

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПРОИЗВОДСТВА

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПРОИЗВОДСТВА

№2 (28) декабрь 2023 г.

Международный научно-технический журнал

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

О журнале

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

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

Редакция и редакционный совет

Редакционный совет

Председатель редакционного совета:

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

Заместитель председателя редакционного совета:

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

Члены редакционного совета:

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

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

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

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

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

Редакция

Главный редактор:

Андреев Сергей Михайлович – доктор технических наук, доцент

Ответственный редактор

Самарина Ирина Геннадьевна

Контакты

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

Адрес редакции: 455000, г. Магнитогорск,
пр. Ленина, 38.
E-mail: atp@magtu.ru
Выходит в свет 12.2023.

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

Математическое моделирование технологических систем и объектов управления

Mathematic and simulation of control systems and objects

В.В. Кабанова, О.С. Логунова, М.Ю. Наркевич, В.Д. Корниенко
Кластеризация изображений панельных и блочных зданий на основе гистограмм яркости..... 3

V.V. Kabanova, O.S. Logunova, M.Yu. Narkevich, V.D. Kornienko
Image clustering of panel and block buildings based on brightness histograms 3

И.С. Щеголихин, С.М. Андреев
Генетический алгоритм для решения задачи составления расписания кранов на складе непрерывно-литых заготовок . 10

I.S. Shchegolikhin, S.M. Andreev
Genetic algorithm for solving the problem of crane scheduling in a warehouse of continuous cast billets .. 10

И.П. Попов
Автостабилизация угловой скорости: динамика..... 13

I.P. Popov
Autostabilization of Angular Velocity: Dynamics..... 13

Д.В. Нужин, С.М. Андреев
Выбор оптимального объема выборки при решении задачи регрессии температурного состояния зоны нагревательной печи..... 16

D.V. Nuzhin, S.M. Andreev
Choosing the optimal sample size when solving the problem of regression of the temperature state of the heating furnace zone..... 16

Системы автоматизации и управления

Control System

А.С. Прасолов, С.М. Андреев, М.И. Краснов, Р.Ш. Якупов
Исследование качественных показателей переходного процесса модели контура автоматического регулирования с помощью алгоритма полного перебора настроек ПИ - регулятора..... 23

A.S. Prasolov, S.M. Andreev, M.I. Krasnov, R.Sh. Yakupov
Research of Qualitative Parameters of Automatic Control Loop Model's Transient Process with the Algorithm of PI Controller's Complete Settings Enumeration 23

.Г. Сухоносова, Д.Д. Филатов, С.А. Емельянов, Н.А. Антипанов
Определение постоянной времени инерционного объекта первого порядка по экспериментальной кривой разгона ... 29

T.G. Sukhonosova, D.D. Filatov, S.A. Emelyanov, N.A. Antipanov
Determination of the Time Constant of an Inertial Object of the First Order According to the Experimental Acceleration Curve 29

Технические средства автоматизации

Automation equipment

И.П. Попов
Упруго-деформационная и другие виды мощности для целей мониторинга энергосберегающих технологий..... 33

I.P. Popov
Elastic-Strain and Other Types of Power for the Purposes of Monitoring Energy-Saving Technologies 33

Автоматизация технологических процессов

Process Automation

Е.А. Широбоков, Е.С. Бондарев, А.Р. Бондарева
Система автоматического управления паровым котлом фирмы Loos Bosch 5000..... 36

E.A. Shirobokov, E.S. Bondarev, A.R. Bondareva
Automatic Control System for Steam Boiler Loos Bosch 5000..... 36

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ

Оформление

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

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

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

При оформлении статьи рекомендуется придерживаться следующих правил:

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

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

Размерности величин выбираются и обозначаются согласно ГОСТ 8.417-2002.

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

Пример оформления

УДК 681.5.015.32

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

Б.Н. Парсункин¹, Т.Г. Сухоногова²

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

² tgobuhova@gmail.com

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

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

Введение

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

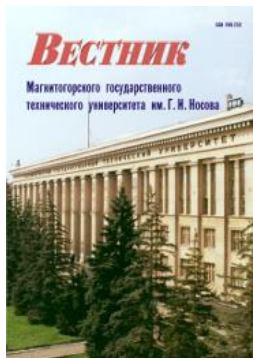
Например, кривые разгона по температуре поверхности нагреваемой заготовки в первой сварочной зоне методической печи №1 стана 2500 ОАО «ММК» (до реконструкции) при различных величинах расхода природного газа во второй сварочной зоне представлены на рис. 1. [2]. Динамические параметры, полученные при обработке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

Предоставление материалов

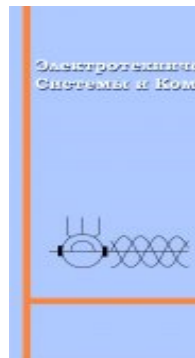
Для опубликования статьи в журнале необходимо представить в электронном виде по e-mail: atp@magtu.ru текст статьи, сведения об авторах и экспертное заключение о возможности опубликования.

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

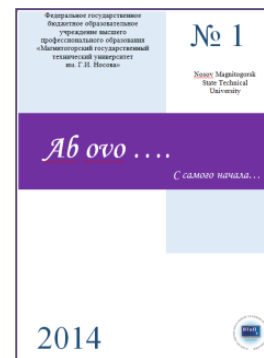
Другие рекомендуемые периодические издания



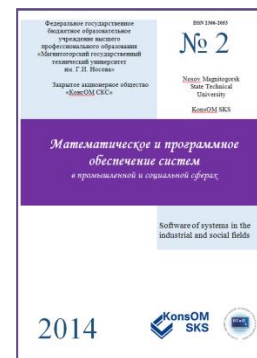
Вестник магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова



Электротехнические системы и комплексы



Журнал молодых исследователей: магистров и аспирантов



Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах

УДК 004.93'14

КЛАСТЕРИЗАЦИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПАНЕЛЬНЫХ И БЛОЧНЫХ ЗДАНИЙ НА ОСНОВЕ ГИСТОГРАММ ЯРКОСТИ

В.В. Кабанова, О.С. Логунова, М.Ю. Наркевич, В.Д. Корниенко

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

e-mail: nika_homework@mail.ru

Аннотация. Целью данного исследования является выполнение программной реализации кластеризатора изображений панельных и блочных зданий, полученных с камеры беспилотного летательного аппарата на территории опасного производственного объекта. Выборка, описанная в работе, состоит из 115-ти изображений зданий. Для реализации кластеризатора используются библиотеки языка программирования *Python*. Для работы с изображениями, проведения кластерного анализа и визуализации результатов используются следующие библиотеки языка программирования *Python*: *cv2*, *numpy*, *pandas*, *matplotlib*, *scikit-learn*, *seaborn*, *SciPy*. В качестве процедуры кластеризации выбран метод *K*-средних (алгоритм Ллойда). Для определения оптимального числа кластеров применяется метод локтя и метод силуэта. В работе приведены графики зависимости суммы квадратов расстояний от числа кластеров. Описаны этапы проведения кластеризации изображений от установки пути к папке с изображениями до просмотра результатов исследователем и принятия решения о необходимости повторной кластеризации. Представлены диаграммы рассеяния и центроиды кластеров. Выполнено построение матриц корреляций для каждого полученного кластера и определения типа тесноты связи между гистограммами яркости изображений по шкале Чеддока. Осуществлен подсчет пар изображений с различными типами связей, определена статистическая значимость коэффициентов корреляции Пирсона. В результате получено, что визуально похожие изображения зданий или изображения одно и того же участка объекта сгруппированы в одни кластеры. После распределения изображений по кластерам предполагается составление индивидуальной траектории анализа изображений, схожих по гистограмме яркости.

Ключевые слова: кластеризация, алгоритм Ллойда, гистограмма яркости, опасный производственный объект, изображение здания, метод локтя, метод силуэта.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время учёные продолжают разрабатывать и улучшать алгоритмы и методы обработки изображений (*Image Processing*) для распознавания образов, семантической сегментации, классификации образов на изображении и извлечения признаков из изображения. Потребность в новых методах обработки изображений растёт с каждым годом, появляются новые нестандартные задачи, требующие решения. Промышленность – одна из отраслей экономики, в которую повсеместно внедряются различные системы, предназначенные для анализа видеопотока и изображений, полученных на территории промышленного предприятия [1-2]. Использование данных систем позволяет уменьшить влияние человеческого фактора, например, на процесс оценки качества выпускаемой продукции и используемого сырья [3-9], выявления брака [10], обнаружения и оценки дефектов объектов [11-13], а также заменить человека на определённых этапах технологического процесса и, следовательно, сократить количество несчастных случаев.

В статье [14] описывается структура прикладной цифровой платформы для оценки технического состояния зданий и сооружений на опасных производственных объектах. Наличие особенностей и требований к исходным данным разработанных методов и алгоритмов приводит к

необходимости разделения изображений по характеристикам для определения значений входных параметров методов обработки и построения индивидуальной траектории, предназначенной для проведения подготовки группы изображений к основному этапу анализа.

Данная статья является продолжением работы [15], в которой приводится технология функционирования классификатора изображений опасных производственных объектов с использованием гистограмм яркости и описывается структура изображений, полученных в ходе исследований.

ВЫБОРКА ИЗОБРАЖЕНИЙ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

Для проведения кластеризации изображений панельных и блочных зданий и сооружений подготовлена выборка, состоящая из 115-ти изображений промышленных и гражданских объектов. В выборке в основном представлены изображения, полученные с камеры беспилотного летательного аппарата. Съёмка проводилась на территории ПАО «ММК». В результате на изображениях запечатлены следующие объекты: главный корпус ЛПЦ №8, здание склада №54. Также получено несколько фотографий панельного жилого здания и гаража с камеры мобильного телефона *Mi 9T*.




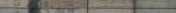
Изначально изображения в выборке сгруппированы по запечатленному объекту (фрагмент панели, крупная часть фасада здания) и по способу получения фотографии (БПЛА или камера телефона). Всего определено 4 предва-

рительно сформированных группы изображений: части фасада, фрагменты панелей зданий, склейки изображений, фото с камеры телефона. Для формирования склеек изображений использовались кадры из видеопотоков.

В табл. 1 представлено по одному примеру изображения из каждой предварительно сформированных групп до проведения кластеризации по гистограмме яркости и указаны названия групп, к которым относятся изображения.

Таблица 1

Примеры изображений из предварительно сформированных групп

№	Изображение	Размер, px × px	Название группы
1		1920 × 1080	Фрагменты панелей
2		5472 × 3648	Части фасада
3		3264 × 2448	Камера_телефон
4		4129 × 728	Склейки

ЭТАПЫ ПРОВЕДЕНИЯ КЛАСТЕРИЗАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПО ГИСТОГРАММАМ ЯРКОСТИ

Для автоматизации процесса кластеризации изображений по гистограмме яркости написана программа на языке программирования *Python*. В данном случае выборка состоит из 115-ти изображений, но при увеличении или уменьшении количества изображений достаточно повторно запустить программу с помощью командной строки, проанализировать результаты и выполнить кластеризацию с установленным числом кластеров.

В качестве процедуры кластеризации выбран метод *K*-средних (алгоритм Ллойда). Для работы с изображениями, проведения кластерного анализа и визуализации результатов используются следующие библиотеки языка программирования *Python*: *cv2*, *numpy*, *pandas*, *matplotlib*, *scikit-learn*, *seaborn*, *SciPy*. Для использования метода *KMeans* (алгоритм Ллойда) подключается модуль *cluster* из библиотеки *scikit-learn*, для вычисления оптимального количества кластеров подключается модуль *metrics* из библиотеки *scikit-learn*.

В табл. 2 представлены шаги проведения кластеризации изображений.

На втором шаге производится перебор всех изображений с форматом *.png* и *.jpg* из указанной папки. Каждое изображение считывается и переводится в оттенки серого. Далее для изображения строится гистограмма яркости, и в общий список *hists* сохраняется список *hist* с количеством пикселей для каждого значения яркости (от 0 до 255). В результате после перебора *N* изображений из указанной папки в списке *hists* хранится *N* списков значений частот.

После осуществляется предварительная обработка

данных – масштабирование (нормализация) данных к диапазону значений от 0 до 1 с помощью функции *MinMaxScaler()* модуля *preprocessing* библиотеки *scikit-learn*. Масштабирование используется для нормализации значений функций, атрибутов, имеющих свой собственный диапазон, чтобы предотвратить «доминирование» одной функции над другими функциями.

Таблица 2

Шаги проведения кластеризации изображений

Номер шага	Действие	Результат
1	Установка пути к папке с изображениями	Значение переменной <i>folder_images</i> изменено
2	Перебор <i>N</i> изображений из папки и построение гистограммы яркости с последующим сохранением значений частот для каждого изображения	Список <i>hists</i> содержит <i>N</i> списков <i>hist</i>
3	Нормализация данных	В переменной <i>df_scale</i> хранятся нормализованные данные
4	Применение метода главных компонент для уменьшения количества атрибутов и визуализации результатов	В переменной <i>pca_df</i> хранятся данные с уменьшенной размерностью
5	Определение оптимального количества кластеров методом локтя и методом силуэта	В переменную <i>count_clusters</i> записывается итоговое количество кластеров
6	Построение графика зависимости суммы квадратов расстояний от числа кластеров	Сохранение графика в текущей папке в виде изображения под названием <i>WSS.png</i>
7	Построение диаграммы рассеяния с центроидами кластеров	Сохранение диаграммы в текущей папке в виде изображения под названием <i>clusters.png</i>
8	Распределение изображений по папкам в соответствии с номерами кластеров	Создание папок (количество папок равно количеству кластеров) и копирование изображений в папки
9	Просмотр результатов исследователем	Принятие решения о необходимости проведения повторной кластеризации

Набор данных содержит 256 атрибутов и *N* записей (количество изображений). Для визуализации данных производится уменьшение количества атрибутов с 256 до 2 с помощью метода главных компонент (*PCA*). Пример данных после применения метода представлен на рис. 1.

	principal component 1	principal component 2
0	-0.354221	-0.253349
1	-1.805746	-0.642375
2	2.227547	2.084108
3	-1.727520	-2.743648
4	-2.681857	-1.405436

Рис. 1. Пример таблицы с данными после применения метода главных компонент (*PCA*)

Метод главных компонент позволяет преобразовать данные из пространства высокой размерности в пространство низкой размерности с минимальной потерей

информации, а также удалить избыточность в наборе данных.

Поскольку для кластеризации изображений используется метод K -средних, перед проведением процедуры вычисляется оптимальное количество кластеров с помощью метода локтя (*Elbow Rule*) и метода силуэта (*Silhouette Method*). В результате после анализа графика, полученного после подсчёта общей внутригрупповой суммы квадратов (WSS) для разного количества кластеров, и определения количества кластеров методом силуэта исследователь может изменить итоговое количество кластеров. В методе силуэта выбирается количество кластеров с максимальным значением коэффициента силуэта. В методе локтя определяется место «перегиба» графика и относительно него устанавливается количество кластеров.

После завершения процедуры разделения изображений из предварительно сформированной группы на кластеры данные после процедуры PCA представляются в виде точечной диаграммы. Также на диаграмму наносятся центры кластеров.

В итоге каждое изображение из предварительно сформированной группы относится к определённому кластеру. Далее изображения распределяются по папкам в соответствии с номерами кластеров. Данные шаги выполняются для каждой группы из табл. 1.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате кластеризации методом K -средних 50-ти изображений из папки «Части фасада» получена диаграмма рассеяния, представленная на рис. 2.

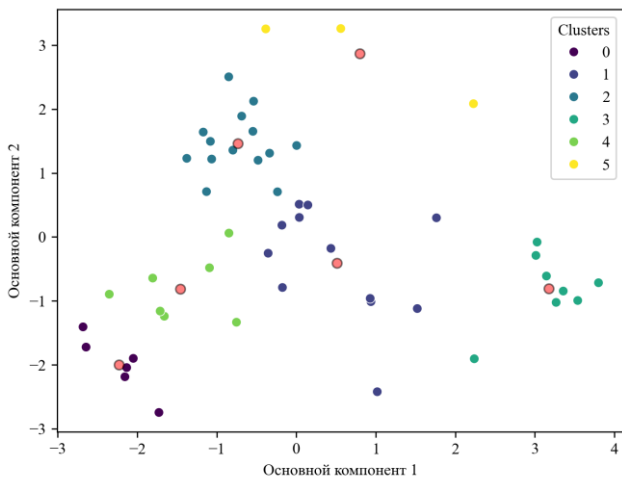


Рис. 2. Диаграмма рассеяния и кластеры изображений из папки «Части фасада»

Изображения из папки «Части фасада» разделены на 6 кластеров: 0 кластер – 6 изображений, 1 кластер – 12, 2 кластер – 14, 3 кластер – 8, 4 кластер – 7, 5 кластер – 3. Количество кластеров определено исследователем после изучения графика зависимости суммы квадратов расстояний от числа кластеров и просмотра результатов метода силуэта. Оптимальное количество кластеров по методу силуэта равно 3. На графике (рис. 4, а) зависимости суммы квадратов расстояний от числа кластеров также видно, что при увеличении числа кластеров (после 3) незначительно уменьшается общая внутригрупповая сумма квадратов (WSS). Но после

просмотра изображений, распределенных по папкам, созданных для группировки изображений, определено, что необходимо увеличить число кластеров до 6.

После кластеризации методом K -средних 4 изображений из папки «Склейки» получена диаграмма рассеяния, представленная на рис. 3. Изображения из папки «Склейки» разделены на 3 кластера: 0 кластер – 2 изображения, 1 кластер и 2 кластер по одному изображению. Поскольку кластеры №1 и №2 состоят из одного изображения, центры кластеров совпадают с точкой компонентов. По методу силуэта оптимальное число кластеров равно 3, по методу локтя аналогично (рис 4, б).

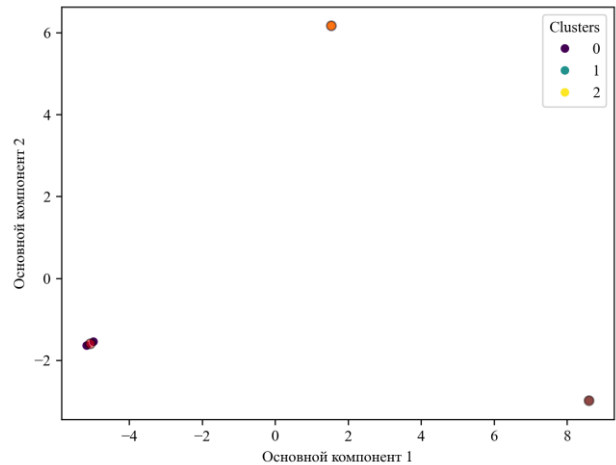


Рис. 3. Диаграмма рассеяния и кластеры изображений из папки «Склейки»

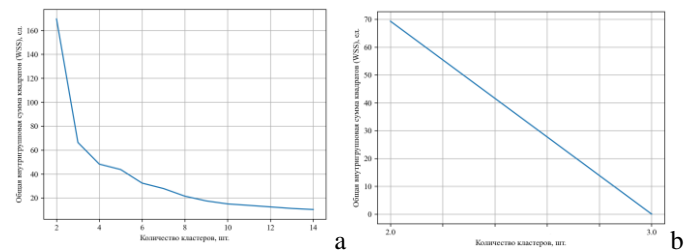


Рис. 4. Графики зависимости суммы квадратов расстояний от числа кластеров: а – определение числа кластеров для изображений из папки «Части фасада»; б – определение числа кластеров для изображений из папки «Склейки»

В результате кластеризации методом K -средних 50-ти изображений из папки «Фрагменты панелей» получены диаграммы рассеяния, представленные на рис. 5.

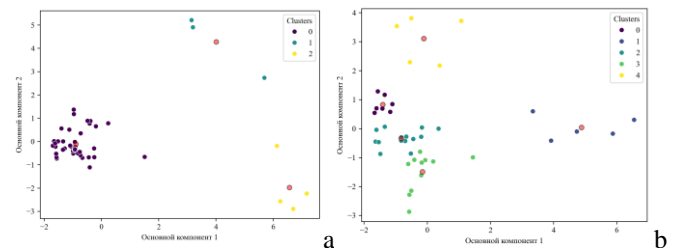


Рис. 5. Диаграммы рассеяния: а – кластеры изображений из папки «Фрагменты панелей» (первый этап); б – кластеры изображений из папки «Фрагменты панелей» (второй этап)

Изображения из папки «Фрагменты панелей» разделены на 7 кластеров: 0 кластер – 7 изображений, 1 кластер – 5, 2 кластер – 15, 3 кластер – 11, 4 кластер – 5, 5 кластер – 3, 6 кластер – 4. При первой кластеризации изображения разделяются на 3 группы (рис. 5, а). При этом количество кластеров определено по методу силуэта.

Далее кластер №0 также дополнительно разделяется на 5 кластеров (рис. 5, б) без учёта кластеров под номерами 1-2 (рис. 5, а). Количество кластеров получено исследователем после анализа графика зависимости суммы квадратов расстояний от числа кластеров (рис. 6). Перегиб на графике происходит при числе кластеров, равном 4, поэтому выбирается количество кластеров правее точки перегиба (5 шт.).

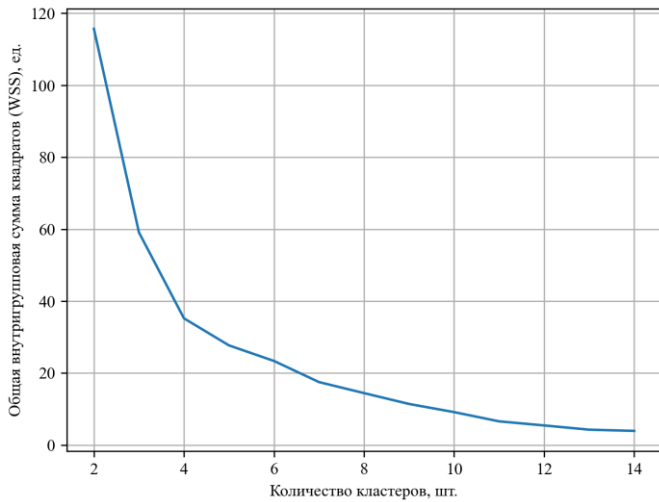


Рис. 6. График зависимости суммы квадратов расстояний от числа кластеров (папка «Фрагменты панелей»)

После кластеризации методом K-средних 11 изображений из папки «Камера_телефон» получена диаграмма рассеяния, представленная на рис. 7, а. Изображения из папки «Камера_телефон» разделены на 3 кластера: 0 кластер – 3 изображения, 1 кластер – 2, 2 кластер – 6. Количество кластеров определено по методу силуэта (3 шт.) и методом локтя (рис. 7, б).

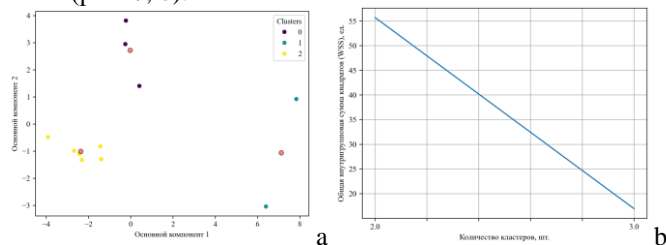


Рис. 7. Результаты проведения кластеризации для изображений из папки «Камера_телефон»: а – диаграмма рассеяния и кластеры; б – график зависимости суммы квадратов расстояний от числа кластеров

На данном этапе все изображения из выборки распределены по кластерам. Далее выполняется построение матриц корреляций гистограмм яркости изображений для каждого кластера с помощью функции *compareHist* из библиотеки *OpenCV*. Данная функция вычисляет линейный коэффициент корреляции *r*-Пирсона между двумя гистограммами яркости изображений. Выявление тесноты связи между гистограммами осуществляется с помощью

шкалы Чеддока для качественной оценки. Для определения является ли связь между переменными статистически значимой или нет используется функция *pearsonr* из библиотеки *SciPy* и модуля *stats*, возвращающая *p*-значение коэффициента корреляции. При этом установлен уровень значимости, равный 0,05.

В табл. 3-6 представлены результаты подсчёта количества типов связи между гистограммами изображений в каждом кластере (значение коэффициента корреляции Пирсона берётся по модулю). В табл. 3-6 введены следующие обозначения: *p* – процент статистически значимых связей, %; *n* – связь практически отсутствует, шт.; *w* – слабая связь, шт.; *m* – умеренная связь, шт.; *nt* – заметная связь, шт.; *h* – сильная связь, шт.; *vh* – очень сильная связь, шт.; *f* – практически функциональная связь, шт. В расчёт включены пары изображений без повторений и не учитываются пары, расположенные на главной диагонали матрицы корреляций (коэффициент корреляции равен 1). В табл. 4 в ячейках для 1 и 2 кластера установлены прочерки, поскольку кластеры состоят из одного изображения.

В табл. 3 представлено 224 пары изображений, из них 192 пары имеют умеренную, заметную, сильную, очень сильную или практически функциональную связь, что составляет 86 % от общего числа пар в кластере. При этом процент статистически значимых коэффициентов корреляции снижается только для пар из кластера №1 и равен 77 %. Данный кластер единственный, в котором присутствуют пары (14 шт.) с практически отсутствующей зависимостью.

Таблица 3

Результаты подсчёта количества типов связи между гистограммами яркости изображений (папка «Части фасада»)

Номер кластера	<i>p</i> , %	<i>n</i> , шт	<i>w</i> , шт	<i>m</i> , шт	<i>nt</i> , шт	<i>h</i> , шт	<i>vh</i> , шт	<i>f</i> , шт
0	100	0	0	1	8	3	3	0
1	77	14	17	19	11	5	0	0
2	100	0	0	6	21	42	21	1
3	100	0	0	0	12	13	3	0
4	100	0	1	3	7	10	0	0
5	100	0	0	1	1	0	1	0

В табл. 4 представлена 1 пара изображений из 0 кластера, имеющая очень сильную связь. Данные изображения визуально также похожи.

Таблица 4

Результаты подсчёта количества типов связи между гистограммами яркости изображений (папка «Склейки»)

Номер кластера	<i>p</i> , %	<i>n</i> , шт	<i>w</i> , шт	<i>m</i> , шт	<i>nt</i> , шт	<i>h</i> , шт	<i>vh</i> , шт	<i>f</i> , шт
0	100	0	0	0	0	0	1	0
1	-	-	-	-	-	-	-	-
2	-	-	-	-	-	-	-	-

В табл. 5 представлено 210 пар изображений, из них 166 пар имеют умеренную, заметную, сильную или очень сильную связь, что составляет 79 % от общего числа пар в кластере. При этом процент статистически значимых коэффициентов корреляции снижается для пар из кластеров №0 и №2 и равен 90 % и 78 %, соответственно, а для остальных кластеров равен 100 %. В данных кластерах установлено 25 шт. практически отсутствующей связи и 18 шт. слабой связи между гистограммами яркости изображений.

В табл. 6 представлено 19 пар изображений, из них 19 пар имеют заметную, сильную или очень сильную связь, что составляет 100 % от общего числа пар в кластере. При этом процент статистически значимых коэффициентов корреляции равен 100 % для всех кластеров из папки «Камера_телефон».

Таблица 5

Результаты подсчёта количества типов связи между гистограммами яркости изображений (папка «Фрагменты панелей»)

Номер кластера	p, %	n, шт	w, шт	m, шт	nt, шт	h, шт	vh, шт	f, шт
0	90	2	4	4	5	5	1	0
1	100	0	0	0	0	6	4	0
2	78	23	14	9	18	27	14	0
3	100	0	1	10	16	19	9	0
4	100	0	0	0	0	6	4	0
5	100	0	0	1	0	2	0	0
6	100	0	0	3	0	0	3	0

Таблица 6

Результаты подсчёта количества типов связи между гистограммами яркости изображений (папка «Камера_телефон»)

Номер кластера	p, %	n, шт	w, шт	m, шт	nt, шт	h, шт	vh, шт	f, шт
0	100	0	0	0	0	2	1	0
1	100	0	0	0	1	0	0	0
2	100	0	0	0	0	0	15	0

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам исследования получено, что:

1) использование процедуры кластеризации *K*-средних совместно с библиотеками языка *Python*, предназначенными для анализа и визуализации данных, а также для работы с файлами позволило в автоматизированном режиме распределить изображения панельных и блочных зданий и сооружений по кластерам на основе сходства гистограмм яркости, при этом исследователь сам принимает решение о количестве кластеров, и в автоматическом режиме, если используется оптимальное значение количества кластеров, полученное с помощью метода силуэта без участия человека;

2) визуально похожие изображения зданий или изображения одно и того же участка объекта сгруппированы в одни кластеры. Следовательно, кластеризация может использоваться для группировки большой выборки изображений, внесения повторяющихся или похожих изображений в одни группы и снижения участия человека в данном процессе;

3) для определения тесноты связи между гистограммами яркости изображений из одного кластера используется матрица корреляций и шкала Чеддока;

4) после распределения изображений по кластерам предполагается составление индивидуальной траектории анализа изображений, схожих по гистограмме яркости.

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Работа выполняется по договору №247715 от 05.07.2021 г. между ПАО «ММК» и ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова» «Разработка и применение методик контроля территорий, зданий и сооружений ПАО «ММК» с использованием беспилотных воздушных судов (БВС)».

ЛИТЕРАТУРА

1. Логунова О.С. Декомпозиция интеллектуальной системы принятия решений при оценке состояния зданий и сооружений промышленного предприятия: сбор информации / О.С. Логунова, М.Ю. Наркевич // Компьютерная интеграция производства и ИПИ-технологии : Сборник материалов X Всероссийской конференции, Оренбург, 18–19 ноября 2021 года. – Оренбург: Оренбургский государственный университет, 2021. – С. 143-147. – EDN FVVHNS.

2. Корниенко В.Д. Методика сбора и обработки информации для контроля состояния территории, зданий и сооружений на опасных производственных объектах металлургического предприятия / В.Д. Корниенко, М.Ю. Наркевич, О.С. Логунова [и др.] // Электротехнические системы и комплексы. – 2022. – № 4(57). – С. 76-87. – DOI 10.18503/2311-8318-2022-4(57)-76-87. – EDN MLSKSS.

3. Емельянов В.А. Применение технологий искусственного интеллекта для оценки качества металлов на производстве / В.А. Емельянов, Г.В. Феклин, Н.Ю. Емельянова // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. – 2022. – Т. 24, № 5. – С. 28-35. – DOI 10.18127/j19998554-202205-03. – EDN RAAKUI.

4. Золотокопов А.В. Применение программных модулей для обработки показателей качества пищевых добавок / А.В. Золотокопов, Е.В. Иночкина, З.А. Яралиева // Современные проблемы цивилизации и устойчивого развития в информационном обществе : Сборник материалов XI Международной научно-практической конференции, Москва, 20 августа 2022 года. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью "Издательство АЛЕФ", 2022. – С. 114-119. – DOI 10.34755/IROK.2022.30.77.008. – EDN GJWHZS.

5. Наркевич М.Ю. Качество материалов, изделий и конструкций в промышленной безопасности: эмпирическая основа / М.Ю. Наркевич, О.С. Логунова, В.Д. Корниенко [и др.] // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2021. – Т. 19, № 3. – С. 90-101. – DOI 10.18503/1995-2732-2021-19-3-90-101. – EDN KXQAWF.

6. Суворов И.А. Разработка автоматизированной системы для анализа качества текстильной поверхности волоконно-композитного слоя с использованием систем обработки изображений / И.А. Суворов // Известия высших учебных заведений. Серия: Экономика, финансы и управление производством. – 2022. – № 3(53). – С. 101-108. – DOI 10.6060/ivecofin.2022533.619. – EDN XJIJSA.

7. Чистякова Т.Б. Методы и технологии применения нечётких моделей для обработки промышленных данных и управления качеством полимерных материалов / Т.Б. Чистякова, Р.В. Макарук, А.Ч. Тедтоев // Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям. – 2022. – Т. 1. – С. 56-59. – EDN ZLVKII.

8. Антонова Н.М. Оценка дефектов поверхности изделий с помощью цифровых технологий / Н.М. Антонова, Е.Ю. Хаустова // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2021. – № 11. – С. 24-32. DOI: 10.30987/1999-8775-2021-11-11-19.

9. Логунова О.С. Системы оптического контроля качества поверхности стальной полосы / О.С. Логунова, А.В. Маркевич, Е.А. Гарбар // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2023. – № 2. – С. 299-305. – DOI 10.24412/2071-6168-2023-2-299-305. – EDN QAONDH.

10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022613308 Российская Федерация. Программа обнаружения брака гвоздей на основе компьютерного зрения : № 2022612903 : заявл. 05.03.2022 : опубл. 14.03.2022 / М. В. Трусфус. – EDN VJWMWA.

11. Кабанова В.В. Программное обеспечение для автоматизированного обнаружения и оценки разрушений со-

единительных швов зданий / В.В. Кабанова, О.С. Логунова, М.Ю. Наркевич, В.Д. Корниенко // Программные продукты и системы. – 2023. – № 3. – С. 474-485. – DOI 10.15827/0236-235X.143.474-485. – EDN KQTPUX.

12. Катаев М.Ю. Программная система обнаружения дефектов кирпичей на основе методов компьютерного зрения / М.Ю. Катаев, Р.К. Карпов, К.А. Ламинский // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2021. – Т. 24, № 1. – С. 62-67. – DOI 10.21293/1818-0442-2021-24-1-62-67. – EDN VLFHPG.

13. Панфилов А.В. О контроле технического состояния лифтовых канатов на основе технологий искусственного интеллекта и компьютерного зрения / А.В. Панфилов, А.Р. Юсупов, А.А. Короткий, Б.Ф. Иванов // Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don). – 2022. – Т. 22, № 4. – С. 323-330. – DOI 10.23947/2687-1653-2022-22-4-323-330. – EDN KXIBLJ.

14. Наркевич М.Ю. Прикладная цифровая платформа для оценки динамики качества опасных производственных объектов на металлургическом предприятии: структура и алгоритмы / М.Ю. Наркевич, О.С. Логунова, М.Б. Аркулис [и др.] // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2022. – № 5(110). – С. 29-48. – DOI 10.23859/1994-0637-2022-5-110-3. – EDN ELUMKD.

15. Логунова О.С. Технология классификации изображений опасного производственного объекта с использованием гистограмм яркости / О.С. Логунова, М.Ю. Наркевич, В.Д. Корниенко, В.В. Кабанова // Автоматизированные технологии и производства. – 2022. – № 2(26). – С. 26-31. – EDN XQXVOF.

IMAGE CLUSTERING OF PANEL AND BLOCK BUILDINGS BASED ON BRIGHTNESS HISTOGRAMS

V.V. Kabanova, O.S. Logunova, M.Yu. Narkevich, V.D. Kornienko

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

e-mail: nika_homework@mail.ru

Abstract. The purpose of this research is to perform a software implementation of a clusterizer of images of panel and block buildings obtained from a drone camera on the territory of a hazardous industrial facility. The sample described in the paper consists of 115 building images. Python programming language libraries are used to implement the clusterizer. The following Python programming language libraries are used to work with images, perform cluster analysis and visualize the results: cv2, numpy, pandas, matplotlib, scikit-learn, seaborn, SciPy. The K-means method (Lloyd's algorithm) is chosen as the clustering procedure. The elbow method and the silhouette method are applied to determine the optimal number of clusters. The paper presents graphs of the dependence of the sum of squares of distances on the number of clusters. The steps of image clustering from setting the path to the folder with images to viewing the results by the researcher and deciding whether re-clustering is necessary are described. Scattering diagrams and centroids of clusters are presented. Correlation matrixes for each cluster and determining the type of closeness between the histograms of image brightness on the Cheddock scale. The pairs of images with different types of connections were counted and the statistical significance of Pearson correlation coefficients was determined. As a result, it was obtained that visually similar images of buildings or images of the same object area are grouped into the same clusters. After distribution of images into clusters it is supposed to compose an individual trajectory of analysis of images similar in brightness histogram.

Keywords: clustering, Lloyd's algorithm, brightness histogram, hazardous production facility, building image, elbow method, silhouette method.

REFERENCES

1. Logunova O.S., Narkevich M.Yu. Dekompozitsiya intellektualnoy sistemy prinyatiya resheniy pri otsenke sostoyaniya zdaniy i sooruzheniy promyshlennogo predpriyatiya: sbor informatsii, *Trudy "Kompyuternaya integratsiya proizvodstva i IPI-tehnologii"*, Orenburg, 2021, pp. 143-147.
2. Kornienko V.D., Narkevich M.Yu., Logunova O.S., Kozlova A.E., Zaytsev I.P. Methodology for Collecting and Processing Information to Monitor the State of the Territory, Buildings And Structures at Hazardous Production Facilities of a Metallurgical Enterprise [Metodika sbora i obrabotki informatsii dlya kontrolya sostoyaniya territorii, zdaniy i sooruzheniy na opasnykh proizvodstvennykh obektakh metallurgicheskogo predpriyatiya], *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы [Electrotechnical Systems and Complexes]*, 2022, no. 4 (57), pp. 76-87. (In Russian). doi: [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-4\(57\)-76-87](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-4(57)-76-87).
3. Emelyanov V.A., Feklin G.V., Emelyanova N.Yu. Application of artificial intelligence technologies to assess the quality of metals in a metallurgical production [Primenenie tekhnologiy iskusstvennogo intellekta dlya otsenki kachestva metallov na proizvodstve], *Neyrokompyutery: razrabotka, primeneniye*, 2022, vol. 24, no. 5, pp. 28-35. doi: [10.18127/j19998554-202205-03](https://doi.org/10.18127/j19998554-202205-03).
4. Zolotokopov A.V., Inochkina E.V., Yarialieva Z.A. Primenenie programmnykh moduley dlya obrabotki pokazateley kachestva pishchevykh dobavok, *Trudy "Sovremennyye problemy tsivilizatsii i ustoychivogo razvitiya v informatsionnom obshchestve"*, Moscow, 2022, pp. 114-119.
5. Narkevich M.Yu., Logunova O.S., Kornienko V.D., Nikolaev A.A., Tyulyumov A.N., Zlydarev N.V., Deryabin D.I. Quality of Materials, Products and Structures in Industrial Safety: an Empirical Basis [Kachestvo materialov, izdeliy i konstruksiy v promyshlennoy bezopasnosti: empiricheskaya osnova], *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova [Vestnik of Novosibirsk State Technical University]*, 2021, vol. 19, no. 3, pp. 90-101. doi: <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-3-90-101>.
6. Suvorov I.A. Development of an automated system for textile surface quality analysis of a fiber composite layer using image processing systems [Razrabotka avtomatizirovannoy sistemy dlya analiza kachestva tekstilnoy poverkhnosti volokonno-kompozitnogo sloya s ispolzovaniem sistem obrabotki izobrazheniy], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Seriya: Ekonomika, finansy i upravlenie proizvodstvom [News of higher educational institutions. The series "Economics, finance and production management"]*, 2022, no. 3 (53), pp. 101-108. doi: [10.6060/ivecofin.2022533.619](https://doi.org/10.6060/ivecofin.2022533.619).
7. Chistyakova T.B., Makaruk R.V., Tedtoev A.Ch. Methods and technologies of application of fuzzy models for processing industrial data and quality management of polymer materials [Metody i tekhnologii primeneniya nechetkikh modeley dlya obrabotki promyshlennykh daniy i upravleniya kachestvom polimernykh materialov], *Trudy "Mezhdunarodnaya konferentsiya po myagkim vychisleniyam i izmereniyam"*, Saint Petersburg, 2022, vol. 1, pp. 56-59.
8. Antonova N.M., Khaustova E.Yu. Evaluation of surface defects of products using digital technologies [Otsenka defektov poverkhnosti izdeliy s pomoshchyu tsifrovyykh tekhnologiy], *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Bulletin of Bryansk State Technical University]*, 2021, no. 11, pp. 24-32. doi: [10.30987/1999-8775-2021-11-11-19](https://doi.org/10.30987/1999-8775-2021-11-11-19).
9. Logunova O.S., Markevich A.V., Garbar E.A. Systems for optical quality control of steel strip surface [Sistemy opticheskogo kontrolya kachestva poverkhnosti stalnoy polosy], *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskije nauki*, 2023, no. 2, pp. 299-305. doi: [10.24412/2071-6168-2023-2-299-305](https://doi.org/10.24412/2071-6168-2023-2-299-305).
10. Svidetelstvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM № 2022613308 Rossiyskaya Federatsiya. *Programma obnaruzheniya braka gvozdey na osno-ve kompyuternogo zreniya : № 2022612903 : zayavl. 05.03.2022 : opubl. 14.03.2022 / M. V. Trusfus. – EDN VJWMA*.
11. Kabanova V.V., Logunova O.S., Narkevich M.Yu., Kornienko V.D. Software for automated detection and assessment of building seam failures [Programmnoye obespecheniye dlya avtomatizirovannogo obnaruzheniya i otsenki razrusheniy soedinitelnykh shvov zdaniy], *Programmnye produkty i sistemy [Software & Systems]*, 2023, no. 36 (3), pp. 474-485 (in Russ.). doi: [10.15827/0236-235X.142.474-485](https://doi.org/10.15827/0236-235X.142.474-485).
12. Kataev M.Yu., Karpov R.K., Laminsky K.A. Software system for detecting brick defects based on computer vision methods [Programmnaya sistema obnaruzheniya defektov kirpichey na osnove metodov kompyuternogo zreniya], *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki*, 2021, no. 24 (1), pp. 62-67.
13. Panfilov A.V., Yusupov A.R., Korotkiy A.A., Ivanov B.F. On the Control of the Technical Condition of Elevator Ropes Based on Artificial Intelligence and Computer Vision Technology [O kontrole tekhnicheskogo sostoyaniya liftovykh kanatov na osnove tekhnologiy iskusstvennogo intellekta i kompyuternogo zreniya], *Advanced Engineering Research (Rostov-na-Donu) [Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)]*, 2022, vol. 22, no. 4, pp. 323-330.
14. Narkevich M.Yu., Logunova O.S., Arkulis M.B., Sagadatov A.I., Klimov S.S., Kabanova V.V., Nikolaev A.A., Deryabin D.I. Applied digital platform for assessing the dynamics of the quality of hazardous industrial facilities at a metallurgical enterprise: structure and algorithms [Prikladnaya tsifrovaya platforma dlya otsenki dinamiki kachestva opasnykh proizvodstvennykh obektov na metallurgicheskome predpriyatii: struktura i algoritmy], *Vestnik Cherepovetskogo gosudarstvennogo universiteta [Cherepovets State University Bulletin]*, 2022, no. 5 (110), pp. 29-48. (In Russian).
15. Logunova O.S., Narkevich M.Yu., Kornienko V.D., Kabanova V.V. Technology for Image Classification of a Hazardous Production Facility Using Brightness Histogram [Tekhnologiya klassifikatsii izobrazheniy opasnogo proizvodstvennogo obekta s ispolzovaniem gistogramm yarkosti], *Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva [Automation of technologies and production]*, 2022, no. 2 (26), pp. 26-31. (In Russian).

ГЕНЕТИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ СОСТАВЛЕНИЯ РАСПИСАНИЯ КРАНОВ НА СКЛАДЕ НЕПРЕРВНО-ЛИТЫХ ЗАГОТОВОК

И.С. Щеголихин, С.М. Андреев

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

Shchegolikhin.i@yandex.ru

Аннотация. В настоящей работе рассматривается решение задачи составления расписания кранов (CSP) на складе непрерывнолитых заготовок металлургического предприятия с целью минимизации числа переключений слябов кранами металлургического предприятия. Оптимальное решение данной задачи увеличивает эффективность производства. Для решения данной задачи авторами предложен модифицированный генетический алгоритм, который использует переопределенные генетические операторы, соответствующие проблемной тематике. В предложенном генетическом алгоритме предпринимается попытка борьбы с преждевременной сходимостью, за счет поддержания разнообразия популяции на протяжении всех итераций настоящего алгоритма.

Ключевые слова: складирование, оптимизация, сляб, генетический алгоритм

ВВЕДЕНИЕ

Совершенствование технологий производства во многом происходит за счет повышения их системности. Оно влечет за собой очевидные преимущества, такие как увеличение эффективности системы и её срока жизни. С другой стороны, системность требует усложнения внутренней структуры и использования новых компонентов.

В последние годы все больше систем модернизируются за счет повсеместной цифровизации. Цифровые устройства в совокупности с программным обеспечением [1] позволяют решать широкий спектр задач оптимизации технологических процессов, что позволяет повысить эффективность АСУТП и ее отдельных элементов.

Системы складирования играют большую роль в самых разных технологических процессах, от их организации и функционирования зависят темпы и непрерывность производства.

Оптимизация таких систем помогает снизить накладные расходы [2] и повысить эффективность логистики ресурсов предприятия, что в результате ведет к повышению уровня системности всего производственного процесса, который становится цельным и органичным.

ПРОЦЕСС СКЛАДИРОВАНИЯ НЕПРЕРВНОЛИТЫХ ЗАГОТОВОК

Особое внимания заслуживают системы складирования непрерывнолитых заготовок на металлургических предприятиях. Как показано на Рис. 1, склад слябов связывает два этапа: непрерывную разливку стали и горячую прокатку. Непрерывные заготовки, поступающие с машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ), поступают на склад для доведения до соответствующей температуры и ожидания отправки на горячую прокатку. Можно видеть, что эффективность такого склада влияет на эффективность всего технологического процесса [3].

Выделяют две типовые задачи складирования непрерывнолитых заготовок: распределение мест хранения (SSP) и составление расписания кранов (CSP). Задача SSP заключается в назначении слябам, поступающим с участка непрерывного литья, мест хранения. Решение задачи CSP определяет очередность операций, выполняемых кранами над слябами.

Доказано, что задачи CSP и SSP являются NP-полными [4], что в современных реалиях влечет за собой необходимость поиска эвристических методов решения этих двух задач.

Можно также выделить следующие особенности задачи CSP:

- целевая функция представлена в незамкнутом виде;
- комбинаторный характер;
- конечное пространство поиска;
- наличие множества жестких и мягких ограничений;
- невозможность выделить явным образом область допустимых значений целевой функции.

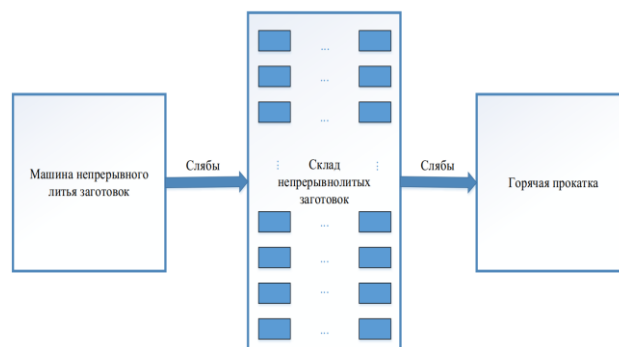


Рис. 1. Склад непрерывнолитых заготовок

Предполагается, что на производстве задан портфель заказов, слябы из которого должны быть направлены на

горячую прокатку в порядке следования друг за другом без перекрытий с другими слябами.

ЭВОЛЮЦИОННЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ

Методы эволюционных вычислений подражают биологическим процессам. Среди этого класса методов можно выделить генетические алгоритмы, которые хорошо подходят для решения CSP, т.к. эта задача является комбинаторной и NP-полной. Классический генетический алгоритм [5] можно адаптировать следующим способом (Рис. 2, где: *pop_size* - размер популяции; *generation_count* - число поколений; *cross_p* - вероятность скрещивания; *mut_p* - вероятность мутации, *elitism_size* - количество элитарных индивидов):

- индивидом является последовательность троек (вещественных чисел), первые два есть координаты расположения слябов на складе, третье - порядковый номер поступления сляба с МНЛЗ;
- целевая функция есть количество перекладываний слябов при выполнении портфеля заказов;
- оператором отбора является турнир размера 2;
- оператор скрещивания представляет собой двухточечное скрещивание списков;
- оператор мутации с заданной вероятностью переставляет местами 2 гена индивида;
- для увеличения разнообразия популяции используется линейное масштабирование функции приспособленности.

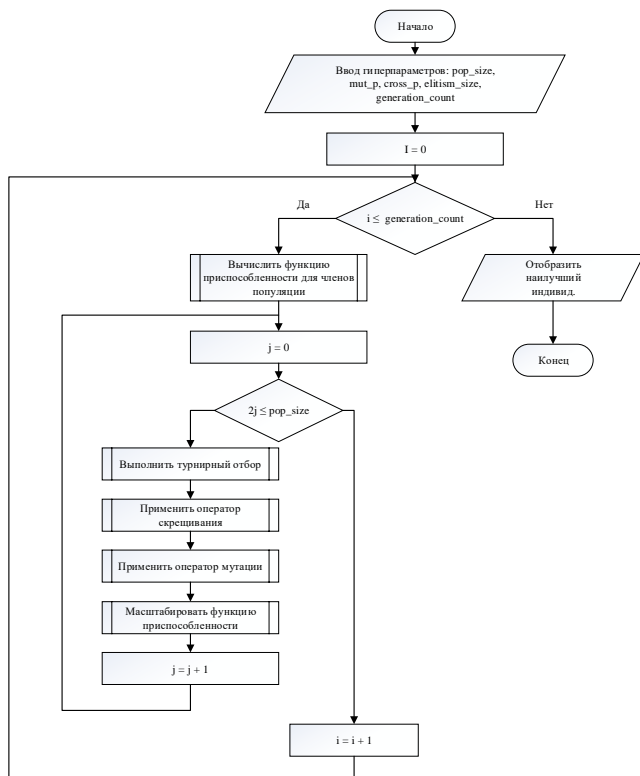


Рис. 2. Блок-схема генетического алгоритма

Предложенная конфигурация видеоизмененного классического генетического алгоритма поддерживает разнообразие популяции за счет использования наименьшего из возможных размеров турнирного отбора, а также использования масштабирования целевой функции для увеличения диапазона значений последней, а также обладает относительной простотой вычисления.

Целевая функция представляет собой сумму числа перекладываний слябов для заданного портфеля заказов с количеством нарушений жесткого ограничения на число слябов в штабеле. Если оператор скрещивания или мутации выводят индивида за область допустимых решений, то целевая функция штрафует такого индивида на величину, пропорциональную числу лишних слябов в штабеле.

Таким образом, предложенный генетический алгоритм стремится минимизировать по факту сразу две цели: число лишних слябов в штабеле и число перекладываний для заданного портфеля заказов.

Особенностью данного алгоритма является то, что он определяет решение задачи SSP для заданного портфеля заказов, иными словами, для полученного решения слябы должны быть расположены определенным образом, что послужит входными данными для задачи CSP.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен генетический алгоритм для решения задачи CSP с целью повышения эффективности процесса складирования непрерывнолитых заготовок. Рассмотренный алгоритм реализует средства борьбы с преждевременной сходимостью при помощи масштабирования целевой функции и параметров оператора отбора. Настоящий алгоритм может быть использован для поиска субоптимального расписания кранов на складе слябов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Парсункин, Б. Н. Программная реализация цифровых адаптивных стабилизирующих локальных контуров управления в централизованных АСУ ТП / Б. Н. Парсункин, С. М. Андреев, А. Р. Бондарева // Автоматизированные технологии и производства. – 2021. – № 1(23). – С. 16-20.:
2. Peng G. и др. Digital Twin-Enabled Production Optimization for Steel Industry // 2022 IEEE 25th International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design, CSCWD 2022. , 2022.
3. Liang Y. и др. Unmanned Cranes Scheduling and System Implementation of a CPS-based Steel Slab Yard // Proceedings of the 2021 IEEE 24th International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design, CSCWD 2021. , 2021.
4. Peng G. и др. Integrated optimization of storage location assignment and crane scheduling in an unmanned slab yard // Comput. Ind. Eng. 2021. Т. 161.
5. Holland J. H. Adaptation in Natural and Artificial Systems. , 2019.

GENETIC ALGORITHM FOR SOLVING THE PROBLEM OF CRANE SCHEDULING IN A WAREHOUSE OF CONTINUOUS CAST BILLETS

I.S. Shchegolikhin, S.M. Andreev

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract. This paper considers the solution of the crane-scheduling problem (CSP) in the continuous cast billet warehouse of a steel mill in order to minimize the number of slab transfers by the cranes of the steel mill. The optimal solution of this problem increases the production efficiency. To solve this problem, the authors propose a modified genetic algorithm, which uses overridden genetic operators corresponding to the problem subject. The proposed genetic algorithm attempts to combat premature convergence, by maintaining population diversity throughout the iterations of the present algorithm.

Keywords: warehousing, optimization, slab, genetic algorithm

REFERENCES

1. Parsunkin, B. N. Software implementation of digital adaptive stabilizing local control loops in the centralized ACS [Programmnyaya realizatsiya tsifrovyykh adaptivnykh stabiliziruyushchikh lokal'nykh konturov upravleniya v tsentralizovannykh ASU TP] / B. N. Parsunkin, S. M. Andreev, A. R. Bondareva // *Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva* [Automated technologies and production]. - 2021. - № 1(23). - p. 16-20.:

2. Peng G. et al. Digital Twin-Enabled Production Optimization for Steel Industry // 2022 IEEE 25th

International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design, CSCWD 2022. , 2022.

3. Liang Y. et al. Unmanned Cranes Scheduling and System Implementation of a CPS-based Steel Slab Yard // Proceedings of the 2021 IEEE 24th International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design, CSCWD 2021. , 2021.

4. Peng G. et al. Integrated optimization of storage location assignment and crane scheduling in an unmanned slab yard // *Comput. Ind. Eng.* 2021. T. 161.

5. Holland J. H. *Adaptation in Natural and Artificial Systems.* , 2019.

Щеголихин И.С. Генетический алгоритм для решения задачи составления расписания кранов на складе непрерывно-литых заготовок / И.С. Щеголихин, С.М. Андреев // *Автоматизированные технологии и производства.* 2023. №2(28). С.10-12.

I.S. Shchegolikhin, S.M. Andreev Genetic Algorithm for Solving the Problem of Crane Scheduling in a Warehouse of Continuous Cast Billets. *Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva* [Automation of technologies and production], 2023, no.2(28), pp.10-12. (In Russian).

АВТОСТАБИЛИЗАЦИЯ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ: ДИНАМИКА

И.П. Попов

Курганский государственный университет, Курган, Россия

e-mail: uralakademia@kurganstalmost.ru

Аннотация. Целью работы является описание динамики стабилизированного ротора. При раскручивании преднапряженного ротора до собственной частоты вращения центробежная сила меньше силы начальной деформации пружины, поэтому радиус не изменяется. Это участок линейной динамики. При дальнейшем нагружении стабилизированного ротора вращающим моментом его динамика (нелинейный участок) описывается системой двух дифференциальных уравнений – вращательного и поступательного (радиального). Установлено, что чем меньше момент и больше масса и начальный радиус, тем меньше отклонение частоты вращения от собственной. Стабилизированный ротор может быть представлен суперпозицией двух ортогональных пружинных маятников. Подобно тому как при вынужденных колебаниях маятника частота не совпадает с собственной частотой, частота вращения стабилизированного ротора при нагружении не совпадает с собственной частотой вращения.

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

Ранее был найден механический аналог циклотронного движения [1], определена схема соответствующего устройства, которое названо стабилизированным ротором, и показана его кинематика [2].

Целью работы является описание динамики этого устройства.

Динамика стабилизированного ротора. При раскручивании преднапряженного ротора до частоты ω_0 центробежная сила $m\omega^2 r$ меньше силы начальной деформации пружины kr_0 , поэтому радиус r_0 не изменяется. Это участок линейной динамики $[0, \omega_0]$.

$$r = r_0, \quad \omega = \frac{M}{mr_0^2} t.$$

За время t_0 при постоянном вращающем моменте M ротор достигнет частоты вращения ω_0 .

$$t_0 = \frac{\omega_0 mr_0^2}{M} = \frac{\sqrt{mk} r_0^2}{M} = \frac{L_0}{M}.$$

При дальнейшем нагружении стабилизированного ротора вращающим моментом его динамика (нелинейный участок) описывается системой двух дифференциальных уравнений – вращательного и поступательного (радиального)

$$\begin{cases} \frac{d\omega}{dt} = \frac{M}{J} = \frac{M}{mr^2} \\ m \frac{d^2 r}{dt^2} = \frac{mv^2}{r} - kr = \frac{m\omega^2 r^2}{r} - kr = (m\omega^2 - k)r \end{cases}.$$

Трение здесь не учитывается.

Начальные условия:

$$\begin{aligned} \omega|_{t=t_0} &= \omega_0, \\ r|_{t=t_0} &= r_0, \end{aligned}$$

$$\left. \frac{dr}{dt} \right|_{t=t_0} = 0.$$

Из системы уравнений и начальных условий следует

$$\left. \frac{d\omega}{dt} \right|_{t=t_0} = \frac{M}{mr_0^2}.$$

$$\frac{d^2 \omega}{dt^2} = -2 \frac{M}{mr^3} \frac{dr}{dt}, \quad \left. \frac{d^2 \omega}{dt^2} \right|_{t=t_0} = 0.$$

$$\frac{d^2 r}{dt^2} = (\omega^2 - \omega_0^2)r, \quad \left. \frac{d^2 r}{dt^2} \right|_{t=t_0} = 0.$$

$$\frac{d^3 r}{dt^3} = 2\omega \frac{d\omega}{dt} r + (\omega^2 - \omega_0^2) \frac{dr}{dt},$$

$$\left. \frac{d^3 r}{dt^3} \right|_{t=t_0} = 2\omega_0 \frac{M}{mr_0^2} r_0 = 2\omega_0 \frac{M}{mr_0}.$$

$$\frac{d^3 \omega}{dt^3} = 6 \frac{M}{mr^4} \left(\frac{dr}{dt} \right)^2 - 2 \frac{M}{mr^3} \frac{d^2 r}{dt^2}, \quad \left. \frac{d^3 \omega}{dt^3} \right|_{t=t_0} = 0.$$

$$\begin{aligned} \frac{d^4 \omega}{dt^4} &= -24 \frac{M}{mr^5} \left(\frac{dr}{dt} \right)^3 + 6 \frac{M}{mr^4} 2 \frac{dr}{dt} \frac{d^2 r}{dt^2} + \\ &+ 6 \frac{M}{mr^4} \frac{dr}{dt} \frac{d^2 r}{dt^2} - 2 \frac{M}{mr^3} \frac{d^3 r}{dt^3}, \end{aligned}$$

$$\left. \frac{d^4 \omega}{dt^4} \right|_{t=t_0} = -2 \frac{M}{mr_0^3} 2\omega_0 \frac{M}{mr_0} = -4\omega_0 \frac{M^2}{m^2 r_0^4}.$$

$$\frac{d^4 r}{dt^4} = 2 \left(\frac{d\omega}{dt} \right)^2 r + 2\omega \frac{d^2 \omega}{dt^2} r + 2\omega \frac{d\omega}{dt} \frac{dr}{dt} +$$

$$+ 2\omega \frac{d\omega}{dt} \frac{dr}{dt} + (\omega^2 - \omega_0^2) \frac{d^2 r}{dt^2}, \quad \left. \frac{d^4 r}{dt^4} \right|_{t=t_0} = 2 \left(\frac{M}{mr_0^2} \right)^2 r = \frac{2M^2}{m^2 r_0^3}.$$

Таким образом, частота вращения стабилизированного ротора и радиус представимы в виде:

$$\begin{aligned} \omega &\approx \frac{1}{0!} \omega(0)t^0 + \frac{1}{1!} \frac{d\omega}{dt}(0)t^1 + \frac{1}{2!} \frac{d^2\omega}{dt^2}(0)t^2 + \\ &+ \frac{1}{3!} \frac{d^3\omega}{dt^3}(0)t^3 + \frac{1}{4!} \frac{d^4\omega}{dt^4}(0)t^4 + \dots = \\ &= \omega_0 + \frac{M}{mr_0^2}t + \frac{1}{2!}0t^2 + \frac{1}{3!}0t^3 - \frac{1}{4!}4\omega_0 \frac{M^2}{m^2r_0^4}t^4 + \dots = \\ &= \omega_0 + \frac{M}{mr_0^2}t - \frac{\omega_0 M^2}{6m^2r_0^4}t^4 + \dots \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} r &\approx \frac{1}{0!} r(0)t^0 + \frac{1}{1!} \frac{dr}{dt}(0)t^1 + \frac{1}{2!} \frac{d^2r}{dt^2}(0)t^2 + \\ &+ \frac{1}{3!} \frac{d^3r}{dt^3}(0)t^3 + \frac{1}{4!} \frac{d^4r}{dt^4}(0)t^4 + \dots = \\ &= r_0 + 0t + \frac{1}{2!}0t^2 + \frac{1}{3!}2\omega_0 \frac{M}{mr_0}t^3 + \frac{1}{4!} \frac{2M^2}{m^2r_0^3}t^4 + \dots = \\ &= r_0 + \frac{\omega_0 M}{3mr_0}t^3 + \frac{M^2}{12m^2r_0^3}t^4 + \dots \end{aligned} \quad (3)$$

Вопрос о сходимости рядов здесь не рассматривается.

Смысл последних двух уравнений состоит в иллюстрации нелинейности динамики стабилизированного ротатора при нагружении его постоянным вращающим (тормозящим) моментом [3].

Из (2) следует, что чем меньше момент M и больше m и r_0 , тем меньше отклонение частоты вращения ω от собственной ω_0 .

Нестационарный режим стабилизированного ротатора. Стабилизированный ротатор может быть представлен суперпозицией двух ортогональных пружинных маятников в соответствии с формулой

$$\mathbf{r}(t) = \mathbf{i}r \cos \varphi(t) + \mathbf{j}r \sin \varphi(t).$$

Это дает возможность использовать хрестоматийные решения для вынужденных колебаний маятника при описании нестационарного режима стабилизированного ротатора, а именно:

$$\begin{aligned} \mathbf{r}(t) = &\mathbf{i} \left[r_0 e^{-\delta t} \cos(\omega_1 t + \varphi_1) + \right. \\ &+ \left. \frac{x_0}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega_1^2)^2 + 4\delta^2 \omega^2}} \cos \left(\omega t - \arctg \frac{2\delta\omega}{\omega_0^2 - \omega_1^2} \right) \right] + \\ &+ \mathbf{j} \left[r_0 e^{-\delta t} \sin(\omega_1 t + \varphi_1) + \right. \\ &+ \left. \frac{x_0}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega_1^2)^2 + 4\delta^2 \omega^2}} \sin \left(\omega t - \arctg \frac{2\delta\omega}{\omega_0^2 - \omega_1^2} \right) \right]. \end{aligned}$$

Здесь r_0 – начальный радиус, $\delta = R/(2m)$ – коэффициент затухания, R – коэффициент сопротивления, $\omega_1^2 = \omega_0^2 - \delta^2 > 0$, φ_1 – начальная фаза, ω – частота вынужденных колебаний, $x_0 = F/(2m)$, F – возмущающая сила.

По мере затухания собственных колебаний стабилизированный ротатор будет вращаться с циклической частотой ω , а его радиус примет значение

$$r = \frac{x_0}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega_1^2)^2 + 4\delta^2 \omega^2}} = \frac{2mF}{R\sqrt{R^2 + 16m^2\omega^2}}.$$

При $\omega_1^2 \leq 0$ происходит аperiодическое затухание.

Второе замечательное свойство стабилизированного ротатора. (Первым является фиксированная собственная частота вращения (1) и ее совпадение с собственной частотой колебаний маятника).

При *вынужденном* вращении стабилизированного ротатора с постоянной частотой

$$\omega = a\omega_0$$

(a – безразмерный коэффициент) его радиальная динамика определяется уравнением

$$\frac{d^2r}{dt^2} = \left(\omega^2 - \frac{k}{m} \right) r = (a^2\omega_0^2 - \omega_0^2)r = -(1-a^2)\omega_0^2 r.$$

В зависимости от значения a возможны три варианта.

1. При $a < 1$ имеет место дифференциальное уравнение свободных гармонических незатухающих колебаний с собственной частотой

$$\omega_a = \omega_0 \sqrt{1-a^2}.$$

Таким образом, стабилизированный ротатор доставляет возможность управлять собственной частотой колебаний радиального осциллятора.

2. При $a = 1$ $\frac{d^2r}{dt^2} = 0$, $\frac{dr}{dt} = V = \text{const}$, $r = r_{01} + Vt$. Колебания не происходят.

3. При $a > 1$ $\frac{d^2r}{dt^2} = (a^2 - 1)\omega_0^2 r$, $r = r_{01} e^{(\omega_0 \sqrt{a^2 - 1})t}$. Колебания не происходят.

Затухание колебаний в стабилизированном ротаторе принципиально не отличается от затухания в обычном маятнике [4].

Выбег ротатора в стабилизированном режиме. Минимальная полная энергия стабилизированного ротатора в стабилизированном режиме соответствует статическому смещению груза r_0 .

$$W_0 = K_0 + U_0 = 2K_0 = 2U_0 = kr_0^2.$$

Максимальная полная энергия теоретически не ограничена, а практически определяется конструктивно установленным максимальным радиусом r_m .

$$W_m = kr_m^2.$$

Пусть средняя за выбег мощность диссипативных потерь равна P .

Тогда время выбега составит

$$\tau = \frac{W_m - W_0}{P} = k \frac{r_m^2 - r_0^2}{P}.$$

Очевидно, что чем меньше P , тем меньше отклонение частоты вращения ω от собственной ω_0 .

Заключение. Представлено описание динамики стабилизированного ротатора.

Подобно тому как при вынужденных колебаниях маятника частота не совпадает с собственной частотой, ча-

стога вращения стабилизированного ротатора при нагружении не совпадает с собственной частотой вращения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Опарина Ю.С., Савилов А.В. Спонтанное циклотронное излучение плотного электронного сгустка // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2018. Т. 82. № 12. С. 1771-1774. DOI: 10.1134/S0367676518120311

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

3. Кочержинская Ю.В., Прохоров И.Е. Современное состояние проблемы моделирования сложных технологических процессов // Автоматизированные технологии и производства. 2009. № 3. С. 25–29.

4. Гладков С.О., Богданова С.Б. Хаотическая динамика взаимодействующих маятников (решение проблемы синхронизации) // Инженерная физика. 2019. № 1. С. 49–61.

AUTOSTABILIZATION OF ANGULAR VELOCITY: DYNAMICS

I.P. Popov

Kurgan State University, Kurgan, Russia

e-mail: uralakademia@kurganstalmost.ru

Abstract. The aim of this work is to describe the dynamics of a stabilized rotator. When unwinding a prestressed rotator to its own frequency of rotation, the centrifugal force is less than the force of the initial deformation of the spring, so the radius does not change. This is a section of linear dynamics. With further loading of the stabilized rotator with a torque, its dynamics (nonlinear section) is described by a system of two differential equations - rotational and translational (radial). It has been established that the smaller the moment and the larger the mass and the initial radius, the smaller the deviation of the rotation frequency from its own. A stabilized rotator can be represented by a superposition of two orthogonal spring pendulums. Just as during forced oscillations of a pendulum, the frequency does not coincide with the natural frequency, the rotation frequency of a stabilized rotator under loading does not coincide with the natural rotation frequency.

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

REFERENCES

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

2. Popov I.P. Auto stabilization of angular velocity: kinematics [Avtostabilizatsiya uglovoy skorosti: kinematika], *Avtomatizirovannye tehnologii i proizvodstva* [Automation of technologies and production], 2023, no. 1, pp. 27–29. (In Russian)

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

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

Попов И.П. Автостабилизация угловой скорости: динамика / И.П. Попов // Автоматизированные технологии и производства. 2023. №2(28). С.13-15.

I.P. Popov Autostabilization of Angular Velocity: Dynamics. *Avtomatizirovannye tehnologii i proizvodstva* [Automation of technologies and production], 2023, no.2(28), pp.13-15. (In Russian).

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО ОБЪЕМА ВЫБОРКИ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧИ РЕГРЕССИИ ТЕМПЕРАТУРНОГО СОСТОЯНИЯ ЗОНЫ НАГРЕВАТЕЛЬНОЙ ПЕЧИ.

Д.В. Нужин, С.М. Андреев

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

Аннотация: Произведен корреляционный анализ зависимости температуры греющей среды в зоне проходной печи от объема топлива, поданного в текущую и соседние зоны печи. При анализе учтен фактор текущего темпа передвижения заготовок. Исходные данные перед корреляционным анализом были обработаны на предмет удаления критических значений «выбросов» коробчатой диаграммой. В работе проанализированы веса влияния факторных членов на результирующий с помощью шкалы Чеддока. Корреляционные коэффициенты проверены на статистическую значимость с помощью критерия Стьюдента. Факторы, не прошедшие проверку на статистическую значимость, были удалены из уравнения регрессии. Коэффициенты уравнения регрессии были рассчитаны методом наименьших квадратов. Произведено исследование влияния размера выборки на значение среднеквадратической ошибки MSE для прогнозного диапазона. Результат анализа показал, что оптимальным объемом выборки для расчета коэффициентов уравнения регрессии является значение 1000 минут. Данное значение обеспечивает минимальное время адаптации уравнения регрессии при минимальной среднеквадратической ошибке (MSE) между опытной и расчетной траекторией на прогнозном интервале. При увеличении объема выборки величина MSE остается неизменной.

Ключевые слова: Нагревательная печь, статистические данные, влияние зон, регрессионный анализ, воспроизводимость статистическая значимость данных, коэффициенты регрессионного уравнения, коэффициент Стьюдента, регрессионная модель, объем выборки, среднеквадратическая ошибка, коробчатая диаграмма.

ВВЕДЕНИЕ

В технологической цепочке по получению проката в металлургическом производстве нагревательные печи являются основным и в то же время одним из основных из энергоемких звеньев. Доля топливных затрат металлургических печей составляет 60% от всего прокатного передела [1].

Применение систем управления нагревом заготовок в печах является основным мероприятием по снижению топливных затрат без капитальных конструктивных модернизаций. Внедрение систем автоматизации позволяет сократить затраты до 15% [2].

Одним из современных направлений набирающим популярность в области внедрения систем управления в печах является использование статистических моделей для исследования и расчета оптимальных режимов в печи.

В статье [3] было предложена разработка функциональной модели межконтурных взаимодействий печи нагрева и получена регрессионная модель на основе статистической зависимости расхода газа от среднего времени нахождения заготовок в печи.

Автор работы [4] предложил способ совершенствования тепловой работы нагревательных печей с шагающими балками при помощи статистической модели. Разработанное регрессионное уравнение описывает влияние температуры газов, поступающих в зону на нагрев в печи.

Решения задачи по выбору расстановки КИП в печи описано в работе [5]. Используя разработанный статистический полином, описывающий зависимость значения давления в зоне печи от объема, поданного топлива поз-

волил определить оптимальное расположение датчиков «давления» для улучшения оперативной обратной связи в системе управления газодинамическим режимом в печи.

В работе [6] статистическая модель используется в качестве обратной связи для процесса обучения нейросети ведущий процесс нагрева заготовок по оптимальной топливосберегающей траектории нагрева.

В работе [7] приведен сравнительный анализ моделей прогнозирования производительности доменной печи с использованием методов машинного обучения: линейной регрессии, случайного леса и градиентного бустинга. Полученные модели могут служить вспомогательными инструментами для принятия решений на технико-экономическом уровне управления доменным производством, так как они позволяют оценивать влияние различных факторов на производительность доменной печи и выбирать оптимальные режимы работы.

В качестве альтернативного подхода для моделирования давления в печи автор [8] предлагает рассмотреть аппарат регрессионного анализа и построить зависимость обобщенной линейной регрессии на основе технологических данных. В качестве независимых переменных анализа выступает: суммарный расход газа (F) (по всем зонам печи) и положение шибера (U). Целевой переменной выступает давление (P). Коэффициент детерминации для данной модели равен 0,81.

В описанных работах независимо от параметров используемых в качестве факторных и результативных признаков зависимость описывается линейным регрессионным уравнением следующего вида [9]:

$$Y = b_0 + b_1 \cdot X_1 + b_2 \cdot X_2 + \dots + b_n \cdot X_n \quad (1)$$

где Y - исследуемая величина; $b_0, b_1, b_2 \dots b_n$ - постоянные коэффициенты; $X_0, X_1, X_2 \dots X_n$ - независимые значения.

Основным условием для корректного применения систем с использованием статистической модели является постоянная адаптация коэффициентов регрессионного уравнения (1) к реальному объекту.

Одним из факторов, влияющих на значения коэффициентов математических моделей является объем выборки анализируемых экспериментальных данных. С одной стороны недостаточный объем выборки не обеспечивает точной количественной меры взаимосвязи проверяемых факторов, с другой стороны избыточный объем данных увеличивает период актуализации коэффициентов регрессии и учете в расчете коэффициентов «устаревшими» параметрами печи, что может повлечь за собой увеличение ошибки между экспериментальной и расчетной траекторией результирующего фактора для прогнозного диапазона.

Для анализа влияния объема выборки на расчет коэффициентов регрессионного уравнения в статье будет решена двух последовательных задач:

1) Полный корреляционный и регрессионный анализ влияния расхода топлива, поданного в зоны печи и темпа движения заготовок на температуру пятой зоны методической печи.

2) Для полученного регрессионного уравнения будет произведен анализ зависимости отклонения рассчитанной и экспериментальной траектории анализируемого параметра для прогнозного диапазона от объема выборки. В качестве критерия оценки отклонения принимаем среднеквадратичную ошибку MSE.

КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ АНАЛИЗ ТЕМПЕРАТУРЫ ГРЕЮЩЕЙ В ПРОХОДНОЙ ПЕЧИ

Основной целью проведения корреляционного анализа исследуемого объекта является определение причинных факторов относительно результативного, анализ их взаимосвязи и нахождение коэффициентов уравнения регрессии.

На основе анализа особенности работы методической печи [10] принимаем в качестве причинных факторов, влияющих на температуру в зоне следующие параметры:

- 1) Объем топлива, поданный в текущую зону;
- 2) Объем топлива, поданный в соседние зоны от исследуемой, расположенные со стороны выхода печи;
- 3) Текущий темп прохождения заготовок

В качестве исходных данных принимались экспериментальные измеренные показания о текущей температуре и подачи топлива в зонах печи. Темп прохождения заготовок, рассчитывается путем слежения за изменениям координат заготовок во времени [11].

Перед использованием данных для регрессионного анализа была произведена процедура удаления показаний, отличающиеся от нормального распределения исходных данных. Удаление «выбросов» производилось с помощью коробчатой диаграммы см. рис.1.

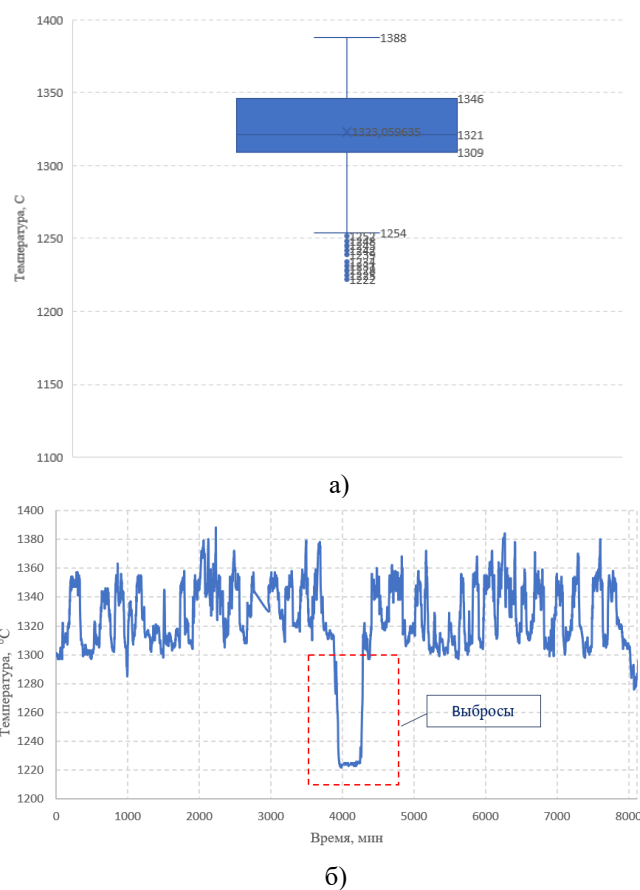


Рис.1 Отображение «выбросов»: а – коробчатая диаграмма, б – график изменения температуры в зоне с указанием выбросов

Для определения тесноты связи между причинными и результативным факторами найдем парные и частные коэффициенты.

Парные коэффициенты рассчитываем по формуле:

$$r_{xy} = \frac{\overline{xy} - \bar{x} \cdot \bar{y}}{G_x \cdot G_y} \quad (2)$$

где \overline{xy} – среднееарифметическое значение из произведений x и y , \bar{x} – среднееарифметическое значения факторных переменных, \bar{y} – среднееарифметическое значения исследуемой переменной, G_x - среднеквадратическое отклонение признака x , G_y - среднеквадратическое отклонение признака y .

Частный коэффициент корреляции в отличие от парного характеризует взаимосвязь между двумя выбранными переменным без учета влияния остальных показателей, т.е. при фиксированных значениях и показывает «чистую» связь между этими параметрами. Частный коэффициент находится по формуле:

$$r_{ij} = -\frac{R_{ij}}{\sqrt{R_{ii} \cdot R_{jj}}}; \quad R_{ij} = (-1)^{i+j} \cdot M_{ij} \quad (3)$$

где R_{ij} – алгебраическое дополнение элемента r_{ij} , M_{ij} – минор – определитель матрицы, полученный из матрицы путем вычеркивания i – ой строки и j – ого столбца.

Расчетные значения парных и частных коэффициентов для пятой зоны методической печи приведены в табл. 1:

Таблица 1 – Расчетные значения парных и частных коэффициентов корреляции

	V10	V9	V8	V7	V5	Speed
Парные T5	0,013	0,039	0,529	0,304	0,782	-0,277
Частные T5	-0,014	0,050	0,343	0,130	0,689	-0,150

Для анализа расчетных значений необходимо проверить полученные коэффициенты на статистическую значимость [12]. Для этого для каждого коэффициента были выдвинуты гипотеза, что коэффициенты равны 0 $H_0: r_{ij} = 0$. В качестве конкурирующей гипотезы принимаем, что коэффициенты не равны 0 $H_1: r_{ij} \neq 0$. Для проверки гипотезы на уровне значимости 0,05 используем статистический t - критерий (критерий Стьюдента), для которого наблюдаемое значение рассчитывается по формуле:

$$t_{набл} = \frac{r}{\sqrt{1-r^2}} \cdot \sqrt{n-2} \quad (4)$$

где r – значение проверяемого коэффициента, n – количество опытов.

Наблюдаемые значения коэффициентов, рассчитанные по формуле (4), сравниваются с критическим значением коэффициента Стьюдента $t_{кр}$. Допустимые критические значения критерия Стьюдента при числе степеней свободы $\nu = n - m - 1$ где n – число опытов, m – количество факторов и уровне значимости, в нашем случае 0,05 принимаем из таблицы [13]. При выполнении условия $|t_{набл}| \geq t_{кр}$ отвергается гипотеза H_0 в пользу $H_1: r_{ij} \neq 0$, соответственно коэффициент является значимым.

Расчетные наблюдаемые t - значения для коэффициентов приведены в табл. 2. выделены «*» значения не прошедших проверку по критерию Стьюдента.

Таблица 2 – Расчетные t -значения парных и частных коэффициентов корреляции

	V10	V9	V8	V7	V5	Speed
Парные T5	-0,291*	-0,3*	13,917	7,120	28,033	6,422
Частные T5	-0,34*	-0,55*	5,601	2,230	21,201	1,976

Оценка тесноты связи расчетных коэффициентов, прошедших статистическую оценку, выполнялась с помощью таблицы Чедокка [14] приведенной на рис. 2.

Количественная мера тесноты связи	Качественная характеристика силы связи
0,1 - 0,3	Слабая
0,3 - 0,5	Умеренная
0,5 - 0,7	Заметная
0,7 - 0,9	Высокая
0,9 - 0,99	Весьма высокая

Рис.2 Шкала Чеддока для качественной оценки для показателей тесноты связи

По полученным результатам, представленным в таблицах 1 и 2 перед получением уравнения регрессии (1) можно сделать следующие выводы:

- 1) Факторы, учитывающие влияние подачи топлива V9 и V10 на температуру пятой зоны T5 будут исключены из дальнейшего анализа, ввиду непрохождения проверки на статическую значимость;
- 2) Объем топлива V5, V7, V8 и темп движения заготовок в печи оказывают влияние на изменение температуры в пятой зоне печи T5;
- 3) Значимые корреляционные зависимости, полученные на этапе расчета парных коэффициентов, подтвердились и при вычислениях частных коэффициентов.

РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТОВ РЕГРЕССИОННОГО УРАВНЕНИЯ

Следующим этапом после определение величины влияния факторов на исследуемую переменную является нахождение регрессионного уравнения, описывающего исследуемый процесс.

После удаления статистически незначимых факторных переменных коэффициенты $b_0 \dots b_4$ регрессионного уравнения $Y = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + b_4 \cdot x_4$, где $x_1 = V_7$, $x_2 = V_8$, $x_3 = V_5$, $x_4 = v$, находятся методом наименьших квадратов [15] путем составления решения системы уравнения:

$$\begin{cases} nb_0 + b_1 \sum x_{1i} + b_2 \sum x_{2i} + b_3 \sum x_{3i} + b_4 \sum x_{4i} = \sum y_i \\ b_0 \sum x_{1i} + b_1 \sum x_{1i}^2 + b_2 \sum x_{1i}x_{2i} + b_3 \sum x_{1i}x_{3i} + b_4 \sum x_{1i}x_{4i} = \sum y_i x_{1i} \\ b_0 \sum x_{2i} + b_1 \sum x_{1i}x_{2i} + b_2 \sum x_{2i}^2 + b_3 \sum x_{2i}x_{3i} + b_4 \sum x_{2i}x_{4i} = \sum y_i x_{2i} \\ b_0 \sum x_{3i} + b_1 \sum x_{1i}x_{3i} + b_2 \sum x_{2i}x_{3i} + b_3 \sum x_{3i}^2 + b_4 \sum x_{3i}x_{4i} = \sum y_i x_{3i} \\ b_0 \sum x_{4i} + b_1 \sum x_{1i}x_{4i} + b_2 \sum x_{2i}x_{4i} + b_3 \sum x_{3i}x_{4i} + b_4 \sum x_{4i}^2 = \sum y_i x_{4i} \end{cases} \quad (5)$$

где n – количество опытов, i – номер опыта; y_i – значение исследуемой величины при i – ом опыте, x_i – значение факторной величины при i – ом опыте, b_0, b_1, b_2, b_3, b_4 – постоянные коэффициенты.

Система линейных уравнения (5) решается с помощью метода Крамера [16].

После нахождения коэффициентов $b_0 \dots b_4$ для диапазона 2000 минут уравнение регрессии примет следующий вид $Y = 1291,6 + 0,0068 \cdot x_1 + 0,0145 \cdot x_2 + 0,0193 \cdot x_3 - 4,92505 \cdot x_4$.

Для проверки статистической значимости полученных значений используем аппарат статистических гипотез по аналогии процедуры проверки коэффициентов корреляции.

Для проверки гипотезы на уровне значимости 0,05 используем статистический t - критерий (критерий Стьюдента), для которого наблюдаемое значение рассчитывается по формуле:

$$t_{набл} = \frac{b_i}{\mu_i} \quad (6)$$

$$\mu_i = \frac{s_y \sqrt{1-R^2}}{s_{xi} \sqrt{1-r_{1x2}^2}} \cdot \frac{1}{\sqrt{n-m-1}}$$

где b_i – значение проверяемого коэффициента, μ_i – стандартная ошибка,

Для учета меры влияния одновременно нескольких переменных на исследуемый параметр служит коэффициент детерминации, рассчитанный по выражению:

$$R^2 = \frac{\sum(\hat{y}_x - \bar{y})^2}{\sum(y - \bar{y})^2} \quad (7)$$

где $(\hat{y}_x - \bar{y})^2$ – сумма квадратов отклонений, обусловленная регрессией; $(y - \bar{y})^2$ – общая сумма квадратов отклонений. Рассчитанное значение для диапазона 2000 минут равно $R^2 = 0,71$.

Расчетные значения коэффициентов уравнения регрессии и наблюдаемые t -значения для пятой зоны методической печи приведены в таблице 3:

Таблица 3 – Расчетные значения коэффициентов уравнения регрессии и наблюдаемые t -значения

Параметр	V9	V8	V7	V5	Speed
Значение коэффициентов регрессии	1291,662	0,007	0,014	0,019	-4,925
Значение наблюдаемого T-значения Стьюдента	1232,948	14,252	9,002	19,406	2,030

Для уровня значимости $\alpha = 0,05$ и количества степеней свободы $\nu = n - m - 1$ где n – число опытов, m – количество факторов принимаем критическое значение распределения T – Стьюдента $t_{кр}$ из таблицы [13]. Значение $t_{кр}$ (0,05; 1995) равно 1,96.

Рассчитанные значения в таблице 3 больше критического. Гипотеза H_0 отвергается в пользу H_1 : $r_{ij} \neq 0$, соответственно коэффициенты регрессионного уравнения являются статически значимыми.

Итоговым этапом регрессионного анализа является проверка статистической значимости уравнения регрессии с помощью критерия Фишера. Расчетное значение определяем по формуле:

$$F_{расч} = \frac{R}{1 - R^2} \cdot \frac{n - m - 1}{m} \quad (8)$$

где R – коэффициент множественной регрессии, R^2 – коэффициент детерминации, n – количество опытов, m – количество факторов.

Выдвигаем гипотезу, в которой коэффициент R равен 0 H_0 : $R = 0$. В качестве конкурирующей гипотезы принимаем, что коэффициент R не равен 0 H_1 : $R \neq 0$.

Расчетный коэффициент $F_{расч}$ сравниваем с табличным [13]. Если $F_{табл} < F_{расч}$, то гипотеза H_0 отклоняется и признается статистическая значимость коэффициента детерминации и уравнения регрессии с целым. В противном случае найденное уравнение является статически незначимым, и мы не можем его использовать в качестве математической модели, описывающей исследуемый параметр.

В таблице 4 приведены расчетные значения, подтверждающие статистическую значимость регрессионного уравнения исследуемой закономерности:

Таблица 4 – Переменные расчета коэффициента детерминации и проверки на статистическую значимость

Наименование параметра	Обозначение	Значение
Объем выборки n	N	2000
Количество оцен. парам. M	M	4
Уровень значимости		0,05
Степ. свободы $k = n - m - 1$	$K = N - M - 1$	1995
Коэффициент детерминации R	R	0,71
Расчетное значение F -критерия	$F_{расч}$	3175,988
Критическое значение F -критерия	$F_{табл}$	2,997016

Из таблицы 4 видно, что в рамках построенной модели видно 71% показаний объясняются факторными членами V5, V7, V8 и темпа движения заготовки ν используемые в регрессионном уравнении. Оставшиеся 19% объясняются прочими факторами, не входящими в модель. Уравнение регрессии является статистически значимым и может быть использовано при решении задач в системах управления нагревом в печах.

НАХОЖДЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО ОБЪЕМА ВЫБОРКИ

Одной из основных задач, решаемых применением уравнения регрессии системе управления нагревом заготовок в нагревательной печи, является прогнозирование изменения температуры в зоне печи при изменении входных факторных параметров, в нашем случае расхода топлива в текущую, смежные зоны и текущий темп движения заготовок.

При регрессионном анализе для разных диапазонов и объемов выборок исследуемых данных было выявлено, что объем выборки оказывает значительное влияние на значение коэффициенты детерминации и уравнения регрессии. На рис.2 приведен разброс коэффициента детерминации на промежутке с диапазоном 2000 мин с шагом 50 минут.

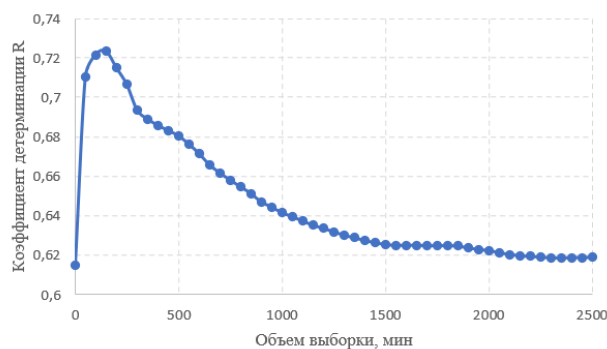


Рис.2 График распределения коэффициента детерминации от объема выборки в диапазоне 50 – 2000 мин.

Анализируя график распределения (рис.2), вторая задача данной статьи будет сформулирована в следующем виде: при каком объеме выборке экспериментальных данных расчетные коэффициенты регрессии позволяют спрогнозировать траекторию изменения исследуемого параметра с минимальными отклонениями.

Для решения данной задачи был произведен ряд опытов по схеме представленной на рис. 3 в соответствии с которой производились расчет коэффициентов уравнения регрессии с объемом начиная от 50 минут и закачивая 2000 минутами.

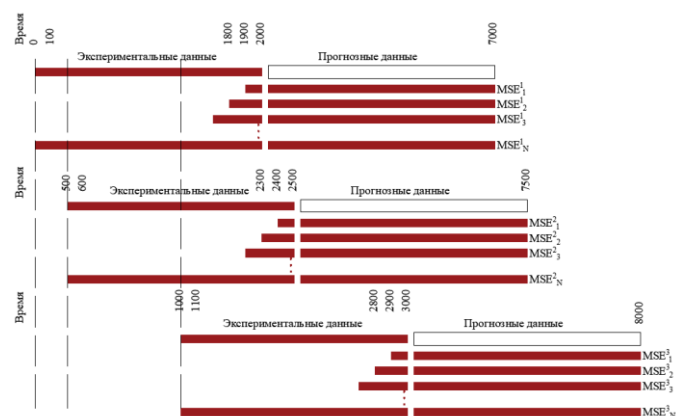


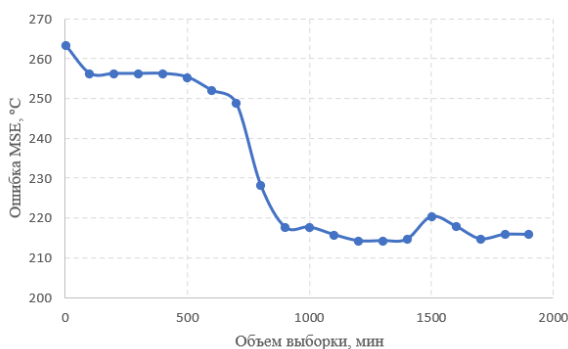
Рис.3 Схема организации выборки

Далее для прогнозируемого «тестируемого» диапазона равного 5000 минут с найденными коэффициентами рассчитывалась среднеквадратичная ошибка (MSE) между расчетными и экспериментальными траекториями:

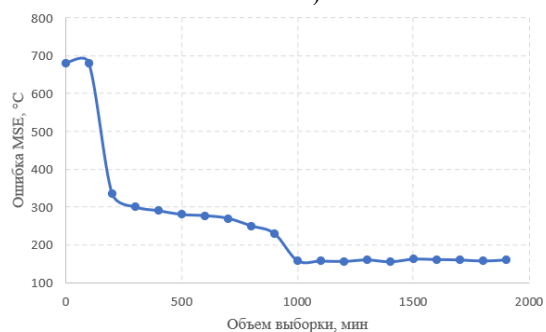
$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (9)$$

где y_i – экспериментальные данные; \hat{y}_i – расчетные данные; n – количество сравниваемых точек траектории.

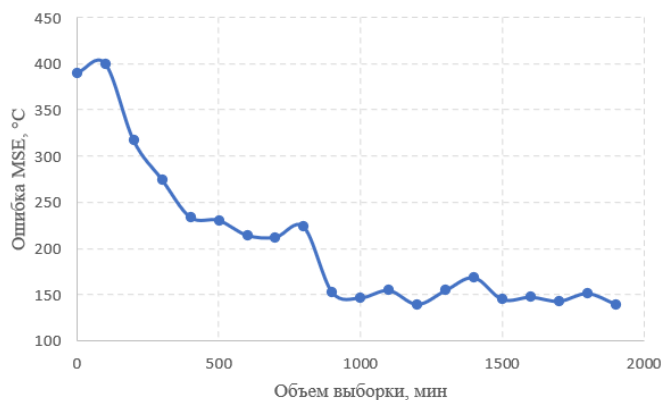
На рис. 4 приведена зависимость среднеквадратичной ошибки от объема выборки для 3 разных диапазонов в соответствии с рис.3.



а)



б)



в)

Рис.4 Зависимость среднеквадратичной ошибки от объема выборки для диапазонов: а) 1-2000 мин.; б) 500-2500 мин.; в) 1000 – 3000 мин.

Результаты опытов показали, что минимальное среднеквадратичное отклонение между рассчитанными и экспериментальными траекториями на прогнозируемом промежутке достигается при объеме выборки более 1000 минут.

ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1) Основным условием статистических моделей является постоянная адаптация коэффициентов уравнения регрессии к реальному объекту.

2) После полного корреляционного статистического анализа зависимости температуры греющей среды в зоне печи с входными параметрами было выявлено, что факторы, учитывающие влияние подачи топлива V_9 и V_{10} на температуру пятой зоны T_5 не влияют и были исключены из дальнейшего анализа, ввиду непрохождения проверки на статическую значимость.

3) Объем выборки оказывает значительное влияние на коэффициенты уравнения регрессии, а соответственно и на отклонения расчетной траектории от опытной на прогнозируемом промежутке.

4) Наиболее оптимальный объем выборки для обеспечения с одной стороны точной количественной меры взаимосвязи проверяемых факторов, с другой стороны минимальный период пересчета коэффициентов регрессии и использование актуального состояния параметров печи для температуры в пятой зоне составляет 1000 мин.

5) Процедуру нахождения оптимального объема выборки необходимо использовать для любых статистических моделей в процессе пересчета коэффициентов регрессионного уравнения в процессе адаптации к реальному объекту.

ЛИТЕРАТУРА

1. В.А. Скляр Инновационные и ресурсосберегающие технологии в металлургии. Донецк.: ДонНТУ, 2014. – стр. 224.
2. Шипко А.А. Топливосбережение при нагреве металла в печах машиностроительных предприятий // Литье и металлургия. – 2010 – № 54 – С. 53–58.

3. Фомин А.В. Математическая модель зависимости расхода газа в зонах печи от производительности прокатного стана // *Металлург.* – 2023 – № 2 – С.111–116.

4. Богатова М.Ж., Чибизова С.И. Статистическое моделирование температурных режимов нагревательных печей листовых станов горячей прокатки // *Известия вузов. Черная металлургия.* 2021. – № 5(64) – С.374–381.

5. Парсункин Б.Н., Самарина И.Г. Система автоматического энергосберегающего управления на основе математической модели газодинамического режима нагревательной методической печи // *Промышленная электроника, автоматика и системы управления.* 2017. – №2(35) – С.55–60.

6. Andreev S.M., Nuzhin D. V. Mathematical Model of Temperature Distribution over the Length of the Furnace Taking into Account the Mutual Influence of its Zones // *Proc. - 2023 Int. Russ. Autom. Conf. RusAutoCon 2023.* – С. 1115–1120.

7. Барбасова Т.А. Применение методов машинного обучения для прогнозирования производительности доменной печи // *Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами.* 2023. – № 9 – С.48–51.

8. Фомин А.В., Жуков П.И. Применение регрессионного анализа в задаче построения математической модели давления в пространстве нагревательной печи // *Современные проблемы горно-металлургического комплекса. Наука и производство материалы восемнадцатой Всероссийской научно-практической конференции с между-*

народным участием (Том I), 17 декабря 2021г. Старый Оскол: Старый Оскол – 2022 – С.635–642.

9. Л.З. Румшицкий Математическая обработка результатов эксперимента. Главная редакция физико-математической литературы изд-ва “Наука,” 1971. –стр. 194.

10. Андреев С.М., Нужин Д.В., Бондарева А.Р. Прогнозирующая модель распределения температуры по длине нагревательной печи с учетом взаимовлияния зон // *Промышленная электроника, автоматика и системы управления.* 2023 – № 60(3) – С.52–60.

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

12. В.С. Королюк Справочник по теории вероятностей и математической статистике. Москва: М.:Наука., 1985. –стр. 640.

13. Р.А. Фишер Статистические методы для исследования Москва, Госстатиздат, 1958. –стр. 266.

14. Т.М. Сизова Статистика: учебное пособие. Санкт Петербург: СПАб.: СПб НИУ ИТМО, 2013. –стр. 176.

15. Ю.В. Линник Метод наименьших квадратов и основы теории обработки наблюдений. Москва: Государственное издательство Физико-математической литературы, 1958. –стр. 336.

16. Н.В. Гредасова Линейная Алгебра (Учебное Пособие). Мин-во науки и высш. образования РФ .- Изд-во Урал. ун-та, 2019. –стр. 88.

CHOOSING THE OPTIMAL SAMPLE SIZE WHEN SOLVING THE PROBLEM OF REGRESSION OF THE TEMPERATURE STATE OF THE HEATING FURNACE ZONE

D.V. Nuzhin, S.M. Andreev

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Nuzhin83@mail.ru

Abstract: A correlation analysis of the dependence of the temperature of the heating medium in the zone of the through furnace on the volume of fuel supplied to the current and neighboring zones of the furnace was performed. The analysis takes into account the factor of the current rate of movement of workpieces. The initial data before the relational analysis were processed for the suppression of critical values of "outliers" by a box diagram. In the work, the weights of the influence of factor terms on the resulting one are analyzed using the Cheddock scale. The correlation coefficients were tested for statistical significance using the Student's criterion. Factors that did not pass the statistical significance test were removed from the regression equation. The coefficients of the regression equation were calculated by the method of named squares. The influence of the sample size on the value of the mean square error MSE for the forecast range has been studied. The result of the analysis showed that the most optimal sample size for calculating the coefficients of the regression equation is the value of 1000 minutes. This value provides the minimum time to adapt the regression equation with the minimum standard error (MSE) between the experimental and calculated trajectory in the forecast interval. With an increase in the sample size, the MSE value remains unchanged.

Keywords: Heating furnace, statistical data, influence of zones, regression analysis, reproducibility, statistical significance of data, coefficients of the regression equation, Student coefficient, regression model, sample size, standard error, box diagram.

REFERENCES

1. Sklyar V.A. *Innovacionnye i resursosberegayushchie tekhnologii v metallurgii* [Innovative and resource-saving technologies in metallurgy] Donetsk.: DonNTU, 2014. –224p.

2. Shipko A.A. Fuel saving when heating metal in furnaces of machine-building enterprises [Toplivoberezhenie pri

nagreve metalla v pechah mashi-nostroitel'nyh predpriyatij] / *Lit'e i metallurgiya* Casting and metallurgy - 2010 – No. 54 – pp. 53-58.

3. Fomin A.V. Mathematical model of the dependence of gas consumption in the furnace zones on the productivity of the rolling mill [Matematicheskaya model' zavisimosti

raskhoda gaza v zonah pechi ot proizvoditel'nosti prokatnogo stana] / *Metallurg Metallurg.* – 2023 – No. 2 – pp.111–116.

4. Bogatova M.Zh., Chibisova S.I. Statistical modeling of temperature regimes of heating furnaces of hot rolling sheet mills [Statisticheskoe modelirovanie temperaturnyh rezhimov nagrevatel'nyh pechej listovyh stanov goryachej prokatki] / *Izvestiya vuzov. Chernaya Metallurgiya Izvestiya vuzov. Black Metallurgy.* 2021. – No. 5(64) – pp.374-381.

5. Parsunkin B.N., Samarina I.G. Automatic energy-saving control system based on a mathematical model of the gas-dynamic mode of a heating methodical furnace [Sistema avtomaticheskogo energosberegayushchego upravleniya na osnove matematicheskoy modeli gazodinamicheskogo rezhima nagrevatel'noj metodicheskoy pechi] / *Promyshlennaya elektronika, avtomatika i sistemy upravleniya Industrial electronics, automation and control systems.* 2017. – No.2(35) – pp.55-60.

6. Andreev S.M., Nuzhin D. V. Mathematical Model of Temperature Distribution over the Length of the Furnace Taking into Account the Mutual Influence of its Zones // Proc. - 2023 Int. Russ. Autom. Conf. RusAutoCon 2023. – pp. 1115–1120.

7. Barbasova T.A. Application of machine learning methods for predicting the performance of a blast furnace [Primenenie metodov mashinnogo obucheniya dlya prognozirovaniya proizvoditel'nosti domennoj pechi] / *Avtomatizatsiya i upravlenie tekhnologicheskimi processami i proizvodstvami Automation and control of technological processes and productions.* 2023. – No. 9 – pp.48-51.

8. Fomin A.V., Zhukov P.I. Application of regression analysis in the task of constructing a mathematical model of pressure in the space of a heating furnace [Primenenie regressionnogo analiza v zadache postroeniya matematicheskoy modeli davleniya v prostranstve nagrevatel'noj pechi] / *Sovremennye problemy gorno-metallurgicheskogo kompleksa. Nauka i proizvodstvo materialy vosemnadcatoj Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem (Tom I), 17 dekabrya 2021g. Staryj Oskol: Staryj Oskol Modern problems of mining and metallurgical complex. Science and Production materials of the eighteenth All-Russian Scientific and Practical Conference with international participation (Volume I), December 17, 2021. Stary Oskol: Stary Oskol – 2022 – pp.635-642.*

9. Rumshiskij L.Z. *Matematicheskaya obrabotka rezul'tatov eksperimenta.* [Mathematical processing of the experimental results.] The main editorial board of the physical and mathematical literature of the publishing house “Nauka,” 1971. –194 p.

10. Andreev S.M., Nuzhin D.V., Bondareva A.R. Predictive model of temperature distribution along the length of a heating furnace, taking into account the mutual influence of zones [Prognoziruuyushchaya model' raspredeleniya temperatury po dline nagrevatel'noj pechi s uchetom vzaimovliyaniya zon] / *Promyshlennaya elektronika, avtomatika i sistemy upravleniya Industrial electronics, automation and control systems.* 2023 – No. 60(3) – pp.52-60.

11. Nuzhin D.V., Andreev S.M. Investigation of the influence of neighboring zones on the temperature of the heating medium of the fifth zone of the methodical furnace of the rolling mill [Issledovanie vliyaniye sosednih zon na temperaturu greyushchej sredy pyatoy zony metodicheskoy pechi prokatnogo stana] / *Avtomatizatsiya tekhnologii i proizvodstva Automation of technology and production.* 2023. – No. 1(27) – pp.3-10.

12. Koroluk V.S. *Spravochnik po teorii veroyatnostej i matematicheskoy statistike* [Handbook of Probability Theory and Mathematical Statistics] Moscow, M.:Nauka, 1985.–640 p.

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

14. Sizova T.M. *Statistika: uchebnoe posobie* [Statistics: a textbook.] Sankt Peterburg: SPAB.: SPb NIU ITMO, 2013. – 176p.

15. Linnik Yu.V. *Metod naimen'shikh kvadratov i osnovy teorii obrabotki nablyudenij* [The least squares method and the fundamentals of the theory of observation processing] Moscow: State Publishing House of Physical and Mathematical Literature, 1958. –336p.

16. Gredasova N.V. *Linejnaya Algebra (Uchebnoe Posobie)* [Linear Algebra (Textbook).] The Ministry of Science and Higher Education. education of the Russian Federation .- Publishing house of the Urals. un-ta, 2019. –88p.

Нужин Д.В. Выбор оптимального объема выборки при решении задачи регрессии температурного состояния зоны нагревательной печи / Д.В. Нужин, С.М. Андреев // *Автоматизированные технологии и производства.* 2023. №2(28). С.16-22.

D.V. Nuzhin, S.M. Andreev Choosing the Optimal Sample Size When Solving the Problem of Regression of the Temperature State of the Heating Furnace Zone. / D.V. Nuzhin, S.M. Andreev // *Avtomatizirovannye tekhnologii i proizvodstva* [Automated technologies and production], 2023. no.2(28), pp.16-22. (In Russian).

УДК: 62-83.681.325.2

ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВЕННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА МОДЕЛИ КОНТУРА АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ С ПОМОЩЬЮ АЛГОРИТМА ПОЛНОГО ПЕРЕБОРА НАСТРОЕК ПИ-РЕГУЛЯТОРА

А.С. Прасолов, С.М. Андреев, М.И. Краснов, Р.Ш. Якупов

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

aspr.88@yandex.ru

Аннотация. Для регулирования технологических параметров в системах АСУ ТП чаще всего используется ПИ-регулятор. Для настроек ПИ-регуляторов используется множество методик, однако большинство из них определяют конкретные настройки при заданных параметрах системы. В действительности, параметры настройки ПИ-регулятора, при заданных параметрах качества переходного процесса, представляют собой область значений. Кроме того, на качественные показатели переходного процесса влияют нелинейные элементы входящие в контур регулирования, такие как пусковые устройства и концевые выключатели, ограничивающие диапазон поворота вала исполнительного механизма постоянной скорости. В статье приведены исследования работы алгоритма полного перебора настроек ПИ-регулятора для контура автоматического регулирования с механизмом постоянной скоростью. В результате определено влияние параметров контура управления на изменение области оптимальных настроек, что используется для дальнейшей разработки методики настроек ПИ-регуляторов на основе полученных номограмм настроечных параметров.

Ключевые слова: ПИ-регулятор, автоматическое регулирование, исполнительный механизм постоянной скорости, переходный процесс.

ВВЕДЕНИЕ

Современные аппаратно-программные комплексы имеют в своем составе блоки автонастройки ПИ-регуляторов, однако в процессе эксплуатации статические и динамические параметры объекта управления могут непредсказуемым образом изменяться. Это приводит к необходимости постоянной перенастройки регуляторов. Разработка методики настройки ПИ-регулятора по текущим параметрам объекта управления позволит уменьшить время для ввода в эксплуатацию объектов автоматического управления, как для новых систем управления, так и после ремонтов.

Проблеме определения оптимальных настроек ПИ-регуляторов посвящено множество исследований.

В статье [1] рассматривается метод оптимизации настроек ПИ-регулятора использующий алгоритм на основе градиента, в котором компоненты градиента рассчитываются с использованием функций чувствительности. Ввиду того, что используемый регулятор содержит переключаемые параметры и рассматривается объект с запаздыванием, то использование аналитических подходов к параметрической оптимизации системы крайне сложно.

Это приводит к необходимости обращаться к алгоритмическим методам.

В работе [2] рассмотрена методика синтеза нечеткого ПИ-регулятора. Были изложены основные теоретические и практические принципы расчета нечеткого регулятора на основе ПИ-регулятора.

В статье [3] сравниваются алгоритмы оптимизации Пауэлла, Полака–Рибьера и Флетчера–Ривса, а также алгоритм динамической оптимизации методом Монте-Карло. В качестве определения эффективности переходного процесса выбрана целевая функция. При проведении эксперимента показано, что при изменении параметров системы алгоритмы Полака–Рибьера, Флетчера–Ривса и динамической оптимизации начинают работать хуже. Система с ПИ-регулятором, оптимизированном по Пауэлла, работает хорошо при изменении параметров объекта, однако она имеет большее время переходного процесса. Лучшие параметры показывает система на основе робастного управления [4].

В работе [5], представлена комбинированная методика энергосберегающей настройки ПИ- и ПИД-регуляторов. Объекты управления описываются передаточными функциями апериодического звена или апериодического звена с запаздыванием, которые часто используются для описания динамики электротермических аппаратов. На первом

этапе решается задача энергосберегающего управления объектом без запаздывания, определяющая параметры ПИ-регулятора, на втором - полученное решение обобщается на объекты с запаздыванием, что позволяет получить методику настройки параметров ПИД-регулятора.

В статье [6] рассматривается возможность использования геометрической прогрессии для подбора настроек нечетких логических регуляторов. Полученные результаты позволяют утверждать, что применение геометрической прогрессии для определения параметров нечетких регуляторов является простым и эффективным способом получения их настроек удовлетворительного качества.

В исследовании [7] предложена процедура автоматического поиска оптимальных по критерию максимальной степени устойчивости настроек регуляторов и соответствующих им структур, определяемых крайними правыми корнями соответствующих характеристических полиномов при ПИ- и ПИД-законах управления, исходя из полученных ранее структур оптимальных в указанном смысле решений. Показана возможность решения рассматриваемой задачи в различных случаях до предельных структур

Авторы статьи [8] исследовали оптимальные по степени устойчивости решения при ПИ-управлении динамическими системами, характеризующимися передаточными функциями с полиномом нулевой степени в числителе. Показано, что существует семь случаев достижения в системах управления максимальной степени устойчивости. Для каждого из этих случаев сформулированы достаточные условия оптимальности. Построены годографы замкнутых систем управления, для которых выполняются либо только необходимые условия оптимальности, либо достаточные. Вид построенных годографов оптимальных систем наглядно отражает геометрический смысл полученных решений.

ОПИСАНИЕ СТРУКТУРЫ ПРОМЫШЛЕННОГО КОНТУРА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПАРАМЕТРОМ

Контур системы автоматического регулирования технологического параметра представляет собой комплекс взаимосвязанных технических и программных средств. Кроме основных элементов, определяющих работу контура регулирования, контур содержит также и дополнительные элементы, обеспечивающие формирование аварийных блокировок, повышающих устойчивость процесса регулирования, изменение работы контура и т. д. Для настройки и исследования работы промышленного контура необходимо учитывать работу всех элементов, входящих в его состав.

Один из вариантов структуры промышленного контура автоматического регулирования технологического параметра с исполнительными механизмами постоянной скорости содержат следующие элементы:

1. элемент сравнения, обеспечивающий формирование ошибки регулирования контура;
2. регулятор, формирующий управляющее воздействие в соответствии с заданным законом регулирования и ограничителем на интегрирующее звено для ПИ-законов управления;

3. пусковое устройство с релейной статической характеристикой;

4. исполнительный механизм постоянной скорости, реализующий управляющее воздействие;

5. концевые выключатели, ограничивающие работу исполнительного механизма при достижении крайних состояний (минимального и максимального угла поворота вала);

6. объект автоматического регулирования;

7. датчик регулируемой величины, формирующий сигнал пропорциональный регулируемой величине для контура автоматического регулирования.

Общий вид структурной схемы промышленного контура регулирования представлен на рис. 1.

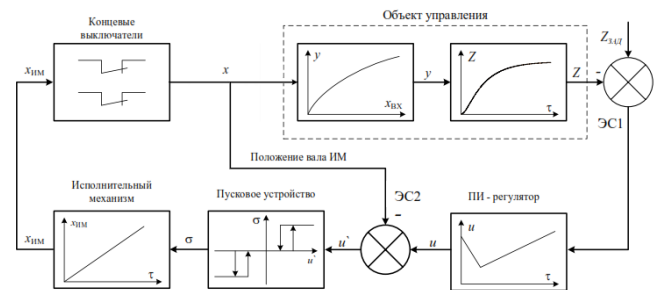


Рис. 1. Структурная схема промышленного контура автоматического регулирования технологическим параметром

Элемент сравнения 1 (ЭС1) обеспечивает формирование ошибки контура регулирования.

$$\varepsilon = Z_{\text{зад}} - Z \quad (1)$$

где ε - ошибка контура регулирования, $Z_{\text{зад}}$ - задание на регулятор, Z - обратная связь от объекта управления.

Для численных моделей формирование ошибки контура регулирования производится как разность между текущей величиной задания и выходным сигналом с датчика, полученным в предыдущий момент времени.

Регулятор с ограничением интегральной части (ПИ-регулятор). Для обеспечения устойчивости переходных процессов на максимальную и минимальную величину выхода интегрирующего звена необходимо накладывать ограничения I_{MAX} и I_{MIN} . В этом случае математическая модель ПИ-закона регулирования с ограничениями на величину интегральной части запишется так:

$$u(\tau) = K_p \left(\varepsilon + \frac{1}{T_{\text{из}}} I \right), \quad (2)$$

$$I = \int_0^\tau \varepsilon d\tau, \quad (3)$$

$$F = \begin{cases} I_{\text{MIN}}, & I \leq I_{\text{MIN}} \\ I, & I_{\text{MIN}} \leq I \leq I_{\text{MAX}} \\ I_{\text{MAX}}, & I \geq I_{\text{MAX}} \end{cases} \quad (4)$$

где K_p - коэффициент пропорциональной части; $T_{\text{из}}$ - время интегрирования; I - величина выхода интегрирующего звена; I_{MAX} и I_{MIN} - ограничения выхода интегрирующего звена.

Элемент сравнения 2 (ЭС2) используется для формирования величины ошибки внутреннего позиционного регулятора, который в свою очередь используется для управления исполнительным механизмом постоянной скорости:

$$u' = u - x_{\text{нм}}, \quad (5)$$

где u – управляющее воздействие от регулятора; $x_{ИМ}$ – выходное значение положения вала исполнительного механизма.

Пусковое устройство представляет собой трехпозиционный элемент, формирующий дискретный сигнал для управления исполнительным механизмом постоянной скорости:

$$\sigma = \begin{cases} +100, u' > a \\ 0, -a < u' < a \\ -100, u' < -a \end{cases} \quad (6)$$

где a – порог срабатывания пускового устройства.

Исполнительный механизм (ИМ) постоянной скорости представляет собой интегрирующее звено с передаточной функцией:

$$W(p) = \frac{K_{ИМ}}{p}, \quad (7)$$

где $K_{ИМ}$ – коэффициент, характеризующий скорость исполнительного механизма, %/с.

Управление исполнительным механизмом осуществляется сигналом с пускового устройства, принимающим значения $\sigma = (-100; 0; 100)$. Работа исполнительного механизма осуществляется в диапазоне, заданным конечными выключателями. При достижении конечных выключателей интегрирование прекращается.

$$x(\tau) = \begin{cases} x_{ИМ}^{MIN}, x_{ИМ}^{MIN} \geq x_{ИМ} \\ K_{ИМ} \int_0^{\tau} \sigma dt, x_{ИМ}^{MIN} \leq x_{ИМ} \leq x_{ИМ}^{MAX} \\ x_{ИМ}^{MAX}, x_{ИМ}^{MAX} \leq x_{ИМ} \end{cases} \quad (8)$$

где $x_{ИМ}^{MIN}, x_{ИМ}^{MAX}$ – диапазон, заданный конечными выключателями [9].

Объект управления представлен собственной статической характеристикой и динамическими параметрами. В качестве статической характеристики использовано регрессионная зависимость выходного сигнала объекта управления от входного сигнала в установившемся режиме:

$$y = 0.02x^2 - 0.076x + 0.989 \quad (9)$$

Динамические свойства объекта управления описываются последовательным соединением двух инерционных звеньев 1-ого порядка [10].

$$Z_1(\tau) = \frac{1}{T_1} ((y - Z_1(t-1)) + Z_1(t-1)), \quad (10)$$

$$Z_2(\tau) = \frac{1}{T_2} ((Z_1 - Z_2(t-1)) + Z_2(t-1)), \quad (11)$$

где T_1, T_2 – постоянные времени, соответственно 1 и 2 инерционного звена.

В качестве показателей качества выбраны значения перерегулирования σ и общее время регулирования T_p , то есть время когда переходный процесс не выходит за пределы $\pm 2\%$ от задания.

Переходный процесс представлен на рис.1.

ОПИСАНИЕ АЛГОРИТМА ПОЛНОГО ПЕРЕБОРА ПАРАМЕТРОВ ПИ-РЕГУЛЯТОРА

Моделирование контура производилось с помощью алгоритма полного перебора.

Алгоритм использует следующие начальные настройки:

- n – количество итераций П-части;
- m – количество итераций И-части;
- i – номер текущей итерации П-части;

- j – номер текущей итерации И-части;
- SP – это текущее значение П-части;
- ST – текущее значение И-части;
- Ps – величина шага П-части;
- Ts – величина шага И-части;
- Qp – значение перерегулирования;
- Tr – значение общего времени регулирования.

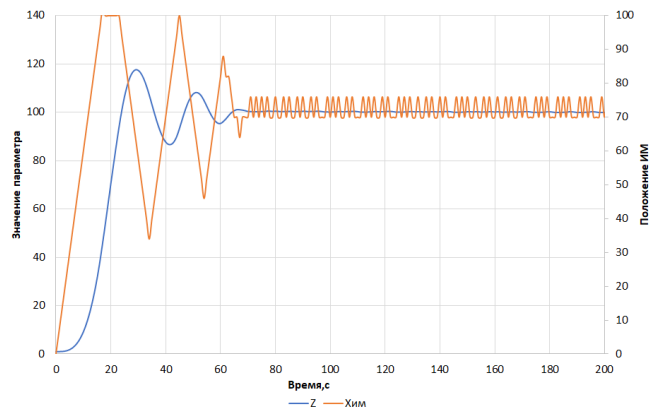


Рис.2. Переходный процесс в контуре автоматического регулирования с ИМ постоянной скорости

Алгоритм формирует две матрицы значений показателей качества для дальнейшего анализа.

Алгоритм состоит из следующих шагов:

- 1) Вводятся начальные значения n, m, Ps, Ts , а также присваивается $SP=0, i=0, j=0$.
- 2) Сравнивается номер текущей итерации П-части с количеством итераций П-части.
- 3) $i=i+1, j=0, ST=0, SP=SP+Ps$.
- 4) Сравнивается номер текущей итерации И-части с количеством итераций И-части.
- 5) $ST=ST+Ts$.
- 6) Выполняется моделирование работы контура автоматического регулирования при выбранных настройках регулятора с получением переходного процесса.
- 7) Вычисляются и сохраняются показатели качества переходного процесса.

В общем виде алгоритм представлен на рис. 3.

Результатом работы алгоритма является плоскость с показателями качества для заданного диапазона настроек ПИ- регулятора.

Моделирование производилось при следующих условиях:

- 35 итераций П-части;
- 40 итераций И-части;
- величина шага П-части 0,1;
- величина шага И-части 2;
- постоянная времени $T_1=5$;
- постоянная времени $T_2=12$;
- постоянная времени $T_2=12$;
- скорость исполнительного механизма $K_{ИМ}=5$.

В результате получено 2 матрицы показателей качества переходного процесса при заданных настройках ПИ-регулятора

На рис. 4 изображена матрица показателя качества с-перерегулирование. Светло-зелёным градиентом обозначается лучшие показатели качества $\sigma \rightarrow 4,2\%$.

Как видно из рисунков градиенты показателей качества перерегулирование и быстродействия пересекаются только в области $K_p \in [0,4; 0,9]$, $T_n \in [6; 20]$.

Для изучения влияния $K_{им}$ на показатели качества переходных процессов было проведено исследования и получены номограммы при различных $K_{им}$ (рис.6).

На рис. 5 изображена матрица показателя качества общее время регулирования T_p . Светло-зелёным градиентом обозначается лучшие показатель качества $T_p \rightarrow \text{MIN}$.

Как видно из рис. 6 при увеличении $K_{им}$ область настроек смещается на увеличение K_p , что совпадает с теоретическими значениями

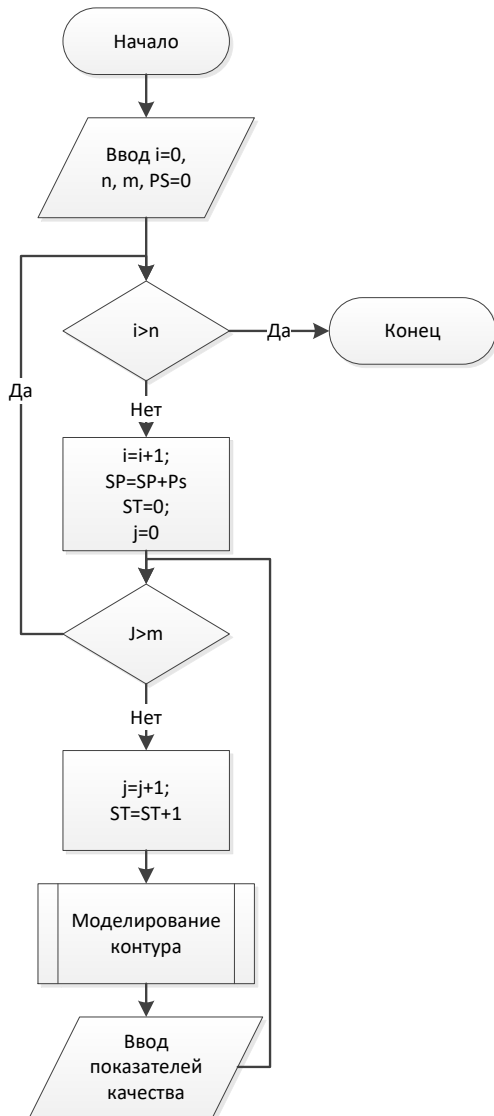


Рис.3. Блок-схема алгоритма полного перебора

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Несмотря на появление многих интеллектуальных систем управления, классические ПИ-регуляторы остаются надежным средством для регулирования в несложных контурах. В настоящее время на производстве все чаще появляются исполнительные механизмы с регулируемой скоростью, при этом встает актуальным вопрос настроек регуляторов для контуров, поэтому дальнейшее исследо-

вание в области получения оптимальных настроек ПИ-регуляторов остаются актуальными и сегодня.

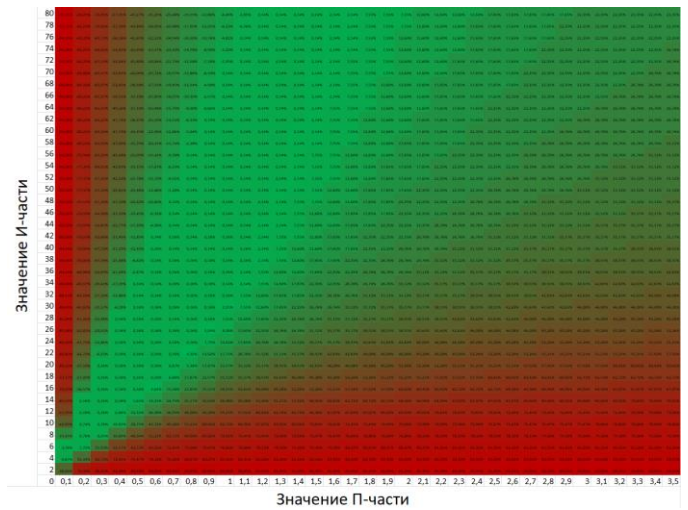


Рис.4. Матрица показателя качества – перерегулирование

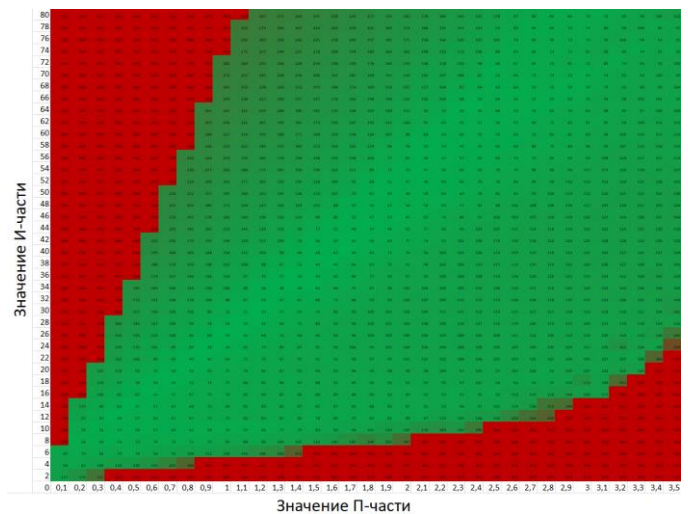


Рис.5. Матрица показателя качества – общее время регулирования

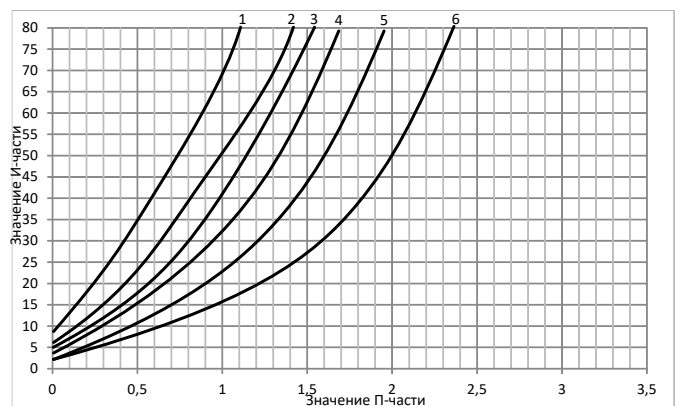


Рис.6. Номограмма настроек Пи-регулятора при различных $K_{им}$

Результатом данного исследования является алгоритм для полного перебора всех настроек ПИ-регулятора и дальнейший вывод показателей качества в виде удобного

графического поля, что позволяет ускорить ввод в эксплуатацию локальных контуров управления.

В дальнейшем предполагается исследование с помощью данного алгоритма динамических параметров контуров управления, с целью получения номограмм для различных систем управления и разработки методики настройки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kulikov, V. V. The Gradient-Based Algorithm for Parametric Optimization of a Variable Structure PI Controller with Dead Band / V. V. Kulikov, A. P. Kutsyi, N. N. Kutsyi // *Mechatronics, Automation, Control*. – 2020. – Vol. 21, No. 9. – P. 530-534. – DOI 10.17587/mau.21.530-534. – EDN ZQIIWL.

2. Андриевская, Н. В. Методика проектирования нечеткого регулятора на базе ПИ-регулятора в среде MATLAB / Н. В. Андриевская, О. А. Билоус, С. В. Семенов // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления*. – 2012. – № 6. – С. 282-287. – EDN PWNZBX.

3. Ядрышников, О. Д. Синтез ПИ(Д)-регулятора для управления линейным инерционным объектом с параметрической неопределенностью в векторе состояний / О. Д. Ядрышников, А. Н. Загорин, В. А. Жмудь // *Сборник научных трудов Новосибирского государственного технического университета*. – 2010. – № 4(62). – С. 65-72. – EDN WJJFSB.

4. Бороздин, П. А. Робастное управление линейным инерционным объектом / П. А. Бороздин, В. В. Сыроковкин, А. Л. Фокин // *Известия Российской академии наук. Теория и системы управления*. – 2008. – № 4. – С. 41-49. – EDN JJKLX.

5. Кретов, Е. И. Методика энергосберегающей настройки параметров стандартных ПИ- и ПИД-регуляторов для электротермических объектов / Е. И. Кретов, С. А. Климов, В. И. Ловчаков // *Промышленная энергетика*. – 2017. – № 1. – С. 19-24. – EDN XXYNID.

6. Копотева, А. В. Использование геометрической прогрессии для определения параметров функций принадлежности при настройке нечеткого регулятора ПИ-типа / А. В. Копотева // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника*. – 2020. – Т. 20, № 3. – С. 18-28. – DOI 10.14529/ctcr200302. – EDN ELHNS.

7. Автоматический поиск оптимальных по степени устойчивости настроек ПИ- и ПИД-регуляторов / Н. М. Бобриков, И. К. Денисов, С. И. Кузнецов, А. М. Шубладзе // *Проблемы управления*. – 2009. – № 2. – С. 8-13. – EDN KHQWSL.

8. Шубладзе А. М., Попадько В. Е., Кузнецов С. И., Якушева А. А. Исследование оптимальных по степени устойчивости решений при пропорционально-интегральном управлении // *Проблемы управления*. 2008. №2.

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

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

RESEARCH OF QUALITATIVE PARAMETERS OF AUTOMATIC CONTROL LOOP MODEL'S TRANSIENT PROCESS WITH THE ALGORITHM OF PI CONTROLLER'S COMPLETE SETTINGS ENUMERATION

A.S. Prasolov, S.M. Andreev, M.I. Krasnov, R.Sh. Yakupov

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract. A PI controller is often used to control process parameters in automated process control systems. A great number of methods are used for PI controller settings, but most of them define specific settings at preset system parameters. In fact, the parameters of PI controller settings represent a range of values at preset parameters of the transition process quality. The article describes an algorithm for complete enumeration of PI controller settings for a constant speed automatic control loop. The aim of the research is the study of the control loop parameter's influence on the optimal settings region's change for further development of the PI controller adjustment methodology based on nomograms.

Keywords: PI controller, automatic control, constant speed executive mechanism.

REFERENCES

1. Kulikov, V. V. The Gradient-Based Algorithm for Parametric Optimization of a Variable Structure PI Controller with Dead Band / V. V. Kulikov, A. P. Kutsyi, N. N. Kutsyi // *Mechatronics, Automation, Control*. – 2020. – Vol. 21, No. 9. – P. 530-534. – DOI 10.17587/mau.21.530-534. – EDN ZQIIWL.

2. Andrievskaya, N. V. Design methodology of the fuzzy regulator based on the PI-regulator in MATLAB / N. V. Andrievskaya, O. A. Bilous, S. V. Semenov // *Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Electrical engineering, information technologies, control systems*. – 2012. – № 6. – P. 282-287. – EDN PWNZBX.

3. Yadrishnikov, O. D. Synthesis of the PI(D)-regulator for controlling the linear inertial object with parametric uncer-

tainty in the state vector / O. D. Yadrishnikov, A. N. Zavorin, V. A. Zhmud // Collection of scientific papers of Novosibirsk State Technical University. - 2010. - № 4(62). - P. 65-72. - EDN WJJFSB.

4. Borozdin, P. A. Robust control of the linear inertial object / P. A. Borozdin, V. V. Syrokvashin, A. L. Fokin // Russian Science Academy News. Theory and control systems. - 2008. - № 4. - P. 41-49. - EDN JJRKLX.

5. Kretoev, E. I. Methodology of energy-saving parameter adjustment of standard PI and PID controllers for electrothermal objects / E. I. Kretoev, S. A. Klimov, V. I. Lovchakov // Industrial Energy. - 2017. - № 1. - P. 19-24. - EDN XXYNID.

6. Kopoteva, A. V. The use of geometric progression for determining the parameters of the affiliation functions during the adjustment of the fuzzy regulator of PI-type / A. V. Kopoteva // Bulletin of South Ural State University. Series: Computer technologies, management, radio electronics. -

2020. - T. 20, № 3. - P. 18-28. - DOI 10.14529/ctcr200302. - EDN ELHHHS.

7. Automatic search of the optimal settings of PI- and PID-regulators by stability degree / N. M. Bobrikov, I. K. Denisov, S. I. Kuznetsov, A. M. Shubladze // Control Problems. - 2009. - № 2. - P. 8-13. - EDN KHQWLS.

8. Shubladze A. M., Popadko V. E., Kuznetsov S. I. I., Yakusheva A. A. Research of the optimal solutions on a degree of stability at the proportional-integral control // Problems of management. 2008. №2.

9. Andreev, C.M. Development and modelling of the uncomplicated automation systems accounting for the specifics of technological processes / S.M. Andreev, B.N. Parsunkin.- M.: Academia Publishing Centre. - 2016. - 272 p.

10. Determination of the dynamic parameters of the object in the automatic control loop with the constant speed actuator / T. G. Sukhonosova, M. A. Buzmakov, V. V. Chernov, D. D. Filatov // Automated of technologies and productions. - 2023. - № 1(27). - P. 18-22. - EDN ZQXHIM.

Прасолов А.С. Исследование качественных показателей переходного процесса модели контура автоматического регулирования с помощью алгоритма полного перебора настроек ПИ - регулятора / А.С. Прасолов, С.М. Андреев, М.И. Краснов, Р.Ш. Якупов // Автоматизированные технологии и производства. 2023. №2(28). С.23-28.

A.S. Prasolov, S.M. Andreev, M.I. Krasnov, R.Sh. Yakupov Research of Qualitative Parameters of Automatic Control Loop Model's Transient Process with the Algorithm of PI Controller's Complete Settings Enumeration. Avtomatizirovannye tehnologii i proizvodstva [Automation of technologies and production], 2023, no.2(28), pp.23-28. (In Russian).

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОСТОЯННОЙ ВРЕМЕНИ ИНЕРЦИОННОГО ОБЪЕКТА ПЕРВОГО ПОРЯДКА ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ КРИВОЙ РАЗГОНА

Т.Г. Сухоносова, Д.Д. Филатов, С.А. Емельянов, Н.А. Антипанов

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

tgobuhova@gmail.com

Аннотация. В работе рассмотрены методы определения постоянной времени инерционного объекта первого порядка по экспериментальной кривой разгона. В том числе рассмотрена методика определения постоянной времени объекта по неполным экспериментальным данным, для случая, когда начало переходного процесса не было зафиксировано или было зафиксировано неточно. Приведены результаты экспериментов с малоинерционными датчиками температуры. Предложенная в работе методика даёт незначительную погрешность для объектов, модель которых можно описать инерционным звеном первого порядка с запаздыванием и без запаздывания.

Ключевые слова: постоянная времени, инерционное звено, переходная характеристика, кривая разгона.

ВВЕДЕНИЕ

Точное определение динамических свойств объекта управления является важнейшей задачей теории автоматического управления [1-3]. На практике широко применяются методы определения динамических параметров объекта по кривой разгона, то есть по реакции объекта на однократное скачкообразное входное воздействие [4-6].

Для определения точных значений постоянной времени объекта требуется снять несколько кривых разгона и желательно в различных условиях работы объекта. Но если объектом управления является непрерывный технологический процесс, то активное проведение экспериментов затруднительно или иногда невозможно. Поэтому существует задача как можно более точного определения параметров объекта недостаточным экспериментальным данным. На точность определения параметров объекта влияют технологические возмущения и случайные погрешности, связанные с точностью средств измерений, а также с субъективной погрешностью оператора [7-9].

Одним из базовых звеньев, которое входит в состав большинства моделей технологических объектов, является инерционное звено первого порядка. Рассмотрим методику определения динамического параметра инерционного звена в теории и на практике.

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОСТОЯННОЙ ВРЕМЕНИ ИНЕРЦИОННОГО ЗВЕНА ПЕРВОГО ПОРЯДКА

Дифференциальное уравнение инерционного звена первого порядка имеет вид [1]:

$$T \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = kx(t), \quad (1)$$

где T – постоянная времени, характеризующая инерционность звена, k – коэффициент передачи, характеризующий свойства звена в статическом режиме, t – время, $x(t)$ – входной сигнал, $y(t)$ – выходной сигнал звена.

Переходная функция инерционного звена $h(t)$ находится как частное решение дифференциального уравнения (1) и при $y(0) = 0$ имеет вид

$$h(t) = k \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right), \quad (2)$$

Весовую характеристику инерционного звена $w(t)$ получим путем дифференцирования переходной функции (2), это скорость изменения выходного сигнала звена $h(t)$ во времени:

$$w(t) = h'(t) = \frac{k}{T} e^{-\frac{t}{T}}, \quad (3)$$

Самый простой способ определения постоянной времени T инерционного звена является вычисление времени, за которое выходной сигнал изменяется на 63,2 % от установившегося значения k , рис. 1 [1, 2]. Если подставить в уравнение (2) время T , получим

$$h(T) = k \left(1 - e^{-\frac{T}{T}} \right) = k \left(1 - e^{-1} \right) \approx 0,632k \quad (4)$$

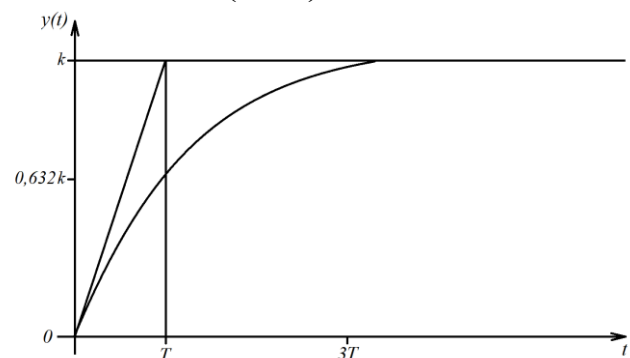


Рис. 1. Определение постоянной времени T по переходной функции

Второй распространенный способ определения постоянной времени инерционного звена – это графический метод, при котором проводится касательная к графику

переходной функции $h(t)$ в начальный момент времени $t = 0$. Точка пересечения данной касательной с линией нового установившегося значения $y(t)=k$ отсекает на горизонтальной оси отрезок, равный постоянной времени T , см. рис. 1.

Для точного определения постоянной T по обеим методикам необходимо знать начальное и конечное установившееся значение выходного сигнала по кривой разгона. Для графического метода необходимо точно зафиксировать изменение выходного сигнала в начале переходного процесса.

В ходе эксперимента на реальном физическом объекте не всегда удастся с точностью зафиксировать значения выходного сигнала объекта на начальном участке переходного процесса, особенно при ручной записи результатов измерения выходного сигнала объекта по показывающему прибору. Поэтому в данной работе подробно рассмотрена известная [2] методика определения постоянной времени по касательной, проведенной к функции $h(t)$ в произвольной точке P , рис. 2. Главное условие, начиная с времени t_p (абсцисса точки P) фиксировать выходной сигнал объекта через равные промежутки времени до момента окончания переходного процесса. Время окончания переходного процесса для инерционного звена составляет $3T-4T$, т.к. по формуле (1) $h(3T) = 0,95k$ и $h(4T) = 0,98k$ и переходный процесс можно считать завершенным с точностью 5 и 2 % соответственно.

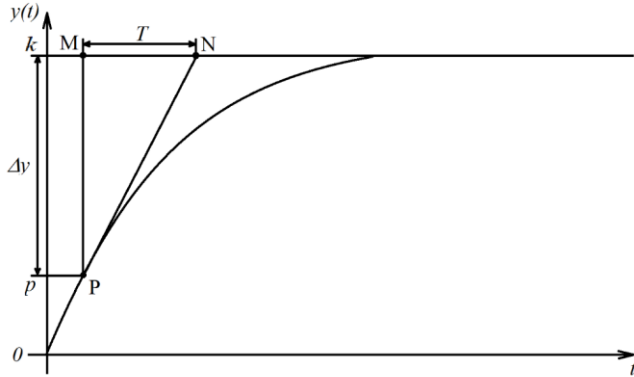


Рис. 2. Определение постоянной времени T в произвольной точке P

Действительно, касательную не обязательно проводить в начале переходной характеристики, это может быть произвольно выбранная точка P . Докажем, что отрезок MN на графике рис. 2 равен постоянной времени. Для этого определим тангенс угла наклона касательной к оси времени:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{PM}{MN}$$

откуда подставляя значения из формул (2) и (3) получим что отрезок MN равен

$$MN = \frac{PM}{\operatorname{tg} \alpha} = \frac{k - h(t_p)}{w(t_p)} = \frac{k - k \left(1 - e^{-\frac{t_p}{T}}\right)}{\frac{k}{T} e^{-\frac{t_p}{T}}} = \frac{k - k + k e^{-\frac{t_p}{T}}}{\frac{k}{T} e^{-\frac{t_p}{T}}} = T$$

Теоретически, определить постоянную времени по методике на рис. 2 можно для любой произвольной точки P на переходной характеристике. Но на практике при $t > 2,5T$ скорость изменения выходного сигнала настолько низкая, что на результат определения скорости изменения выходного сигнала, а значит и постоянной T будет оказывать

существенное влияние погрешность измерения. Также следует учитывать факт отличия поведения реального объекта от идеальной модели (1).

Для повышения точности определения постоянной времени и исключения случайных погрешностей при измерении выходной величины объекта предлагается многократное вычисление постоянной времени T_i на промежутке $(t_p; t_k)$ с шагом $\Delta t_i = t_i - t_{i-1}$, где $t_k > t_p$:

$$T_i = \frac{\Delta y(t_i)}{v(t_i)} = \frac{\Delta t_i (k - y(t_i))}{y(t_i) - y(t_{i-1})} \quad (5)$$

где $v(t_i)$ – скорость изменения выходной величины на интервале времени Δt_i , $\Delta y(t_i)$ – изменение выходной величины, определено на рис. 2.

А затем вычисляется среднее значение постоянной T_{CP} на интервале $(t_p; t_k)$

$$T_{CP} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_i, \quad (6)$$

где n – количество экспериментальных точек.

Предлагается выбирать интервал $(t_p; t_k)$ в примерном диапазоне от $0,5T$ до $2-2,5T$.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОСТОЯННОЙ ВРЕМЕНИ ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ДАННЫМ

Для подтверждения применимости предлагаемой методики была проведена серия опытов для малоинерционных датчиков температуры. Представим результаты одного из опытов с термопарой. Кривую разгона термодатчика получали при резком изменении температуры измеряемой среды с 82°C до 0°C . Результаты измерений температуры во времени $y(t_i)$ в моменты времени t_i представлены на рис. 3. Время, за которое выходной сигнал изменяется до значения $k - 0,632k = 82 - 51,8 = 30,2^\circ\text{C}$ составляет 32 с. Примем это значение за действительную постоянную времени датчика $T_d = 32$ с.

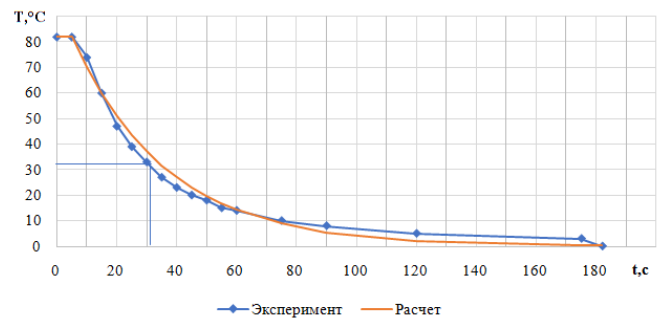


Рис. 3. Экспериментальная кривая разгона $y(t_i)$ и расчетная характеристика $h(t)$ по формуле (7)

По экспериментальной кривой разгона была рассчитана скорость изменения температуры датчика $v(t_i)$, рис. 4. На графиках рис. 3 и 4 представлены также расчетные значения температуры $h(t)$ и скорости изменения температуры $w(t)$ соответственно. Так как эксперимент проводился при уменьшении выходного сигнала датчика, то расчетная переходная характеристика была определена по (2) при $y(0) = 82^\circ\text{C}$ и $k = -82^\circ\text{C}$ с учетом последовательного введения звена чистого запаздывания с постоянной $\tau_3 = 5$ с:

$$h(t) = 82 - 82 \left(1 - e^{-\frac{t-1}{T_{CP}}}\right), \quad (7)$$

а скорость изменения выходного сигнала как весовая

функция (3):

$$w(t) = \frac{82}{T_{CP}} e^{-\frac{t-5}{T_{CP}}}, \quad (8)$$

где $T_{CP} = 31,6$ с – усредненное значение постоянной времени которое было рассчитано по формулам (5)–(6) на интервале времени от $0,5T_d$ до $2,5T_d$.

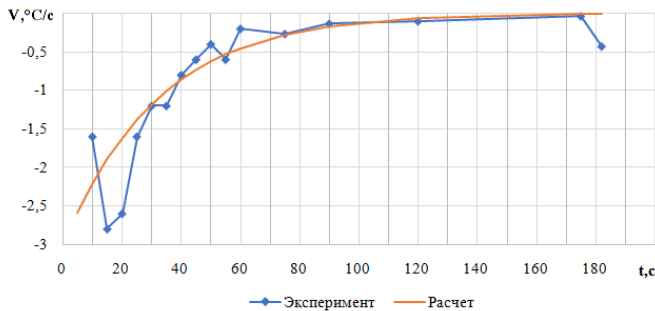


Рис. 4. Экспериментальная $v(t_i)$ и расчетная $w(t)$ по формуле (8) скорость изменения температуры

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Совпадение экспериментальных и расчетных данных на рис. 3 и 4 доказывает верность определения вида математической модели исследуемого объекта и его динамических параметров. На рис. 5 представлены одиночные T_i и интегральные T_{CP} результаты вычисления постоянной времени по формулам (5) и (6):

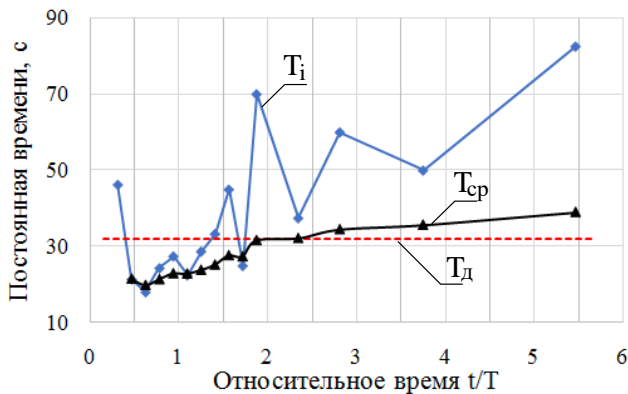


Рис. 5. Расчетные значения постоянной времени датчика по формулам (5) и (6)

Одиночные результаты расчета T_i на интервале времени от $0,5T_d$ до $1,5T_d$ дают точность от 10 до 43%, что не может являться удовлетворительным результатом. Усредненное значение постоянной времени T_{CP} постепенно увеличивается, а на интервале времени $1,8T-2,6T$ дает результат совпадающий с действительным значением постоянной времени T_d с относительной погрешностью не более 1,3 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методика многократного вычисления постоянной времени с усреднением результатов на интервале времени от $0,5T$ до $2-2,5T$ дает хорошую точность. Рассмотренная в статье методика подходит только для объектов, модель

которых может быть представлена одним инерционным звеном или последовательным соединением инерционного звена и звена запаздывания.

Предложенный алгоритм легко запрограммировать, что позволит по экспериментальным данным без затрат времени точно вычислять динамические параметры объекта даже при отсутствии экспериментальных данных на начальном участке кривой разгона. Полученная модель объекта может быть использована при расчете настроек автоматического регулятора для синтеза эффективной системы управления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ким Д.П. Теория автоматического управления: учебник и практикум для вузов. – Москва: Издательство Юрайт, 2020. – 276 с.
2. Певзнер, Л. Д. Теория систем управления : учебное пособие / Л. Д. Певзнер. – Санкт-Петербург : Лань, 2022. – 424 с.
3. Сухонослова Т.Г. Определение динамических параметров объекта в контуре автоматического регулирования с исполнительным механизмом постоянной скорости / А.Т.Г. Сухонослова, М.А. Бузмаков, В.В. Чернов, Д.Д. Филатов // Автоматизированные технологии и производства. 2023. – №1(27). – С.18-22.
4. Андреев С.М. Разработка и моделирование несложных систем автоматизации с учетом специфики технологических процессов / С.М. Андреев, Б.Н. Парсункин. – М.: Издательский центр «Академия». – 2016. – 272 с.
5. Захаренко, В. А. Исследование постоянной времени пирометра ПД-10 / В. А. Захаренко, Я. Р. Веприкова, Д. В. Кузнецов // Россия молодая: передовые технологии – в промышленность. – 2019. – № 1. – С. 133-136.
6. Попов, С. А. Идентификация постоянной времени якорной цепи двигателя постоянного тока / С. А. Попов, В. И. Кривченков // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2020. – № 33. – С. 115-128.
7. Сухонослова Т.Г. Идентификация динамических свойств параметра давления в рабочем пространстве методической печи / Т.Г. Сухонослова, А.Р. Яруллин, В.С. Новак // Теория и технология металлургического производства. – 2023. – № 1(44). – С. 39-44.
8. Мокрушин С.А. Инженерные методы идентификации статических объектов управления с целью их дальнейшей автоматизации / С.А. Мокрушин, А.В. Журавлёв, С.В. Кротов, В.П. Теплых // Наука и образование в XXI веке: сб. научн. тр. по материалам междунар. науч.-практ. конференции в 8 частях. ООО «АР-Консалт», 2014. – С. 55-57.
9. Сафаров, И. М. Автоматизация расчета передаточных функций АСУ методом некасающихся контуров / И. М. Сафаров, Б. К. Набиулин, Г. М. Сафиуллина // Инженерный вестник Дона. – 2020. – № 4(64). – С. 1.

DETERMINATION OF THE TIME CONSTANT OF AN INERTIAL OBJECT OF THE FIRST ORDER ACCORDING TO THE EXPERIMENTAL ACCELERATION CURVE

T.G. Sukhonosova, D.D. Filatov, S.A Emelyanov, N.A Antipanov

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation

Abstract. The paper considers methods for determining the time constant of an inertial object of the first order by the transient characteristic or acceleration curve. In particular, the method of determining the time constant of an object based on incomplete experimental data is considered, for the case when the beginning of the transition process was not recorded or was recorded inaccurately. The results of experiments with low-inertia temperature sensors are presented. The method proposed in this paper gives a slight error for objects whose model can be described by an inertial link of the first order with and without delay.

Keywords: time constant, inertial link, transient characteristic, acceleration curve.

REFERENCES

1. Kim D.P. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya: uchebnik i praktikum dlya vuzov* [Theory of automatic control: textbook and workshop for universities], Moscow: Publishing house Yurait, 2020, 276 p.
2. Pevzner L. D. *Teoriya sistem upravleniya: uchebnoe posobie* [Theory of control systems: study guide], Lan: elektronno-bibliotchnaya sistema, Saint-Petersburg, 2022, pp. 424.
3. Sukhonosova T.G., Buzmakov M.A., Chernov V.V., Filatov D.D. Determination of the dynamic parameters of an object in the control loop with constant-speed actuator. *Avtomatizirovannye tehnologii i proizvodstva* [Automation of technologies and production], 2023, no.1(27), pp.18-22.
4. Andreev S.M., Parsunkin. B.N. *Razrabotka i modelirovanie neslozhnykh sistem avtomatizatsii s uchetom specifiky tekhnologicheskikh processov* [Development and modeling of simple automation systems taking into account the specifics of technological processes], Moscow: Publishing Center "Academy", 2016, 272 p.
5. Zakharenko V. A., Veprikova Ya. R., Kuznetsov D. V. Investigation of the time constant of the PD-10 pyrometer [Issledovanie postoyannoy vremeni pirometra PD-10], *Rossiya molodaya: peredovye tehnologii – v promyshlennost* [Russia is young: advanced technologies are being introduced into industry], 2019, no.1, pp. 133-136.
6. Popov S.A., Krivchenkov V. I. Identification of the time constant of the anchor circuit of a DC motor [Identifikatsiya postoyannoy vremeni yakornoy tsepi dvigatelya postoyannogo toka], *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotehnika, informatsionnye tehnologii, sistemy upravleniya* [Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Electrical engineering, information technology, control systems], 2020, no.33, pp. 115-128.
7. Sukhonosova, T. G. Yarullin A.R., Novak V.S. Identification of Dynamic Properties of the Pressure Parameter in the Working Space of a Heating Furnace [Identifikatsiya dinamicheskikh svoystv parametra davleniya v rabochem prostranstve metodicheskoy pechi], *Teoria i tehnologia metallurgicheskogo proizvodstva* [The Theory and Process Engineering of Metallurgical Production], 2023, vol. 44, no.1, pp. 39-44.
8. Mokrushin S.A. Zhuravlev A.V. Krotov S.V. Teplykh V.P. Engineering methods of identification of static control objects for the purpose of their further automation [Inzhenernye metody identifikatsii staticheskikh obektov upravleniya s tselyu ikh dalneyshey avtomatizatsii], *Nauka i obrazovanie v XXI veke. sbornik nauchnykh trudov po materialam mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii: v 8 chastyakh. OOO «AR-Konsalt»* [Proc. Science and education in the 21st century. collection of scientific papers based on the materials of the international scientific and practical conference: in 8 parts], AR-Consult LLC, 2014, pp. 55-57.
9. Safarov I. M., Nabiulin B. K., Safiullina G. M. Automation of the calculation of the transfer functions of the automated control system by the method of non-canceling contours [Avtomatizatsiya rascheta peredatochnykh funktsiy ASU metodom nekasayushchikh konturov], *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don], 2020, vol.64, no.4, pp. 1.

Сухоносова Т.Г. Определение постоянной времени инерционного объекта первого порядка по экспериментальной кривой разгона / Т.Г. Сухоносова, Д.Д. Филатов, С.А. Емельянов, Н.А. Антипанов // Автоматизированные технологии и производства. 2023. №2(28). С.29–32.

T.G. Sukhonosova, D.D. Filatov, S.A Emelyanov, N.A Antipanov Determination of the Time Constant of an Inertial Object of the First Order According to the Experimental Acceleration Curve. *Avtomatizirovannye tehnologii i proizvodstva* [Automation of technologies and production], 2023, no.2(28), pp.29-32. (In Russian).

УДК 534.014.3

УПРУГО-ДЕФОРМАЦИОННАЯ И ДРУГИЕ ВИДЫ МОЩНОСТИ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ
МОНИТОРИНГА ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ

И.П. Попов

Курганский государственный университет, Курган, Россия

e-mail: uralakademia@kurganstalmost.ru

Аннотация. Цель исследования состоит в детализации видов механической мощности при гармонических колебаниях. Показано, что при механических колебаниях развивается не только знакоположительная тепловая мощность, но и знакопеременные реактивные мощности, характеризующие обратимость механической энергии. Под активной мощностью понимается среднее за полпериода значение мгновенной мощности, а под реактивной – амплитудное значение. Полная механическая мощность, с одной стороны, описывается формулой Пифагора, а с другой – равна произведению действующих значений гармонических величин. Особенностью комплексного представления является то, что при вычислении полной мощности один из перемножаемых векторов должен быть сопряженным. Представление о механических реактивных, активной и полной мощностях является обобщением соответствующих понятий из электротехники, что является проявлением электро-механического дуализма.

Ключевые слова: механическая мощность, потенциальная энергия, комплексное представление, векторное представление.

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

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

В [1] была рассмотрена реактивная инерционная мощность, являющаяся производной кинетической энергии.

Предметом настоящей работы является упруго-деформационная и другие виды мощности.

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

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

том числе, для целей мониторинга энергосберегающих технологий [5].

Движение груза описывается известным выражением

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

В [1] отмечено, что для гармонической величины действующее значение меньше амплитудного в $\sqrt{2}$.

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

Формула для силы трения –

$$f_{\mu} = \mu \dot{x} = \mu l \omega \cos \omega t . \quad (2)$$

В электротехнике определяют активную мощность как

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

Поэтому активную (тепловую) механическую мощность тоже следует определить как

$$P = FV \cos \varphi . \quad (3)$$

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

В электротехнике определяют реактивную мощность как

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

Поэтому реактивную механическую мощность тоже следует определить как

$$Q_i = FV \sin \varphi . \quad (4)$$

Под активной мощностью понимается среднее за полпериода значение мгновенной мощности, а под реактивной – амплитудное значение. В электротехнике все обстоит аналогичным образом.

Еще одним обобщением из электротехники является полная механическая мощность

$$S = FV = \sqrt{Q_d^2 + P^2}. \quad (5)$$

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

Мощность, развиваемая при упругих деформациях.

Выражение для силы имеет вид:

$$f_k = kx = kl \sin \omega t, \quad (6)$$

Имея в виду (2), результирующая сила равна

$$f = f_k + f_\mu = kl \sin \omega t + \mu l \omega \cos \omega t = l \sqrt{k^2 + \mu^2 \omega^2} \left(\frac{k}{\sqrt{k^2 + \mu^2 \omega^2}} \sin \omega t + \frac{\mu \omega}{\sqrt{k^2 + \mu^2 \omega^2}} \cos \omega t \right).$$

Можно обозначить

$$\varphi = \arctg \frac{k}{\mu \omega}.$$

С учетом этого

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

Очевидно, что

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

Действующее значение результирующей силы с учетом (1) равно

$$F = \frac{F_m}{\sqrt{2}} = \frac{l \sqrt{k^2 + \mu^2 \omega^2}}{\sqrt{2}}. \quad (7)$$

Мгновенная результирующая мощность –

$$\begin{aligned} s &= fv = l \sqrt{k^2 + \mu^2 \omega^2} \cos(\omega t - \varphi) l \omega \cos \omega t = \\ &= 0,5 l^2 \omega \sqrt{k^2 + \mu^2 \omega^2} [\cos \varphi + \cos(2\omega t - \varphi)] = \\ &= FV [\cos \varphi + \cos(2\omega t - \varphi)] = \\ &= FV (\cos \varphi + \cos 2\omega t \cos \varphi + \sin 2\omega t \sin \varphi) = \\ &= FV \cos \varphi (1 + \cos 2\omega t) + FV \sin \varphi \sin 2\omega t = \end{aligned} \quad (8)$$

$$P + q_d.$$

Имея в виду (3), активная механическая мощность равна

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

Принимая во внимание (4) и (7), механическая реактивная (упругая) мощность равна

$$Q_d = FV \sin \varphi = \frac{l \sqrt{k^2 + \mu^2 \omega^2}}{\sqrt{2}} \frac{l \omega}{\sqrt{2}} \frac{k}{\sqrt{k^2 + \mu^2 \omega^2}} = \frac{kl^2 \omega}{2}. \quad (9)$$

При этом

$$\begin{aligned} f_k v &= kl \sin \omega t l \omega \cos \omega t = 0,5 kl^2 \omega \sin 2\omega t = \\ &= F_k V \sin 2\omega t = Q_d \sin 2\omega t, \end{aligned} \quad (10)$$

Это соответствует выражениям (9) и (10).

Очевидно, что полная мощность с учетом (5) равна

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

Мощность при колебаниях, связанных с гравитационным воздействием. При отклонении подвешенного груза на угол α возникает момент

$$M = mgL\alpha,$$

Пусть

$$\alpha = \alpha_0 \sin \omega t.$$

Тогда

$$\dot{\alpha} = \alpha_0 \omega \cos \omega t = \alpha_0 \sqrt{\frac{g}{L}} \cos \omega t.$$

Мгновенная мощность имеет вид:

$$q_g = M \dot{\alpha} = mgL\alpha_0 \sin \omega t \alpha_0 \sqrt{\frac{g}{L}} \cos \omega t = 0,5 m \alpha_0^2 \sqrt{Lg^3} \sin 2\omega t.$$

Ее амплитуда и, соответственно, реактивная мощность гравитационного воздействия определяется как

$$Q_g = 0,5 m \alpha_0^2 \sqrt{Lg^3}.$$

Реактивная, активная и полная мощности в комплексном представлении. Из [1] следует, что при инертной нагрузке

$$\dot{V}_m = V_m e^{j\pi/2}.$$

Мгновенная скорость при этом равна

$$v = V_m \cos \omega t = \text{Im} \dot{V}_m.$$

Формулы для действующих значений величин принципиально не отличаются

$$\dot{V} = V e^{j\pi/2}, \quad \dot{F} = F e^{j(\pi/2+\varphi)}.$$

Особенностью комплексного представления, подробно описанного в электротехнике, является то, что при вычислении полной мощности один из перемножаемых векторов должен быть сопряженным.

$$\begin{aligned} \underline{S} &= \dot{F} \dot{V}^* = F e^{j(\pi/2+\varphi)} V e^{-j\pi/2} = FV e^{j(\pi/2+\varphi-\pi/2)} = \\ &= FV e^{j\varphi} = FV \cos \varphi + jFV \sin \varphi = P + jQ_i. \end{aligned}$$

Это выражение для инертной нагрузки. Отличием упругой нагрузки является то, что реактивная мощность имеет противоположный знак

$$\begin{aligned} \underline{S} &= \dot{F} \dot{V}^* = F e^{j(\pi/2-\varphi)} V e^{-j\pi/2} = FV e^{j(\pi/2-\varphi-\pi/2)} = \\ &= FV e^{-j\varphi} = FV \cos \varphi - jFV \sin \varphi = P + jQ_d. \end{aligned}$$

При этом

$$P = \text{Re} \dot{F} \dot{V}^*, \quad Q = \text{Im} \dot{F} \dot{V}^*.$$

Механические мощности в векторном представлении. В основе комплексного представления лежит идея вращающихся в комплексной плоскости векторов. Тот же принцип может быть реализован в трехмерном декартовом базисе.

Из (8) – (10) необходимо следует, что

$$P = (\mathbf{F}, \mathbf{V}),$$

$$Q = [(\mathbf{F}, \mathbf{V})],$$

$$S^2 = (\mathbf{F}, \mathbf{V})^2 + [(\mathbf{F}, \mathbf{V})]^2.$$

Математическая абстракция с проекциями вращающихся векторов имеет конкретную материальную основу в виде кривошипно-кулисных механизмов.

Заключение. Показано, что при механических гармонических колебаниях развивается не только знакоположительная тепловая мощность, но и знакопеременные реактивные мощности, характеризующие обратимость механической энергии.

Это обстоятельство полезно учитывать для целей мониторинга энергосберегающих технологий.

При этом полная механическая мощность удовлетворяет формуле Пифагора.

Представление о механических реактивных, активной и полной мощностях является обобщением соответствующих понятий о мощностях из электротехники, что является проявлением электромеханического дуализма.

ЛИТЕРАТУРА

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

2. Хайдаров С.Д., Солиев А.Г., Рустамова Ш.Ш. Анализ электромеханических колебаний в регулируемой

электрической системе // Автоматизированные технологии и производства. 2016. № 2 (12). С. 48–52.

3. Петрякова Е.С., Идрисов И.Н., Лымарь А.Б., Вечеркин М.В. Компьютерная модель для исследования пусковых процессов в асинхронных электроприводах // Автоматизированные технологии и производства. 2015. № 2 (8). С. 14–16.

4. Лицин К.В. Обоснование выбора частоты переменной составляющей сигнала возбуждения при определении углового положения ротора синхронного двигателя методом высокочастотной инжекции сигнала // Автоматизированные технологии и производства. 2015. № 4 (10). С. 41–43.

5. Щелоков Я.М., Лисиенко В.Г. Энергетические обследования в металлургии // Автоматизированные технологии и производства. 2012. № 4. С. 13–21.

ELASTIC-STRAIN AND OTHER TYPES OF POWER FOR THE PURPOSES OF MONITORING ENERGY-SAVING TECHNOLOGIES

I.P. Popov

Kurgan State University, Kurgan, Russia

Abstract. The purpose of the study is to detail the types of mechanical power during harmonic vibrations. It is shown that during mechanical vibrations not only positive-sign thermal power develops, but also alternating reactive powers, which characterize the reversibility of mechanical energy. By active power we mean the average value of instantaneous power over half a period, and by reactive power we mean the amplitude value. Total mechanical power, on the one hand, is described by the Pythagorean formula, and on the other hand, it is equal to the product of the effective values of harmonic quantities. A feature of the complex representation is that when calculating the total power, one of the multiplied vectors must be conjugate. The idea of mechanical reactive, active and apparent powers is a generalization of the corresponding concepts from electrical engineering, which is a manifestation of electro-mechanical dualism

Keywords: mechanical power, potential energy, complex representation, vector representation

REFERENCES

1. Popov I.P. Mechanical reactive inertial power for the purposes of monitoring energy saving technologies [Mekhanicheskaya reaktivnaya inertsionnaya moshchnost' dlya tseley monitoringa energosberegayushchikh tekhnologiy], *Avtomatizirovannye tehnologii i proizvodstva [Automation of technologies and production]*, 2022, no. 1 (25), pp. 17–19.

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

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

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

4. Litsin K.V. Justification of the choice of the frequency of the variable component of the excitation signal when determining the angular position of the rotor of a synchronous motor by the method of high-frequency signal injection [Obosnovaniye vybora chastoty peremennoy sostavlyayushchey signala vzbuzhdeniya pri opredelenii uglovogo polozheniya rotora sinkhronnogo dvigatelya metodom vysokochastotnoy inzhektionsii signala], *Avtomatizirovannye tehnologii i proizvodstva [Automation of technologies and production]*, 2015, no. 4 (10), pp. 41–43. (In Russian)

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

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.

I.P. Popov Elastic-Strain and Other Types of Power for the Purposes of Monitoring Energy-Saving Technologies. *Avtomatizirovannye tehnologii i proizvodstva [Automation of technologies and production]*, 2023, no.2(28), pp.33-35. (In Russian).

УДК 681.51:6211

СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПАРОВЫМ КОТЛОМ
ФИРМЫ LOOS BOSCH 5000

Е.А. Ширококов, Е.С. Бондарев, А.Р. Бондарева

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

bok.1991@mail.ru, egorbond2002@mail.ru, a.bondareva@magtu.ru

Аннотация. Паровой котел LOOS Bosch 5000 характеризуется высокими скоростями протекания процессов в пароводяном тракте. Показателями тепловых процессов в котле являются уровень воды в парогенераторе, расход подпиточной воды в котельную установку, расход пара на выходе из парогенератора, температура перегретого пара. К автоматической системе регулирования предъявляются высокие требования к точности регулирования параметров для обеспечения надежной работы парового котла LOOS Bosch 5000 обуславливает необходимость применения быстродействующих автоматических регулирующих устройств. Поддержание заданного уровня воды в паровом котле является одной из главнейших задач, обеспечивающих надежную работу котла.

Ключевые слова: уровень, паросилового цеха, котельная, паровой котел, управление, автоматизация, регулирование.

ВВЕДЕНИЕ

Котельная №4 паросилового цеха Публичного акционерного общества «Магнитогорский металлургический комбинат» (ПАО «ММК») предназначена для производства перегретого пара направленного на нужды южного блока листопрокатных цехов и в общие паровые сети ПАО «ММК». Производство пара реализовано на базе двух паровых котлов фирмы LOOS Bosch 5000. Основные задачи паросилового цеха:

- утилизация отходящего тепла технологических агрегатов ПАО «ММК»;
- выработка пара;
- выработка теплофикационной воды;
- выработка электроэнергии;
- распределение и транспортировка тепловой энергии к потребителям.

— производство химически очищенной воды, которая подается на нагревательные печи ЛПЦ № 4 и № 10, на котлы-охладители конвертерного газа (ККЦ) и другие энергообъекты ПАО «ММК».

Производство перегретого пара реализовано на базе паровых котлов фирмы LOOS, одна из самых удобных систем эксплуатации паровых котлов. Все функции системы управления котлом объединены в центральном модуле управления. Таким образом, регулируются мощность котла, уровень воды, автоматическая постоянная продувка, удаление шлама, управление экономайзером или перегревателем [1].

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС ПРОИЗВОДСТВА ПАРА

С водоподготовки по трубопроводам в котельную №4 поступает химически очищенная вода и попадает в установки «обратного осмоса» где происходит обессоливание воды. Далее вода попадает в накопительный бак. С накопительного бака вода подается в деаэратор, где происходит удаление газов из воды. После подготовки вода подается в котел. На рис. 1 показана мнемосхема котла, на которой показывается положение исполнительных механизмов котла, значение сигналов контролируемых параметров, режим работы котла, графики значений измеряемых параметров котла, фактические и архивные значения, а также журнал событий работы автоматики.

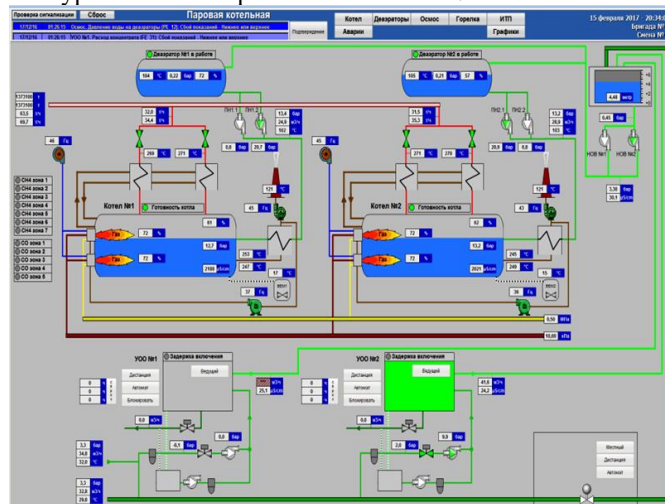


Рис. 1. Мнемосхема котельной №4

Система управления парового котла производства компании LOOS может использоваться как для газовых, жидкотопливных и комбинированных горелок со ступенчатым регулированием мощности, так и с механическим или электронным регулированием подачи воздуха горения.

Питательная система котла, рис. 2, предназначена для подачи в котельную установку питательной воды заданной температуры и в определенном количестве, обеспечивающем удержание уровня воды в парогенераторе в допустимых пределах регулирования. Для обеспечения надежной работы котельной установки необходимо поддерживать уровень котловой воды в парогенераторе в заданном диапазоне.

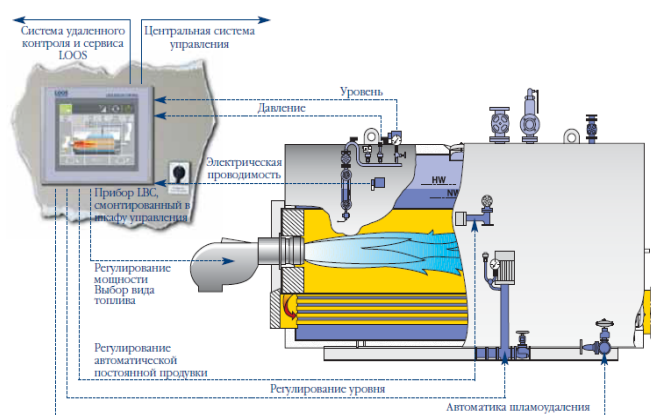


Рис. 2. Питательная система парового котла 4

Если допустить перелив уровня котловой воды в парогенераторе, то неизбежен заброс воды в пароперегреватель и, как следствие, разрушение его конструкций из-за гидравлических ударов. Также возможно развитие такой ситуации как унос в пароперегреватель влажного пара вместе с содержащимися в нем солями. Отложения солей, в свою очередь, приводит к перегреву труб из-за очень высоких температурных режимов, выход их из строя котла.

Если упустить уровень котловой воды в парогенераторе, это приведет к срыву циркуляции, а также оголению жаровых труб что, в свою очередь, приводит к нарушению режима охлаждения жаровых труб и, как следствие, к перегреву трубной системы котла.

Уровень котловой воды в парогенераторе поддерживается с помощью регулятора питания котла, который в свою очередь выдает управляющее воздействие на степень открытия питательного клапана. А измеряется датчиком уровня, который встроен в корпус парогенератора и выдает на выходе преобразователя уровня пропорциональный уровню измерительный ток в пределах диапазона 4–20 мА. Измерение уровня происходит по принципу электрического конденсатора (если между двумя конденсатными пластинами изменяется уровень диэлектрика, то пропорционально уровню изменяется и ток, протекающий между пластинами).

Правильная организация регулирования и контроль за регулируемыми параметрами является условием для безотказной и безаварийной работы котла.

Так же в паровом котле измеряются следующие параметры:

- расход топлива;
- расход пара;
- расход питательной воды;
- температура дымовых газов;
- температура пара.

Регулируемые параметры парового котла:

- температура дымовых газов;
- температура перегретого пара;
- уровень в барабане.

Система автоматического управления парогенератором является одним из основных факторов повышения производительности, обеспечивающий оптимальный режимы парового котла, повышает надежность системы и обеспечивает безопасность работы персонала.

КОНТУРЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ПАРОВОГО КОТЛА

Современный паровой котел представляет собой агрегат, который отвечает технологическим и экологическим требованиям, которые включают в себя:

- обеспечение заданной производительности;
- обеспечение качества пара;
- эффективное использование топлива;
- соответствие экологическим нормам по предельно допустимому выбросу в атмосферу пыли и вредных газов;
- механизация труда при эксплуатации и ремонте котла и его автоматизации.

Оптимальный выбор и применение методов и средств контроля температуры, давления, соотношения топлива в паровом котле оказывает решающее влияние на характеристики их работы: производительность, обеспечение требуемого режима, качество пара, расход энергии. Одной из главных задач автоматизации является контуры регулирования нагрузки, соотношения «топливо - воздух», разрежения, питания [2].

АСР нагрузки парового котла.

На данном объекте реализовано два способа регулирования нагрузки котла (базовый или регулирующий). Выбор способа зависит от поставленной задачи. Первый способ (базовый) позволяет поддерживать нагрузку котла в заданном диапазоне, при этом котел не реагирует на внешние возмущения паровых сетей. Если требуется реагировать на внешние возмущения паровых сетей, а именно повышение или понижение давление в сети, то необходимо выбрать второй способ (регулирующий). Компенсация повышения или понижения давления в парогенераторе будет происходить за счет увеличения или уменьшения подаваемого топлива на горелки.

АСР соотношения «топливо - воздух».

Основным способом качественного сжигания топлива является изменение количества воздуха, подаваемого в топку с помощью дутьевого вентилятора.

При постоянном качестве топлива его расход и количество воздуха, необходимое для обеспечения требуемой полноты сгорания, связаны прямой пропорциональной зависимостью, устанавливаемой в результате режимных испытаний. Если измерение расхода топлива осуществляется достаточно точно, то поддержание оптимального избытка воздуха можно осуществить по соотношению расход топлива — расход воздуха, используя схему регулирования подачи воздуха, известную под названием топливо — воздух. При газообразном топливе требуемое соот-

ношение между количествами газа и воздуха осуществляется просто - путем сравнения перепада давлений на сужающем устройстве, устанавливаемом на газопроводе, с перепадом давлений на воздухоподогревателе, или на специальном измерительном устройстве расхода воздуха. Разность перепада давлений является входным сигналом автоматического регулятора.

АСР разрежения.

Наличие заданного небольшого по величине (до 2–5 мм вод. ст.) постоянного разрежения в топке котла необходимо для нормального топочного режима. Поддержание заданного разрежения препятствует выбиванию газов из топки, сигнализирует об устойчивости факела и является косвенным показателем баланса между нагнетаемым в топку воздухом горения и топливом.

Объект регулирования по разрежению представляет собой топочную камеру с включенными последовательно с нею газоходами от поворотной камеры до всасывающих патрубков дымососов. Входным регулирующим воздействием этого участка служит перепад давления между воздухом горения и отсасываемых дымовых газов, определяемый производительностью дымососов. Регулирование разрежения обычно осуществляется посредством изменения количества уходящих газов, отсасываемых дымососами.

АСР уровня.

Уровень воды в котле будет неизменным, если расход воды из котла в виде отбираемого пара, будет равен количеству подаваемой в котёл питательной воды. Уровень в барабане котла зависит от многих факторов — общей массы воды в котле, её температуры, насыщенности пузырьками пара внутри испарительных поверхностей нагрева и т. п.

Система автоматического регулирования уровня в котле необходима для поддержания материального баланса, расход питательной воды должен быть равным расходу пара от котла. Поддержание заданного уровня в парогенераторе необходимо для обеспечения бесперебойной работы оборудования. При достижении уровня, нижнего аварийного значения возможен перегрев и разрушения жаровых труб. При достижении верхнего аварийного уровня, возможен заброс котловой воды в пароперегреватель, что в свою очередь приведет к разрушению пароперегревателя.

АСУ ТП парового котла выполнена на базе комплекса технических средств фирмы «Siemens» и средств КИПиА и обеспечивает оптимальное управление с рабочего места оператора тепловым режимом работы парового котла с детальным контролем, как температурных параметров, так и контролем за работой и состоянием:

- уровня в паровом котле;
- регулирование температуры пара;
- регулирование тепловой мощности котла;
- контроль теплового режима котла и состояние горелки;
- контроль положения и диагностика работы электроклапанов и сервоприводов;
- мониторинг параметров технологического процесса;
- аварийная и предупредительная сигнализация (световая и звуковая);

— архивирование сообщений системы и действий оператора;

— архивирование всех параметров технологического процесса и хранение архивов в течение заданного интервала времени;

— визуализация архивных значений параметров в виде графиков;

— формирование и печать отчетов.

Система автоматического управления парового котла фирмы LOOS включает в себя контроллер фирмы SIEMENS серии S7-400, расположенного в помещении PLC, где поддерживается определенный микроклимат [3,4].

Основной задачей системы автоматического управления является контроль и регулирование следующих параметров:

— давление природного газа перед горелкой (1 МПа);

— расход питательной воды (50 м³/ч);

— давление питательной воды (1,4 МПа);

— температура питательной воды (106 °С);

— температура отходящих газов (45 °С);

— уровень в паровом котле (200 мм);

— температура пара (269 °С);

— расход пара (31,5 т/ч);

— электропроводность воды (2015 μs/cm);

Для парового котла реализовано отключение подачи топлива к горелки, сигнализация параметров отсечки при следующих параметрах:

— понижении давления воздуха за дутьевыми вентиляторами;

— уменьшении разрежения в топке;

— погасании факела;

— повышении или понижении давления газообразного топлива перед горелками.

СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ УРОВНЯ В БАРАБАНЕ КОТЛА

В работе рассмотрено регулирование уровня относительно задания на основе существующих технических средств с настройкой параметров, которые позволят улучшить переходные характеристики поддержания уровня при нормальной работе и с эффектом «набухания» и реализацией ПДД² регулятора.

Разработка математической модели управления объектом позволит решить одну из важнейших задач автоматического регулирования уровня в парогенераторе котла фирмы LOOS Bosch 5000, а именно поддержание системой управления уровня во время эффекта «набухания».

Эффект «набухания» проявляется во время активной фазы отбора пара из сети, выработка пара резко увеличивается, поднимается температура в парогенераторе, вода начинает кипеть, пузырьки поднимающегося газа приподнимают зеркало воды, появляется «паразитный» уровень. Проблема «паразитного» уровня решается следующими способами.

— Уменьшение нагрузки на котел путем снижения расхода топлива, которое также приводит к снижению давления в паровых сетях.

— Увеличение расхода питательной воды, что в свою очередь позволит снизить температуру в парогенераторе и нивелировать «паразитный» уровень.

Предложенный ПДД² регулятор с рассчитанной математической моделью объекта управления на базе существующих КТС АСУ ТП позволит реализовать систему управления уровнем воды, исключая вышеописанную проблему. Это позволит повысить качество переходного процесса при изменении уровня воды в парогенераторе при фазе активного отбора пара из сети внешними потребителями, что позволит компенсировать эффект «набухания» в парогенераторе.

Для поддержания материального баланса в котле разработана структурно-функциональная схема контура регулирования уровня в барабане парового котла. В схеме реализуется поддержание соотношения расхода питательной воды и расхода отходящего пара от котла в период обычной работы и при активной фазе отбора пара из сети внешними потребителями при поддержании уровня в барабане котла, рис. 3.

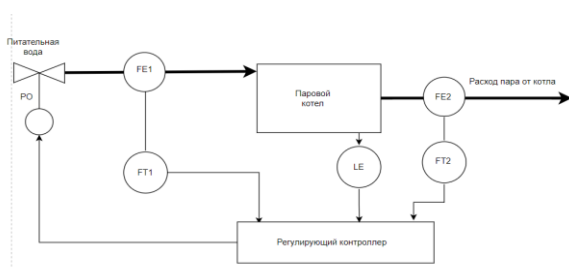


Рис. 3. Структурно-функциональная схема контура регулирования уровня: FT1,2 – Преобразователь разности давлений; LE –Измеритель уровня; PO – Регулирующий орган; FE1,2 – Сужающее устройство; ИМ - Исполнительный механизм; РК – Регулирующий контроллер

Структурная схема, используемая для создания математической модели контура регулирования заданного уровня в барабане парового котла с компенсацией эффекта «набухания», представлена на рис. 4.

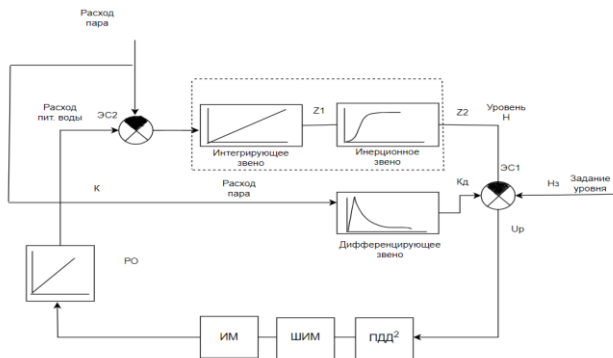


Рис. 4. Структурная схема контура регулирования уровня

Изменение текущего положения регулирующего органа, вызывает изменение расхода питательной воды в объект управления. Значение расхода питательной воды поступает на вход элемента сравнения ЭС2, где сравнивается со значением возмущения по расходу пара от котла [5]. В случае, если не соблюдается соотношение расходов питательной воды и пара на элементе сравнения ЭС2, возникает рассогласование. Рассогласование сигналов поступа-

ет на воды дифференцирующего звена, имитирующего эффект набухания в объекте регулирования. Выход с дифференцирующего звена поступает на вход элемента сравнения ЭС1, где сравнивается с текущим значением уровня воды и опорным заданием. Результат вычисления в элементе сравнения ЭС1 формирует коррекцию в ПДД²-регулятор.

В результате моделирования контура регулирования уровня в барабане парового котла получены графики переходных процессов при изменении задания и увеличении нагрузки [6, 7]. Предложенный ПДД² регулятор позволяет реализовать систему управления уровнем воды, исключая проблему возникновения эффекта «набухания» в парогенераторе, повышая качество переходного процесса при изменении уровня воды в парогенераторе при фазе активного отбора пара из сети внешними потребителями.

В результате моделирования контура регулирования уровня в барабане парового котла получены графики переходных процессов при изменении задания и увеличении нагрузки. Предложенный ПДД² регулятор позволяет реализовать систему управления уровнем воды, исключая проблему возникновения эффекта «набухания» в парогенераторе, повышая качество переходного процесса при изменении уровня воды в парогенераторе при фазе активного отбора пара из сети внешними потребителями.

В результате моделирования контура регулирования уровня в барабане парового котла получены графики переходных процессов при изменении задания и увеличении нагрузки. Предложенный ПДД² регулятор позволяет реализовать систему управления уровнем воды, исключая проблему возникновения эффекта «набухания» в парогенераторе, повышая качество переходного процесса при изменении уровня воды в парогенераторе при фазе активного отбора пара из сети внешними потребителями.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ (Выводы)

В работе исследована система автоматического управления паровым котлом фирмы Loos Bosch 5000, проблема регулирования уровня в барабане котла; предложена современная система автоматического регулирования.

ЛИТЕРАТУРА

- Соколов, Б.А. Паровые и водогрейные котлы малой и средней мощности / Б.А. Соколов – Москва: «Академия», 2008. – 237 с. – Текст: непосредственный.
- Плетнев, Г. П. Автоматизация технологических процессов и производств в теплоэнергетике: учебник для студентов вузов, обучающихся по специальности "Автоматизация технологических процессов и производств (энергетика)" направления подготовки дипломированных специалистов "Автоматизированные технологии и производства" / Г. П. Плетнев. – 4-е изд., стер. – Москва: МЭИ, 2007. – 351 с. – ISBN 978-5-903072-85-9.
- Сниткин Д.О. Система автоматического управления котлами типа «ГАНОМАГ»/ Д.О. Сниткин, Е.Ю. Мухина, И.С. Бондарев // Автоматизированные технологии и производства. 2022. №2(26). С.32-36.
- Мухина, Е. Ю. Системы управления технологическими процессами и информационные технологии: Учеб-

ное пособие. Электронное издание / Е. Ю. Мухина, А. Р. Бондарева. – Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2015. – 110 с.

5. Сниткин, Д. О. Выбор и расчёт регулирующих органов систем автоматического регулирования / Д. О. Сниткин, И. Г. Самарина, И. С. Бондарев // Автоматизированные технологии и производства. – 2022. – № 2(26). – С. 19-22. – EDN GMUNEZ.

6. Самарина, И. Г. Метрология и технические измерения : практикум / И. Г. Самарина, Е. Ю. Мухина, А. Р. Бондарева. – Магнитогорск : Магнитогорский государ-

ственный технический университет им. Г.И. Носова, 2021. – 57 с. – ISBN 978-5-9967-2154-2.

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

AUTOMATIC CONTROL SYSTEM FOR STEAM BOILER LOOS BOSCH 5000

E.A. Shirobokov, E.S. Bondarev, A.R. Bondareva

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation

egorbond2002@mail.ru, a.bondareva@magtu.ru

Abstract. The LOOS BOSCH 5000 steam boiler is characterized by high speeds of processes in the water-steam circuit. Indicators of thermal processes in the boiler are the water level in the steam generator, make-up water flow rate to the boiler system, steam flow rate at the steam generator outlet and superheated steam temperature. High demands for parameter regulation accuracy are placed on the automatic control system to ensure reliable operation of the LOOSE Bosch 5000 steam boiler. This means that high-speed automatic regulating devices are required. Maintaining the water level in the steam boiler is one of the most important tasks to ensure reliable boiler operation.

Keywords: level, steam plant, boiler house, steam boiler, control, automation, regulation.

REFERENCES

1. Socolov B.A. Steam and hot-water boilers of low and medium capacity. – Moscow :Academia, 2008. – 237 p.

2. Pletnev G.P., Automation of Technological Processes and Production Facilities in Thermal Power Engineering: A Handbook for Higher Schools – Moscow :MEI, 2007.– 351 p.

3. D.O. Snitkin, E.YU. Mukhina, I.S. Bondarev Automatic Control System for Boilers of the "Ganomag" Type. Avtomatizirovannye tehnologii i proizvodstva [Automation of technologies and production], 2022, no.2(26), pp.32-36. (In Russian).

4. Mukhina E.Yu., Bondareva A.R. Sistemy upravleniya tekhnologicheskimi protsessami i informatsionnye tekhnologii: Uchebnoe posobie. Elektronnoe izdanie, Magnitogorsk, Magnitogorskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiy universitet im. G.I. Nosova, 2015, 110 p.

5. D.O. Snitkin, I.G. Samarina, I.S. Bondarev Selection and Calculation Controlling Element Automatic of Control Systems. Avtomatizirovannye tehnologii i proizvodstva [Automation of technologies and production], 2022, no.2(26), pp.19-22.

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

7. Dadayan, L. G. Automated control systems for technological processes: study guide / L. G. Dadayan. - Ufa: UGNTU, 2018. - 241 p. - ISBN 978-5-7831-1676-6. — Text: electronic // Doe: electronic library system. — URL: <https://e.lanbook.com/book/166886> (date of access: 19/12/2022). — Access mode: for authorization. Users.

Широбокков Е.А. Система автоматического управления паровым котлом фирмы Loos Bosch 5000 /Е.А. Широбокков, Е.С. Бондарев, А.Р. Бондарева // Автоматизированные технологии и производства. 2023. №2(28). С.36-40.

E.A. Shirobokov, E.S. Bondarev, A.R. Bondareva Automatic Control System for Steam Boiler Loos Bosch 5000. Avtomatizirovannye tehnologii i proizvodstva [Automation of technologies and production], 2023, no.2(28), pp.36-40. (In Russian)