykh sistemakh]. *Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva [Automated technologies and production]*, 2024, no. 1 (29), pp. 17-19. (In Russian)
5. Popov I.P. Velocity resonance in mechatronic systems [Rezonans skorostey v mekhatronnykh sistemakh]. *Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva [Automated technologies and production]*, 2024, no. 2(30), pp.11-13. (In Russian).
6. Popov I.P. Reactance and Susceptions of Mechatronic Systems With Parallel Connection of Elements [Reaktansy i sasseptansy mekhatronnykh sistem pri parallel'nom soyedinenii elementov]. *Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva [Automated technologies and production]*, 2025. no. 1(31), pp.10-14. (In Russian).
7. Popov I.P. The relationship between mechanical quantities of mechatronic systems under forced vibrations [Svyaz' mezhdru mekhanicheskimi velichinami mekhatronnykh sistem pri vynuzhdennykh kolebaniyakh]. *Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva [Automated technologies and production]*, 2025. no. 2(32). pp.18-20. (In Russian).
8. Popov I.P. Mechanical reactive inertial power for monitoring energy-saving technologies [Mekhanicheskaya reaktivnaya inertsionnaya moshchnost' dlya tseley monitoringa energosberegayushchikh tekhnologiy]. *Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva [Automated technologies and production]*, 2022, no. 1 (25), pp. 17–19. (In Russian).
9. Popov I.P. Elastic-deformational 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).
10. Pavlov V.D. Reactive mechanical power in mechatronic systems [Reaktivnaya mekhanicheskaya moshchnost' v mekhatronnykh sistemakh]. *Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva [Automated technologies and production]*, 2025, no. 1(31), pp.18-20. (In Russian).

Павлов, В.Д. Механические реактансы элементов мехатронных систем / В.Д. Павлов // Автоматизированные технологии и производства. 2026. №1(33). С.33-35.

V.D. Pavlov Mechanical Reactances of Elements of Mechatronic Systems. *Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva [Automated technologies and production]*, 2026. no.1(33), pp.33-35. (In Russian).

УДК 621.783/621.182.233

РЕГУЛИРОВАНИЕ СООТНОШЕНИЯ ГАЗ/ВОЗДУХ В МЕТОДИЧЕСКОЙ ПЕЧИ СТАНА 2000 ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ

В. Д. Савенков, Е. Ю. Мухина

ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г. И. Носова», г. Магнитогорск, РФ

Vladikckckk@yandex.ru

Аннотация. Рассмотрены вопросы оптимального регулирования соотношения газ/воздух в методической печи широкополосного стана 2000 горячей прокатки, работающей в условиях переменной производительности и изменяющихся тепловых нагрузок. Показано, что поддержание стехиометрического баланса топливно-воздушной смеси непосредственно влияет на полноту сгорания газа, температуру рабочего пространства и удельный расход топлива. Предложен подход к автоматической коррекции коэффициента расхода воздуха на основе анализа содержания кислорода в продуктах сгорания и температуры в топочной зоне. Установлено, что отклонение соотношения газ/воздух от оптимального на 7–10% приводит к росту потерь тепла с уходящими газами либо к химическому недожогу. Описываемая система регулирования позволяет поддерживать значение коэффициента избытка воздуха в диапазоне 1,05–1,15 в зависимости от профиля нагреваемых слэбов и темпа их продвижения по печи. Сделан вывод о необходимости индивидуальной настройки параметров регулирования для каждой зоны печи с учётом динамики тепловых процессов.

Ключевые слова: нагрев заготовок перед прокаткой, автоматическое управление, коэффициент расхода газ/воздух, пропорционирование расходов, методические печи.

ВВЕДЕНИЕ

В условиях устойчивого роста цен на топливо задача сокращения непроизводительных тепловых потерь в промышленных нагревательных печах приобретает ключевое значение. Особую актуальность имеет внедрение энергосберегающих и высокоэффективных систем автоматизированного управления процессом сжигания топлива в рабочем пространстве технологических агрегатов, методических печей.

Однако существующие способы регулирования, в том числе поддержание оптимального соотношения газ/воздух, отличаются сложностью технической реализации и требуют постоянного участия технолога, что ограничивает их широкое применение в условиях непрерывного производства, в частности в методических печах стана 2000 горячей прокатки.

ОБОСНОВАНИЕ АКТУАЛЬНОСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Производство широкополосного горячекатаного листового проката является одним из крупнейших потребителей тепловой энергии в чёрной металлургии. При этом около 20% потребляемого природного газа затрачивается на нагрев непрерывнолитых заготовок перед прокаткой. В условиях устойчивого роста цен на энергоносители задача минимизации удельного расхода условного топлива в методических печах приобретает критическую значимость.

Особенностью работы широкополосных станов горячей прокатки является ярко выраженная нестационарность режимов. Часовая производительность стана может

изменяться в широком диапазоне, а в печи одновременно нагреваются партии заготовок с различной начальной температурой. В этих условиях технолог-оператор физически не успевает оперативно корректировать режимы сжигания. [1]

Наиболее распространённой причиной перерасхода топлива является неоптимальное регулирование соотношения газ/воздух. Традиционно используемые системы объёмного пропорционирования расходов ориентированы на поддержание фиксированного коэффициента расхода воздуха α , задаваемого оператором. Требуемая величина расхода воздуха $V_{\text{set}}(\tau)$ при этом определяется выражением:

$$V_{\text{set}}(\tau) = \alpha(\tau) \cdot L_0 V_T(\tau), \quad (1)$$

где $V_T(\tau)$ – текущий расход газа; L_0 – коэффициент, численно равный количеству воздуха, необходимому для полного сгорания единицы топлива (для природного газа равен 10).

Существующие способы автоматической коррекции соотношения газ/воздух обладают рядом недостатков: они имеют значительную инерционность из-за запаздывания при отборе проб, требуют регулярного обслуживания и дорогостоящих анализаторов. Кроме того, широко распространённая концепция распределения топлива по зонам зачастую не позволяет реализовать потенциально возможные энергосберегающие режимы. [2]

Для каждой зоны методической печи с учётом конструктивных особенностей и расположения горелок

существует рациональная рабочая характеристика – зависимость оптимального коэффициента расхода воздуха от текущего расхода газа:

$$\alpha_{\text{opt}} = f(V_T) \quad (2)$$

Использование такой функциональной зависимости в системе автоматического регулирования позволяет формировать заданное значение расхода воздуха $V_{\text{set}}(\tau)$ не оператором, а на основе предварительно полученной характеристики. Сигнал рассогласования при этом вычисляется как:

$$\Delta V(\tau) = V_{\text{set}}(\tau) - V_{\text{факт}}(\tau), \quad (3)$$

где $V_{\text{факт}}(\tau)$ – измеренный текущий расход воздуха. Далее регулятор, регулирующий по ПИ-закону, который стремится свести $\Delta V(\tau)$ к нулю.

Эффективность предлагаемого подхода подтверждается количественными оценками: при работе методических печей в нестационарных условиях применение рациональных рабочих характеристик позволяет снизить удельный расход условного топлива без существенных капитальных затрат на реконструкцию газозвоздушных трактов. [3]

Таким образом, актуальность настоящего исследования обусловлена необходимостью разработки способа автоматического регулирования соотношения газ/воздух в методической печи стана 2000 горячей прокатки, основанного на использовании рациональных рабочих характеристик горелок. Такой подход позволит минимизировать субъективное вмешательство технолога, снизить удельный расход топлива и уменьшить тепловые потери.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЯЮЩЕГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

На основании экспериментальных данных, полученных в зоне методической печи, были зафиксированы значения коэффициента α при различных расходах газа. Исходные данные аппроксимированы полиномом третьего порядка вида:

$$\alpha(X) = a_0 + a_1X + a_2X^2 + a_3X^3 \quad (4)$$

Расчёт коэффициентов a_0, a_1, a_2, a_3 выполнен методом наименьших квадратов с использованием пакета Excel, расчёт представлен на рис. 1.

На основе выполненных расчётов получено следующее уравнение регрессии:

$$\alpha(X) = -0,00514 + 0,012711X - 2,4 \cdot 10^{-5} \cdot X^2 - 3,13 \cdot 10^{-7}X^3$$

Экспериментальная характеристика указана на рис. 2 совместно с характеристикой, рассчитанной с помощью метода наименьших квадратов.

Данная зависимость описывает рациональную рабочую характеристику горелок и используется для формирования заданного значения расхода воздуха.

X	Эксп. точка	X ²	X ³	X ⁴	X ⁵	X ⁶	XY	X ² Y	X ³ Y	Линия регрессии
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0,00514
10	0,124	100	1000	10000	100000	1000000	1,24	12,4	124	0,119867
20	0,223	400	8000	160000	3200000	64000000	4,46	89,2	1784	0,241914
30	0,356	900	27000	810000	24300000	7,29E+08	10,68	320,4	9612	0,362878
40	0,496	1600	64000	2560000	1,02E+08	4,1E+09	19,84	793,6	31744	0,484636
50	0,619	2500	125000	6250000	3,13E+08	1,56E+10	30,95	1547,5	77375	0,609068
60	0,734	3600	216000	12960000	7,78E+08	4,67E+10	44,04	2642,4	158544	0,738049
70	0,899	4900	343000	24010000	1,68E+09	1,18E+11	62,93	4405,1	308357	0,873458
80	0,989	6400	512000	40960000	3,28E+09	2,62E+11	79,12	6329,6	506368	1,017172
90	1,16	8100	729000	65610000	5,9E+09	5,31E+11	104,4	9396	845640	1,171107
100	1,35	10000	1000000	1E+08	1E+10	1E+12	135	13500	1350000	1,337028
550	6,95	38500	3025000	2,53E+08	2,21E+10	1,98E+12	492,66	39036,2	3289548	
D ₀ =	6,95	550	38500	3025000	-3,3E+19					
	492,66	38500	3025000	2,53E+08			11	550	38500	3025000
	39036,2	3025000	2,53E+08	2,21E+10				550	38500	3025000
	3289548	2,53E+08	2,21E+10	1,98E+12					38500	3025000
									3025000	2,53E+08
									2,53E+08	2,21E+10
									2,21E+10	1,98E+12
D ₁ =	11	6,95	38500	3025000	8,15E+19					
	550	492,66	3025000	2,53E+08						
	38500	39036,2	2,53E+08	2,21E+10						
	3025000	3289548	2,21E+10	1,98E+12						
D ₂ =	11	550	6,95	3025000	-1,6E+17					
	550	38500	492,66	2,53E+08						
	38500	3025000	39036,2	2,21E+10						
	3025000	2,53E+08	3289548	1,98E+12						
D ₃ =	11	550	38500	6,95	2,01E+15					
	550	38500	3025000	492,66						
	38500	3025000	2,53E+08	39036,2						
	3025000	2,53E+08	2,21E+10	3289548						

Рис. 1 – Расчет коэффициентов линии регрессии

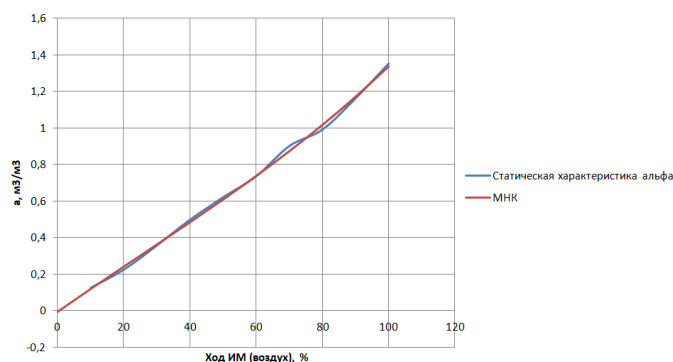


Рис.2 – Статическая характеристика

Структурная схема регулирования соотношения газ/воздух представлена на рис. 3. В рассматриваемом примере: выходная величина объекта управления (ОУ) – коэффициент α , управляющее воздействие – условное положение заслонки на трубопроводе воздуха (положение вала ИМ). Введены следующие обозначения сигналов:

- X – положение вала ИМ %;
- Y – установившееся значение регулируемой величины ОУ по статической характеристике;
- Z_1 – промежуточная величина;
- Z_2 – расчетное значение регулируемой величины ОУ;
- Z_{set} – заданное значение регулируемой величины ОУ;
- $\varepsilon = Z_{\text{set}} - Z_2$ – сигнал рассогласования;
- U – управляющее воздействие на выходе регулятора, %;
- $U^* = U - X$ управляющее воздействие с учетом обратной связи по положению вала ИМ, %;
- σ – знаковая переключающая функция, определяющая направление движения ИМ, $\sigma = [1; 0; -1]$.

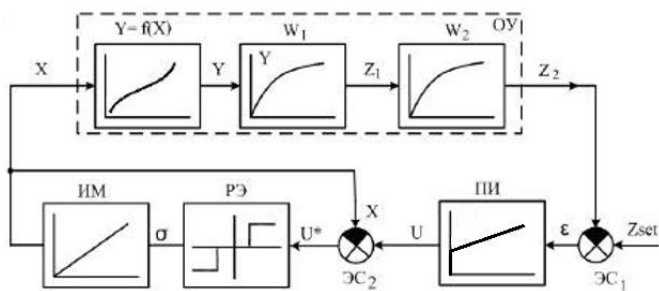


Рис. 3 – Структурная схема контура регулирования с типовым регулятором и ИМ постоянной скорости

Условные обозначения:

- РЭ – релейный элемент;
- ПИ-регулятор;
- ЭС₁, ЭС₂ – элементы сравнения.

Структурная схема САУ содержит 6 звеньев и 2 элемента сравнения. ОУ на рис. 3 выделен пунктиром и содержит три звена. Первое звено – функциональное $Y = f(X)$, в котором осуществляется расчет статического значения коэффициента α . Второе звено $W_1(p)$ – инерционное звено первого порядка моделирует инерцию в технологическом объекте, связанную с длиной трубопровода воздуха между заслонкой и датчиком расхода воздуха. [2]

Инерционность звена первого порядка $W_1(p)$ примем равной постоянной времени $T_{об} - 2$. Третье звено ОУ с передаточной функцией $W_2(p)$ моделирует инерцию при передаче измерительной информации, что включает в себя: инерционность передачи измерительного сигнала по линиям связи, инерционности датчика, вторичного прибора, промежуточных преобразователей и т.п.

Инерционность звена $W_2(p)$ примем равной времени запаздывания τ_z в ОУ - 0.8. При последовательном соединении двух элементарных звеньев первого порядка можно получить удовлетворительную модель реального объекта и произвести расчет с необходимой точностью. [2]

Для расчета инерционностей применим численный метод Эйлера. Для численного расчета необходимо задать шаг дискретизации по времени Δt . Величину шага дискретизации надо выбирать с учетом скорости ИМ и меньше времени запаздывания ОУ, как минимум в 10 раз: $10\Delta t < \tau_z$.

$$\Delta Z_1(t) = \frac{[Y(t) - Z_1(t)]\Delta t}{T_{об}} \quad Z_1(t + \Delta t) = Z_1(t) + \Delta Z_1(t) \quad (5)$$

Для Z_2 расчёт аналогичен.

Затем нужно определить начальные условия расчета: начальное значение положения вала X_0 и соответствующее значение выходной величины $Z_1(0) = Z_2(0) = Y = f(X_0) = 0,2134$, приращения $\Delta Z_1(0) = \Delta Z_2(0) = 0$. Интегральная составляющая регулятора $F(0) = 0$. Далее следует выбрать заданное значение Z_{set} . [2]

Сигнал с выхода ОУ $Z_2(t)$ поступает на вход элемента сравнения ЭС₁, туда же подается сигнал задания $Z_{set}(t)$. На выходе элемента сравнения формируется сигнал рассогласования $\varepsilon(t) = Z_{set} - Z_2$. Закон регулирования представим в виде:

$$U(t + \Delta t) = K_p \left[\varepsilon(t + \Delta t) + \frac{1}{T_{ИЗ}} F(t + \Delta t) \right] + U_0 \quad (6)$$

$$F(t + \Delta t) = F(t) + \varepsilon(t + \Delta t)\Delta t$$

где $U_0 = X_0$ – начальное положение выходного вала исполнительного механизма, %; K_p – коэффициент передачи регулятора, %; $T_{ИЗ}$ – время изодрома, определяющее величину воздействия интегральной части $F(t)$ по отношению к пропорциональной части, с.

Настройки ПИ-регулятора можно рассчитать методом модального оптимума [3]:

$$K_p = \frac{T_{об}}{2K_{об}T_z}, T_{ИЗ} = T_{об}, \quad (7)$$

Сигнал управляющего воздействия $U(t)$ поступает на вход ЭС₂, где сравнивается с текущим положением вала ИМ: $U^*(t) = U(t) - X_{ИМ}$. Скорректированный сигнал управляющего воздействия $U^*(t)$ поступает на вход релейного элемента РЭ, где определяется направление движения ИМ [4]. Знак переключающей функции $\sigma(t)$ определяется по условию:

$$\sigma = \begin{cases} +1, \text{ при } U^*(t) \geq dZ_H \\ 0, \text{ при } -dZ_H \leq U^*(t) \leq dZ_H \\ -1, \text{ при } -dZ_H \leq U^* \end{cases} \quad (8)$$

где Z_H – зона нечувствительности переключающего реле, %.

В промышленности используются ИМ постоянной скорости, т.е. $K_{ИМ} = \text{const}$. Если $\sigma(t) = 1$, то ИМ движется в сторону «больше»; если $\sigma(t) = 0$, то ИМ неподвижен; если $\sigma(t) = -1$, то ИМ движется в сторону «меньше». Поэтому положение выходного вала ИМ на следующем шаге определяется по формуле:

$$X(t + \Delta t) = X(t) + \sigma(t) \cdot K_{ИМ} \Delta t, \quad (9)$$

где Δt – шаг дискретизации; $K_{ИМ}$ – скорость ИМ.

По формулам (5) - (9) рассчитываются все сигналы, обозначенные на рис. 3, и контур регулирования замыкается. При расчете положения вала ИМ переходим на следующий шаг по времени, далее повторяем расчеты в том же порядке до тех пор, пока переходный процесс в контуре не закончится.

Моделирование контура САУ в среде Vissim.

Модель САУ созданная в среде Vissim представлена на рис. 4.

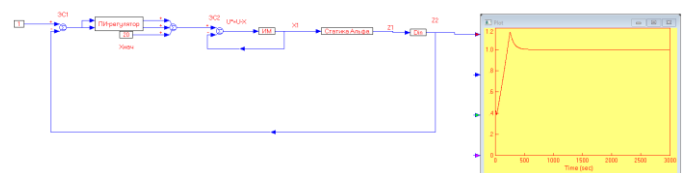


Рис. 4 - Блок-схема программной реализации модели САУ с ПИ-регулятором

Исследование переходных процессов в контуре АР.

Для того, чтобы рассчитать K_p необходимо знать $K_{об}$, который рассчитывается по формуле:

$$K_{об} = \frac{K_{об1} + K_{об2} + K_{об3}}{9}, K_{об} = 0,0115 \frac{^\circ\text{C}}{\% \text{ хода ИМ}} \quad (10)$$

С помощью формулы (7) произведем расчёт параметров настройки ПИ-регулятора:

$$K_p = \frac{T_{об}}{2K_{об}\sigma}, K_p = 108,7 \text{ \%}/\frac{\text{м}^3}{\text{м}^3}, T_{из} = T_{об} = 2$$

При настройках регулятора с помощью метода модального оптимума был получен график, указанный на рис. 5.

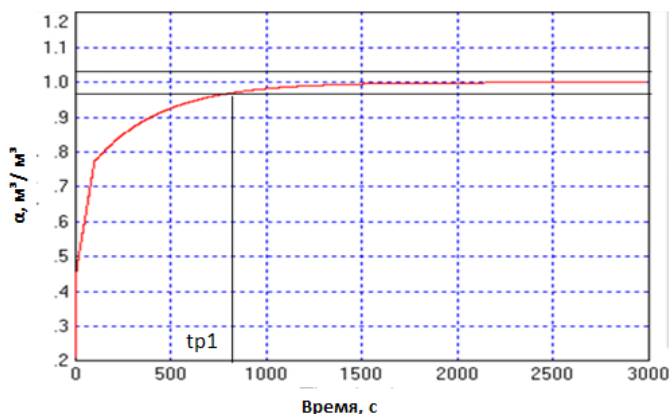


Рис. 5 – Переходный процесс при $K_p=108.7$, $T_{из}=2$

При данных настройках имеется перерегулирование:

$$\sigma = \frac{1 - 1}{1 - 0,428} \cdot 100 = 0\%$$

Время регулирования $t_{p1}=820\text{с}$, время окончания переходного процесса $T_{п.п}=t_{p1}=820\text{с}$

Данная реакция системы показывает, что характеристика является аperiodической, что говорит о низком быстродействии и вероятном неоптимальном использовании ресурсов.

Чтобы улучшить переходный процесс, проверим реакцию системы при различных параметрах ПИ-регулятора.

Исследование показало, что при изменении K_p в большую и меньшую стороны система остается аperiodической. При этом, объект достигает задания тем быстрее, чем меньше K_p . Зафиксируем K_p равным 1, так как при дальнейшем уменьшении время регулирования не изменяется, переходный процесс представлен на рис. 6.

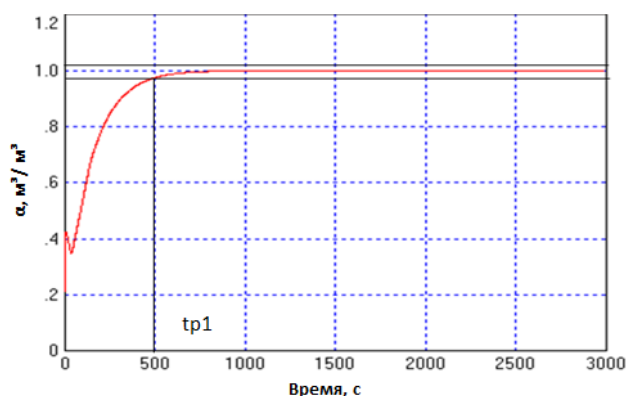


Рис. 6 – Переходный процесс при $K_p=1$, $T_{из}=2$

Варьирование времени изодрома показало, что наиболее эффективные значения $T_{из}$ находится в диапазоне [1; 2]. Полученный график представлен на рис. 7.

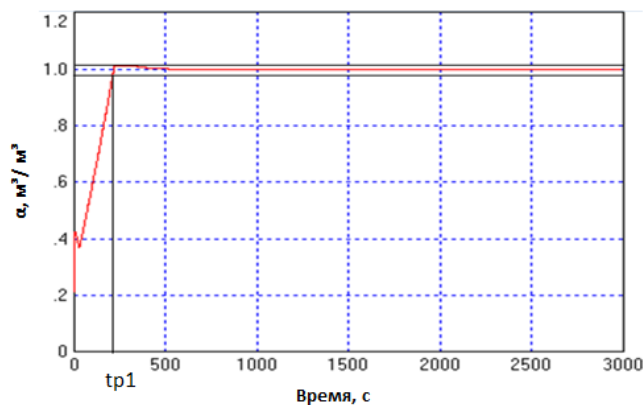


Рис. 7 – Переходный процесс при $K_p=1$, $T_{из}=1.3$

Данный переходный процесс имеет следующие значения показателей качества:

$$\sigma = \frac{1.03 - 1}{1 - 0,428} \cdot 100 = 5.22\%$$

Время регулирования $t_{p1}=230\text{с}$, время окончания переходного процесса $T_{п.п}=240\text{с}$

Исходя из данных показателей качества, вида графика можно сделать вывод о том, что данные настройки регулятора, а именно $K_p=1$, $T_{из}=1.3$, являются оптимальными.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе разработана система автоматического регулирования соотношения газ/воздух для методической печи стана 2000 горячей прокатки. На основе экспериментальных данных получена статическая характеристика горелок, аппроксимированная полиномом третьего порядка, позволяющая объективно формировать задание по расходу воздуха.

С помощью имитационного моделирования в среде Vissim выполнен анализ влияния параметров ПИ-регулятора на качество переходных процессов. Определены оптимальные настройки: $K_p=1\text{ \%}/(\frac{\text{м}^3}{\text{м}^3})$, $T_{из}=1.3\text{ с}$. При этом перерегулирование не превышает 5.2%, а время регулирования сокращено до 230 с.

Предложенный подход обеспечивает устойчивую работу системы в нестационарных условиях, снижает участие технолога и может быть рекомендован для внедрения на методических печах станов горячей прокатки.

ЛИТЕРАТУРА

- Парсункин, Б. Н. Оптимальное энергосберегающее управление сжиганием топлива в промышленных печах / Б.Н. Парсункин, С.М. Андреев, А.Р. Бондарева // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал – 2013. – № 1. – С. 22–26. – EDN RKPAFH
- 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. – EDN HOTPGO

3. Нужин, Д. В. Система оптимального управления нагревом заготовок в проходной печи с использованием технологии цифрового двойника / Д. В. Нужин, С. М. Андреев, Е. Ю. Мухина // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2025. – № 3(126). – С. 41-58. – DOI 10.23859/1994-0637-2025-3-126-4. – EDN SABWUQ

4. Парсункин, Б. Н. Способы повышения эффективности и помехоустойчивости систем автоматической

оптимизации управления технологическим процессом / Б. Н. Парсункин, С. М. Андреев // Автоматизированные технологии и производства. – 2013. – № 5. – С. 277-290. – EDN PZYNZR.

CONTROL OF GAS/AIR RATIO IN A CONTINUOUS FURNACE OF HOT ROLLING MILL 2000

V. D. Savenkov, E. Yu. Mukhina

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract. The paper considers the issues of optimal control of the gas/air ratio in a continuous furnace of a wide-strip hot rolling mill 2000 operating under conditions of variable productivity and changing thermal loads. It is shown that maintaining the stoichiometric balance of the fuel-air mixture directly affects the completeness of gas combustion, the working space temperature and the specific fuel consumption. An approach to automatic correction of the air flow rate coefficient based on the analysis of oxygen content in flue gases and temperature in the soaking zone is proposed. It is found that deviation of the gas/air ratio from the optimal value by 7–10% leads to an increase in heat loss with exhaust gases or to chemical underburning. The described control system allows maintaining the excess air ratio in the range of 1.05–1.15 depending on the profile of heated slabs and their movement rate along the furnace. It is concluded that individual tuning of control parameters is required for each furnace zone taking into account the dynamics of thermal processes.

Keywords: heating of slabs before rolling, automatic control, gas/air ratio, flow proportioning, continuous furnaces.

REFERENCES

1. Parsunkin B.N., Andreev S.M., Akhmetov T.U., Bondareva A.R. Optimal'noe energosberegayushchee upravlenie szhiganiem topliva v promyshlennykh pechakh [Optimal energy-saving combustion control of fuel in industrial furnaces], Mashinostroyeniye: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal [Mechanical Engineering: online electronic scientific journal], 2013, no. 1, pp. 22–26. EDN RKPAFH

2. Parsunkin B.N., Andreev S.M., Samarina I.G. Avtomatizirovannoe energosberegayushchee upravlenie szhiganiem smeshannogo gaza v prokhodnykh pechakh listoprokatnykh stanov [Automated energy-saving control of mixed gas combustion in continuous furnaces of sheet rolling mills], Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы [Electrotechnical Systems and Complexes], 2022, no. 1(54), pp. 68–74. EDN HOTPGO

3. Nuzhin D.V., Andreev S.M., Mukhina E.Yu. Sistema optimal'nogo upravleniya nagrevom zagotovok v prokhodnoy pechi s ispol'zovaniem tekhnologii tsifrovogo dvoynika [Optimal control system for billet heating in a continuous furnace using digital twin technology], Vestnik Cherepovetskogo gosudarstvennogo universiteta [Bulletin of Cherepovets State University], 2025, no. 3(126), pp. 41–58. DOI 10.23859/1994-0637-2025-3-126-4. EDN SABWUQ.

4. Parsunkin B.N., Andreev S.M. Sposoby povysheniya effektivnosti i pomekhoustojchivosti sistem avtomaticheskoy optimizatsii upravleniya tekhnologicheskim processom [Methods for improving the efficiency and noise immunity of automatic process control optimization systems], Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva [Automated technologies and production], 2013, no. 5, pp. 277-290. – EDN PZYNZR.

Савенков, В.Д. Регулирование соотношения газ/воздух в методической печи стана 2000 горячей прокатки / В. Д. Савенков, Е. Ю. Мухина // Автоматизированные технологии и производства. 2026. №1(33). С. 40-44.

V. D. Savenkov, E. Yu. Mukhina Control of Gas/Air Ratio in a Continuous Furnace of Hot Rolling Mill 2000. Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva [Automated technologies and production], 2026. no.1(33), pp. 40-44. (In Russian).

УДК 378.4

ИТОГИ УНИВЕРСИАДЫ «ПУТЬ К УСПЕХУ»
СЕКЦИЯ «МЕТРОЛОГИЯ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ» 2026

Т.Г. Сухоносова, М.А. Михальченко

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 2026 года прошла Универсиада «Путь к успеху» по направлению «Управление в технических системах. Метрология и средства измерения». Участие в Универсиаде приняли более 100 студентов.

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

С декабря 2025 по март 2026 года на кафедре автоматизированных систем управления ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» проходила пятая Универсиада «Путь к успеху» по секции «Метрология и средства измерения» направления подготовки 27.03.04 «Управление в технических системах, профиль: системы и средства автоматизации технологических процессов» (далее Универсиада).

Проверить свои силы в знаниях теоретической и практической метрологии решилось более 100 студентов и выпускников МГТУ. Первый тур Универсиады проводился дистанционно в виде теста, состоящего из 20 вопросов. Вопросы теста были сгенерированы в свободном порядке, максимальный балл – 44; 1 попытка; время на прохождение теста – 50 мин. Ко второму туру было допущено 22 участника, набравшие 29 баллов и выше.

Второй заключительный тур проходил в очном формате в лаборатории кафедры автоматизированных систем управления 19 марта 2026 г и содержал теоретические и практические задания, см. рис. 1.

Заключительный тур Универсиады «Путь к успеху» включал 2 задания комплексного характера по метрологии и средствам измерения и дополнительное задание. Более 60 % заданий заключительного этапа имеют творческий характер, являются оригинальными и отличаются высоким уровнем сложности.

Первое комплексное экспериментально-расчетное задание было связано с определением погрешностей и анализом работы измерительных систем. С помощью комплекта приборов необходимо было провести серию измерений для определения методической погрешности вольтметра и выполнить поверку миллиамперметра.

Второе комплексное теоретическое задание состояло из вопросов и задач на знание основ метрологии и методик измерения электрических и теплофизических величин. Третье (дополнительное) задание содержало вопросы на общий кругозор в области средств и единиц измерений,

рис. 2.

Работы участников заключительного этапа оценивали члены жюри: д.т.н., доцент, заведующий кафедры АСУ С. М. Андреев, руководитель проектов проектного офиса ЗАО «Консом СКС» А. С. Прасолов и старший преподаватель кафедры АСУ И. Г. Самарина.

По итогам Универсиады было присуждено пять призовых мест. Победителем Универсиады стал студент третьего курса гр. АТСб-23-1 Никита Антипанов. Второе место разделили студенты Степан Шундеев, Валерия Погорельская из гр. АТСб-23-1 и Альбек Жабаяев из гр. АНб-23-1. Третье призовое место занял студент Артём Маркелов из гр. АНб-23-1.

Победителю и призерам Универсиады вручены почетные дипломы и памятные сувениры. Также призеры получают дополнительные баллы при поступлении в магистратуру МГТУ им. Г.И. Носова по профилю 27.04.04 «Цифровые системы управления технологическими комплексами».

Подобные проекты подогревают интерес учащихся к самостоятельной работе и углубленному изучению технических вопросов и задач, развивают аналитический склад ума.

Подробная информация о прошедших Универсиадах размещена на официальном сайте Универсиады «Путь к успеху» <http://univer.magtu.ru>, а также странице кафедры автоматизированных систем управления [1, 2].

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 1.06.2026).

2. Страница кафедры АСУ в контакте. – URL: https://vk.ru/magtu_asu (дата обращения 1.06.2026).



Рис. 1. Выполнение теоретической части заданий заключительного этапа Универсиады



Рис. 2. Выполнение практической части заданий заключительного этапа Универсиады

RESULTS OF THE UNIVERSIADE «WAY TO SUCCESS» IN METROLOGY AND MEASURING MEANS » 2026

T.G. Sukhonosova, M.A. Mihalchenko

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 2026 «Way to Success» was held in the direction «Control in technical systems (metrology and measuring means)». More than 100 students participated in the Universiade.

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

[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 1.06.2026).

2. Department of Automated Control Systems page on VK. - URL: https://vk.ru/magtu_asu (accessed 01.06.2026).

Сухоносова, Т.Г. Итоги универсиады «Путь к успеху» секция «Метрология и средства измерения» 2026 / Т.Г. Сухоносова, М.А. Михальченко// Автоматизированные технологии и производства. 2026. №1(33). С. 45-46.

T.G. Sukhonosova, M.A. Mihalchenko Results of the Universiade «Way To Success» in Metrology And Measuring Means » 2026. Avtomatizirovannye tekhnologii i proizvodstva [Automated technologies and production], 2026. no.1(33), pp. 45-46. (In Russian).

ИТОГИ МНОГОПРОФИЛЬНОЙ ОЛИМПИАДЫ ШКОЛЬНИКОВ «ПУТЬ К УСПЕХУ» СЕКЦИЯ «АВТОМАТИКА» 2026

Т.Г. Сухоносова, Н.А. Антипанов

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

nik.antipanov.05@bk.ru

Аннотация. В феврале 2026 года на кафедре автоматизированных систем управления Института энергетики и автоматизированных систем ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова» состоялся заключительный этап Многопрофильной олимпиады школьников и студентов колледжей «Путь к успеху» по направлению «Автоматика». В финальном туре приняли участие 16 сильнейших конкурсантов из Магнитогорска. По результатам экспертной оценки развернутых решений определены победители и призеры, продемонстрировавшие глубокие знания при решении нестандартных инженерных и алгоритмических задач.

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

В Магнитогорском государственном техническом университете им. Г.И. Носова подвели итоги Многопрофильной олимпиады «Путь к успеху» по направлению «Автоматика» [1].

В 2025–2026 учебном году кафедра автоматизированных систем управления организовала олимпиаду для школьников и студентов колледжей. Соревнования проходили в два этапа: отборочный тур в онлайн-формате и очный заключительный этап на базе университета.

Очный финал олимпиады прошел 13 февраля 2026 года в специализированных аудиториях 454 и 448 главного корпуса МГТУ им. Г.И. Носова, рис. 1. Проведение и координация практического тура осуществлялись под строгим и качественным наблюдением опытных наставников – ведущих преподавателей кафедры АСУ: А.Р. Бондаревой, И.Г. Самариной и Т.Г. Сухоносовой, а также учебного мастера Н.А. Антипанова.

Проверку выполненных работ проводила экспертная комиссия, в состав которой вошли представители университета и руководитель проектов проектного офиса ЗАО «Консом СКС» Александр Сергеевич Прасолов, чье совместное судейство гарантирует объективность оценки и высокую практическую значимость олимпиадных заданий.



Рис. 1. Выполнение теоретической части заданий заключительного этапа Олимпиады

В заключительном туре приняли участие 17 финалистов. Им предстояло выполнить 5 комплексных заданий, включая практические задачи по расчету параметров элементов автоматики и анализу работы логических устройств.

Задания заключительного этапа носили оригинальный характер и отличались повышенным уровнем сложности. На выполнение всей работы финалистам отводилось 120 минут, а максимальная оценка составляла 40 баллов. Комплект практических материалов был подготовлен на основе базовых знаний, получаемых учащимися в рамках стандартных программ школ и колледжей.

В качестве примера приведем одно из комплексных заданий, в ходе его выполнения участникам требовалось под наблюдением учебного мастера выполнить практическую часть:

- собрать электрическую схему по рис. 2;
- отрегулировать источник питания, выставив точное значение напряжения 2 В;
- выполнить серию измерений мультиметром, зафиксировав падение напряжения на светодиоде при нескольких положениях ручки потенциометра.

Теоретическая часть задания включала построение графика полученной зависимости и анализ результатов.

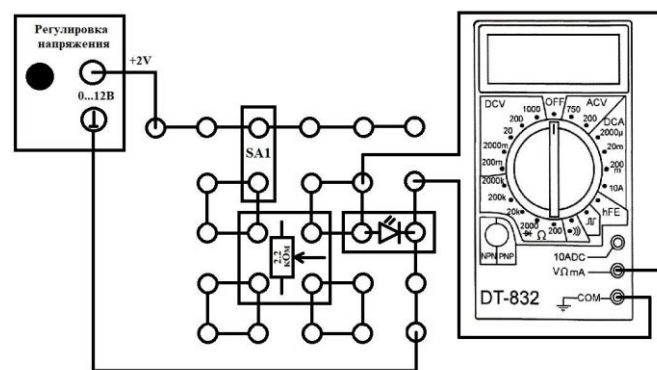


Рис. 2. Схема установки задания №4



Рис. 3. Выполнение практических заданий заключительного этапа Олимпиады

По итогам экспертного анализа олимпиадных работ судейская коллегия определила победителя и призеров, преодолевших установленные балльные пороги:

1 место: Алеманов Ярослав, студент 4 курса Политехнического колледжа, набравший 30,7 балла;

2 место: Медведев Максим, учащийся 11 класса МОУ «МГМЛ», набравший 23,3 балла и Габдрахманов Данил студент 3 курса Политехнического колледжа, набравший 22,5 балла;

3 место: Творогов Данил, студент 4 курса Политехнического колледжа с результатом 20,7 балла.

Изучать автоматику и другие технические дисциплины по профилю «Системы и средства автоматизации технологических процессов» возможно поступив на направление подготовки бакалавриата 27.03.04 «Управление в технических системах» [2].



Рис. 4. Заведующий кафедры АСУ С. М. Андреев вручил дипломы призеру Данилу Габдрахманову (слева) и победителю олимпиады Ярославу Алеманову (справа)

Литература

- 1 Олимпиада Путь к успеху МГТУ им. Г.И. Носова. – URL: <http://molimp.ru> (дата обращения 24.05.2026).
2. Сайт МГТУ им. Г.И. Носова. – URL: <https://abit.magtu.ru/27-03-04-upravlenie-v-tehnicheskikh-sistemah> (дата обращения 24.05.2026).

RESULTS OF THE MULTIDISCIPLINARY SCHOOLCHILDREN'S OLYMPIAD «WAY TO SUCCESS» SECTION «AUTOMATICS» 2026

T.G. Sukhonosova, N.A. Antipanov

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation

Abstract. In February 2026, the Department of Automated Control Systems of the Institute of Energy and Automated Systems at the Nosov Magnitogorsk State Technical University hosted the final stage of the Multidisciplinary Olympiad for school and college students «Way to Success» in the section «Automatics» section. Sixteen top contestants from Magnitogorsk took part in the final round. Based on the results of the expert evaluation of the comprehensive solutions, the winners and runners-up were determined, having demonstrated profound knowledge in solving non-standard engineering and algorithmic problems.

Keywords: multidisciplinary Olympiad, career guidance, automatics, way to success.

REFERENCES

1. «Way to Success» Olympiad at Nosov Magnitogorsk State Technical University. - URL: <http://molimp.ru> (accessed 24.05.2026).
2. Nosov Magnitogorsk State Technical University. - URL: <https://abit.magtu.ru/27-03-04-upravlenie-v-tehnicheskikh-sistemah> (accessed 24.05.2026).

Сухоносова, Т.Г. Итоги многопрофильной олимпиады школьников «Путь к успеху» секция «Автоматика» 2026 / Т.Г. Сухоносова, Н.А. Антипанов// Автоматизированные технологии и производства. 2026. №1(33). С. 47-48.

T.G. Sukhonosova, N.A. Antipanov Results of the Multidisciplinary Schoolchildren's Olympiad «Way To Success» Section «Automatics» 2026. Avtomatizirovannye tekhnologii i proizvodstva [Automated technologies and production], 2026. no.1(33), pp. 47-48. (In Russian).