

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПРОИЗВОДСТВА

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПРОИЗВОДСТВА

№2 (26) декабрь 2022 г.

Международный научно-технический журнал

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

О журнале

Журнал «Автоматизированные технологии и производства» основан в 2012 году на базе сборника «Автоматизация технологических и производственных процессов в металлургии», который издавался кафедрой промышленной кибернетики и систем управления (с 2013 кафедра автоматизированных систем управления - АСУ) с 2004 по 2012 год. В журнале публикуются научные статьи, посвященные автоматизированным системам в промышленности, управлению технологическими процессами и производствами, практическому применению современных методов управления. Освещаются вопросы, связанные с моделированием систем управления, разработкой промышленных тренажеров и стендов для проведения научных исследований и испытаний. Приоритетным направлением журнала является 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 12.2022.

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

Математическое моделирование технологических систем и объектов управления***В.Д. Павлов***

Математическая модель метода короткого замыкания двух последовательно соединенных трансформаторов для определения рассеяния обмоток по отдельности

4

Технические средства автоматизации***А.А. Дубровская, К.В. Абрамкин, И.Г. Самарина***

Контроль углеродного потенциала в газовой цементации ...

7

В.Д. Павлов

Переходный процесс в пьезоэлектрическом преобразователе с упругой нагрузкой в составе мехатронного комплекса .

11

И.П. Попов

Индуктивно-индуктивные колебания в системах автоматизации

13

Системы автоматизации и управления***И.П. Попов***

Автоматическое секвестирование реактивной мощности в сети..

16

Д.О. Сниткин, И.Г. Самарина, И.С. Бондарев

Выбор и расчёт регулирующих органов систем автоматического регулирования

19

О.В. Газизова, С.М. Андреев, Г.П. Корнилов, А.Э. Морицакин, А.Р. Курбанов

Разработка автоматизированной системы группового управления возбуждением синхронных генераторов с целью повышения устойчивости

23

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

Технология классификации изображений опасного производственного объекта с использованием гистограмм яркости

26

Automatic control systems***Д.О. Сниткин, Е.Ю. Мухина, И.С. Бондарев***

Система автоматического управления котлами типа «ГАНОМАГ»

32

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

Система автоматического регулирования газодинамического режима методической печи

37

Mathematic and simulation of control systems and objects***V.D. Pavlov***

Mathematical model of the short-circuit method of two transformers connected in series to determine the scattering windings individually

4

Automation equipment***A.A. Dubrovskaya, K.V. Abramkin, I.G. Samarina***

Measurement of Carbon Potential in Gas Carburization .

7

V.D. Pavlov

Transient Process in A Piezoelectric Transducer With Elastic Load as Part of a Mechatron Complex

11

I.P. Popov

Inductive-Inductive Oscillations in Automation Systems

13

Control System***I.P. Popov***

Automatic Reactive Power Section in the Network ...

16

D.O. Snitkin, I.G. Samarina, I.S. Bondarev

Selection and Calculation Controlling Element Automatic of Control Systems

19

O.V. Gazizova, S.M. Andreev, G.P. Kornilov, A.E. Morshchakin, A.R. Kurbanov

Development of the Automated System of Group Control of the Excitation of Synchronous Generators to Increase Stability

23

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

Technology for Image Classification of a Hazardous Production Facility Using Brightness Histogram

26

Automatic control systems***D.O. Snitkin, E.YU. Mukhina, I.S. Bondarev***

Automatic Control System for Boilers of the "GANOMAG" Type

32

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

Automatic regulation system for the gas dynamic mode of a continuous furnace

37

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. Сухоносова²

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

² tgobuhova@gmail.com

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

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

Введение

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

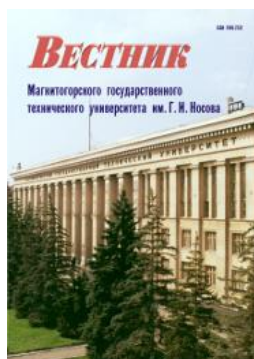
Например, кривые разгона по температуре поверхности нагреваемой заготовки в первой сварочной зоне методической печи №1 стана 2500 ОАО «ММК» (до реконструкции) при различных величинах расхода природного газа во второй сварочной зоне представлены на рис. 1. [2]. Динамические параметры, полученные при обработке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

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.

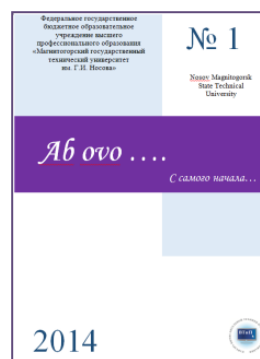
Другие рекомендуемые периодические издания



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

Приглашаем ВАС принять участие
в Универсиаде «Путь к успеху»
по направлению Управление в технических системах
(метрология и средства измерения)

Участие бесплатное

Кто может участвовать: обучающиеся или закончившие обучение в образовательных организациях высшего образования в России и за рубежом по образовательным программам бакалавриата, специалитета по направлениям:

- 27.03.04 «Управление в технических системах»;
- 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника»;
- 12.03.01 «Приборостроение»;
- 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»;
- 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника»;
- 27.03.01 «Стандартизация и метрология»;
- 15.03.06 «Мехатроника и робототехника».

Условия участия: Для участия необходимо пройти регистрацию на портале Универсиады <http://univer.magtu.ru/> и выбрать Секции > Универсиада > 2023 год > Управление в технических системах (метрология и средства измерения)

Календарь проведения:

- с **11.01.2023 по 28.02.2023 г.** – регистрация участников и прохождение отборочного этапа в заочной форме с использованием дистанционных образовательных технологий в форме тестирования;
- с **09.03.2023 по 17.03.2023 г.** – заключительный этап проводится в очной форме письменно в один из указанных дней. Информация о конкретной дате, месте и времени проведения заключительного этапа будет размещена дополнительно на портале Универсиады и интернет-странице кафедры АСУ <https://www.magtu.ru/sveden/struct/instituty-fakultety-kafedry/institut-energetiki-i-avtomatizirovannykh-sistem/kafedry-instituta/napravlenie-avtomatizirovannye-sistemy/kafedra-avtomatizirovannykh-sistem-upravleniya.html>

Место проведения: 455000 Россия, Челябинская область, г. Магнитогорск, пр. Ленина 38, корпус 1, ауд.448,450

Призы и награды: победителям будут предоставлены дополнительные баллы при поступлении в магистратуру ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», а также возможность поучаствовать в конкурсе на получение грантов; диплом участника, победителя (призёра). Также всем участникам выдаются электронные сертификаты, которые украсят личное портфолио.

Подробная информация о регламенте проведения Универсиады, сроках, составе участников, победителях и призерах размещается на официальном портале Универсиады <http://univer.magtu.ru/> и интернет-странице кафедры АСУ

По всем вопросам обращаться к координатору Универсиады: Сухоносковой Татьяне Геннадьевне, ауд. 447, e-mail: tgobuhova@gmail.com , t.suhonosova@magtu.ru, тел. 8-(3519)-29-85-58

С уважением,

Оргкомитет кафедры АСУ по Универсиаде «Путь к успеху»-2023

контактный адрес и телефон: г. Магнитогорск, пр. Ленина 38, кор.1, ауд.447

УДК 621.314.21.042.52

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МЕТОДА КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ ДВУХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО СОЕДИНЕННЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАССЕЯНИЯ ОБМОТОК ПО ОТДЕЛЬНОСТИ

В.Д. Павлов

Владимирский электромеханический завод, Владимир, Россия

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

Аннотация. Целью исследования является построение математической модели метода обычной точности для определения рассеяния обмоток трансформатора по отдельности. Для этого у двух идентичных трансформаторов последовательно соединяются как первичные, так и вторичные обмотки. Выходные зажимы объединенной схемы закорачиваются.

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

Реактивные сопротивления рассеяния обмоток трансформатора классически определяют методом короткого замыкания [1–3].

Упрощенная схема замещения для этого случая представлена на рис. 1.

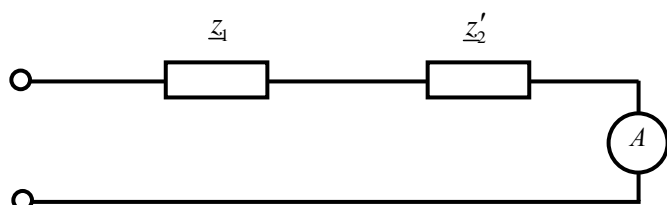


Рис. 1. Схема замещения КЗ трансформатора

Из схемы следует, что классическим методом можно определить лишь суммарное реактивное сопротивление рассеяния обмоток.

В качестве сопротивления одной из обмоток принято считать половину суммарного сопротивления.

Однако это справедливо лишь в том случае, если первичная и вторичная обмотки расположены на разных стержнях.

В силовых трансформаторах практически так не бывает [4, 5].

Реактивные сопротивления обмоток, расположенных концентрически на одном стержне, не только не равны – они имеют противоположный характер реактивности [6]. В [7, 8] описаны методы определения рассеяния обмоток по отдельности, которые подтверждают это обстоятельство.

Указанные методы являются высокоточными. Для их осуществления необходимы измерительные приборы, с помощью которых измеряются не только не только значе-

ния величин, но и их фаза. Это ограничивает возможность применения указанных методов.

Целью исследования является построение математической модели метода обычной точности для определения рассеяния обмоток трансформатора по отдельности.

Для этого у двух идентичных трансформаторов последовательно соединяются как первичные, так и вторичные обмотки, как показано на рис. 2.

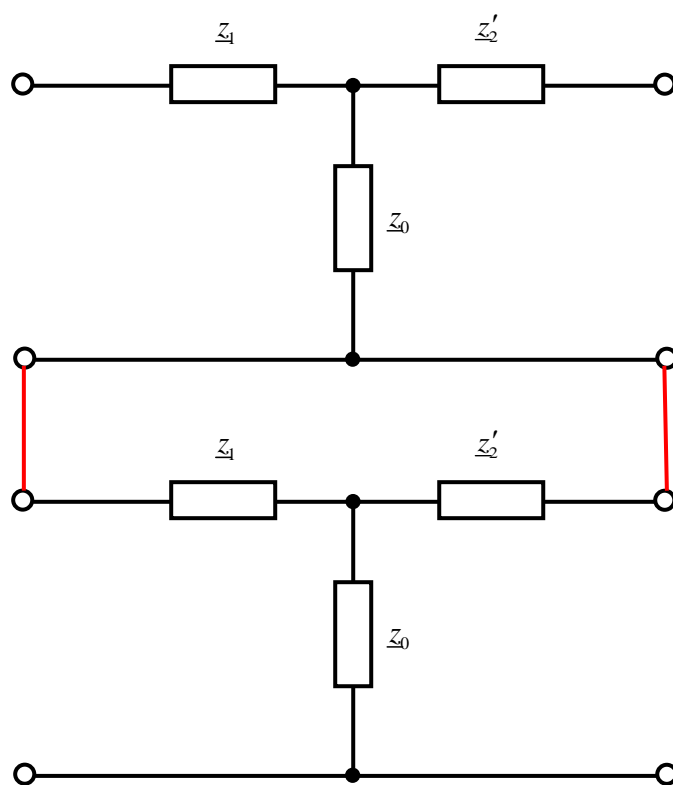


Рис. 2. Последовательное соединение трансформаторов

Выходные зажимы объединенной схемы закорачиваются. В результате схема замещения принимает вид, представленный на рисунке 3.

Ввиду того, что величины z_1 и z_2 значительно меньше z_0 , справедливо соотношение

$$U_{bc} \approx 0,5U_{ac}.$$

Но $U_{ac} = U_{z2}$, следовательно,

$$z_2 = \frac{2U_{bc}}{I_2'}.$$

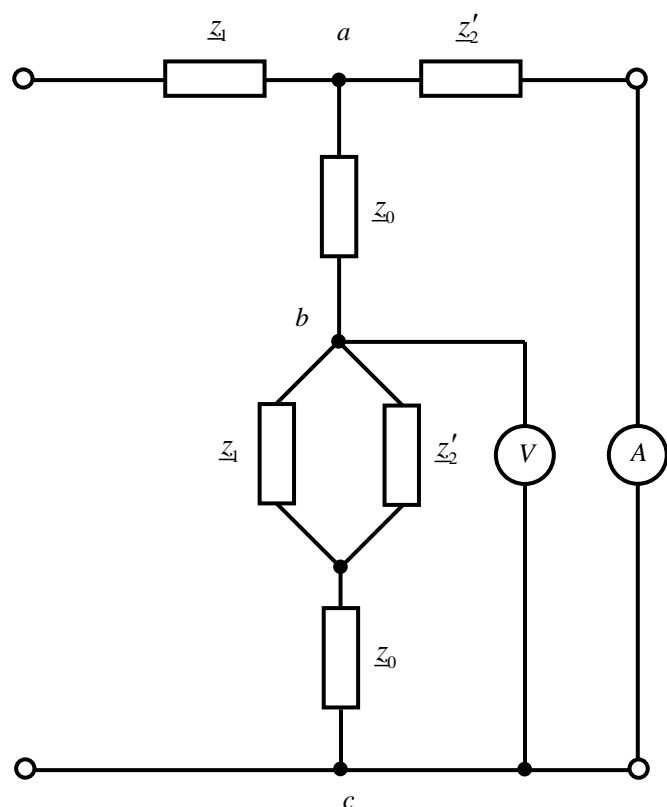


Рис. 3. Схема замещения для метода

Величины r_1 , r_2 , $x_k = x_1 + x_2$ определяются известными экспериментальными методами.

$$x_2 = \sqrt{z_2'^2 - r_2'^2},$$

$$x_1 = x_k - x_2.$$

Кроме того, последний результат может быть получен с использованием обратности трансформатора.

$$z_1 = \frac{2^2 U_{bc}}{I_1'^2},$$

$$x_1 = \sqrt{z_1'^2 - r_1'^2}.$$

Пример. Два идентичных трансформатора ОСМ-1,00 соединены по схеме в соответствии с рис. 3. Измеренные величины: $U_{bc} = 1,2$ В; $I_2' = 3,9$ А; $r_1 = 1,1$ Ом; $r_2' = 0,2$ Ом; $x_k = 0,52$ Ом.

$$z_2' = \frac{2U_{bc}}{I_2'} = \frac{2 \cdot 1,2}{3,9} = 0,62 \text{ (Ом)},$$

$$x_2' = \sqrt{z_2'^2 - r_2'^2} = \sqrt{0,62^2 - 0,2^2} = 0,59 \text{ (Ом)},$$

$$x_1 = x_k - x_2' = 0,52 - 0,59 = -0,07 \text{ (Ом)}.$$

Полученное значение хорошо согласуется с результатами высокоточных экспериментальных методов [2, 3].

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

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

Рассмотренный метод дополняет перечень способов определения рассеяния обмоток трансформатора по отдельности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кантор В.В. К расчёту индуктивности рассеяния обмоток трансформаторов // Электротехника. 2009. № 4. С. 51–55.
2. Иванова Т.Г., Шевцов В.М. Определение по цифrogramмам индуктивности рассеяния обмоток силового трансформатора // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2013. № 1. С. 88–91.
3. Лихачев Д.И. Аналитический расчет индуктивности рассеяния трансформаторов машин контактной сварки // Евразийский союз ученых. 2015. № 12-5 (21). С. 70–72.
4. Лицин К.В., Орехов В.В., Сарманов Т.М. Сравнительный анализ системы управления векторно-импульсного пуска при наличии промежуточных трансформаторов и без них // Автоматизированные технологии и производства. 2016. № 1 (11). С. 74–76.
5. Лицин К.В., Басков С.Н. Пуск высоковольтных электродвигателей с промежуточным трансформатором // Автоматизированные технологии и производства. 2013. № 5 (11). С. 185–187.
6. Марквардт Е. Г. Об электромагнитном рассеянии // Электричество. 1935. № 9. С. 44–51.
7. Павлов В.Д. Математическая модель высокоточного метода холостого хода определения рассеяния обмоток трансформатора по отдельности // Автоматизированные технологии и производства. 2021 № 2 (24). С. 11–13.
8. Павлов В.Д. Математическая модель высокоточного метода короткого замыкания для определения рассеяния обмоток трансформатора по отдельности // Автоматизированные технологии и производства. 2022 № 1 (25). С. 14–16.
9. Попов И.П. Искусственный емкостный маховик с возможностью автоматического регулирования момента инерции // Автоматизированные технологии и производства. 2020. № 2 (22). С. 29-31.
10. Попов И.П. Инертно-индуктивные колебания в мехатронных системах // Автоматизированные технологии и производства. 2022 № 1 (25). С. 23–25.

MATHEMATICAL MODEL OF THE SHORT-CIRCUIT METHOD OF TWO TRANSFORMERS CONNECTED IN SERIES TO DETERMINE THE SCATTERING WINDINGS INDIVIDUALLY

V.D. Pavlov

Vladimir Electromechanical Plant, Vladimir, Russia

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

Abstract. The aim of the study is to build a mathematical model of the ordinary accuracy method for determining the scattering of transformer windings separately. To do this, two identical transformers are connected in series with both primary and secondary windings. The output terminals of the combined circuit are shorted.

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

REFERENCES

1. V. V. Kantor To the calculation of the leakage inductance of transformer windings [K raschotu induktivnosti rasseyaniya obmotok transformatorov]. *Elektrotehnika [Electrical Engineering]*, 2009, no. 4, pp. 51–55. (in Russian)
2. Ivanova T.G., Shevtsov V.M. Determination of the leakage inductance of the windings of a power transformer by digits [Opredeleniye po tsifro-grammam induktivnosti rasseyaniya obmotok silovogo transformatora]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika [Proceedings of higher educational institutions. Electromechanics]*, 2013, no. 1, pp. 88–91. (in Russian)
3. Likhachev D.I. Analytical calculation of the leakage inductance of transformers of resistance welding machines [Analiticheskiy raschet induktivnosti rasseyaniya transformatorov mashin kontaktной svarki]. *Yevraziyskiy soyuz uchenykh [Eurasian Union of Scientists]*, 2015, no. 12-5 (21), pp. 70–72. (in Russian)
4. Litsin K.V., Orekhov V.V., Sarmanov T.M. Comparative analysis of the vector-pulse start control system with and without intermediate transformers [Sravnitel'nyy analiz sistemy upravleniya vektorno-impul'snogo pushka pri nalichii promezhutochnykh transformatorov i bez nikh]. *Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva [Automated technologies and production]*, 2016, no. 1 (11), pp. 74–76. (in Russian)
5. Litsin K.V., Baskov S.N. Start of high-voltage electric motors with an intermediate transformer [Pushk vysokovol'tnykh elektrodvigatelyey s promezhutochnym transformatorom]. *Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva [Automated technologies and production]*, 2013, no. 5 (11), pp. 185–187. (in Russian)
6. Marquardt E.G. On electromagnetic scattering [Ob elektromagnitnom rasseyanii]. *Elektrichestvo [Electricity]*, 1935, no. 9, pp. 44–51. (in Russian)
7. Pavlov V.D. Mathematical model of the high-precision no-load method for determining the scattering of transformer windings separately [Matematicheskaya model' vysokotochnogo metoda kholostogo khoda opredeleniya rasseyaniya obmotok transformatora po otdel'nosti]. *Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva [Automated technologies and production]*, 2021, no. 2 (24), pp. 11–13. (in Russian)
8. Pavlov V.D. Mathematical model of a high-precision short circuit method for determining the scattering of transformer windings separately [Matematicheskaya model' vysokotochnogo metoda korotkogo zamykaniya dlya opredeleniya rasseyaniya obmotok transformatora po otdel'nosti]. *Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva [Automated technologies and production]*, 2022, no. 1 (25), pp. 14–16. (in Russian)
9. Popov I.P. Artificial capacitive flywheel with the ability to automatically control the moment of inertia [Iskusstvennyy yemkostnyy makhovik s vozmozhnost'yu avtomaticheskogo regulirovaniya momenta inertsi]. *Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva [Automated technologies and production]*, 2020, no. 2 (22), pp. 29–31. (in Russian)
10. Popov I.P. Inert-inductive oscillations in mechatronic systems [Inertno-induktivnyye kolebaniya v mekhatronnykh sistemakh]. *Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva [Automated technologies and production]*, 2022, no. 1 (25), pp. 23–25. (in Russian)

Павлов, В.Д. Математическая модель метода короткого замыкания двух последовательно соединенных трансформаторов для определения рассеяния обмоток по отдельности / В.Д. Павлов // Автоматизированные технологии и производства. 2022. №2(26). С.4-6.

V.D. Pavlov Mathematical model of the short-circuit method of two transformers connected in series to determine the scattering windings individually. *Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva [Automation of technologies and production]*, 2022, no.2(26), pp.4-6. (In Russian).

УДК 621.785.52:543.27

КОНТРОЛЬ УГЛЕРОДНОГО ПОТЕНЦИАЛА В ГАЗОВОЙ ЦЕМЕНТАЦИИ

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

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

dubrovskay576@gmail.com, ig.samarina@magtu.ru

Аннотация. Рассмотрен процесс газовой цементации, как частых способов химико-термической обработки деталей. В данном процессе большое внимание уделяют контролю концентрации углеродного потенциала. Поэтому в статье рассмотрены методы и средства измерения углеродного потенциала печной атмосферы и возможная реализация системы управления

Ключевые слова: углеродный потенциал, цементация, газ, контроль, газоанализатор, кислородный зонд

ВВЕДЕНИЕ

Газовая цементация металла – один из частых способов химико-термической обработки деталей с целью повышения поверхностной твердости стали, ее износостойкости и усталостной прочности при одновременном сохранении вязкости сердцевины. Результат цементации (нитроцементации) оценивают по требуемой твердости, заданной глубине слоя и равномерности распределения углерода. Изменение содержания углерода от поверхности к сердцевине создает комбинацию свойств деталей машин из определенных марок стали с высокой поверхностной прочностью и вязкой сердцевиной [1].

Суть процесса цементации заключается в поверхностном диффузном насыщении стали углеродом с помощью углеродосодержащих газов. Цементации подвергают низкоуглеродистые стали. Обогащение поверхностного слоя до структуры заэвтектоидной с концентрацией углерода на поверхности в границах 1,1 - 1,2 % и с последующей термической обработкой помогает достичь высокой твердости и износостойчивости поверхности металла, сохраняя при этом вязкость ее сердцевины.

Одним из главных технологических параметров цикла цементации (нитроцементации) является точность поддержания углеродного потенциала [2].

МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ УГЛЕРОДНОГО ПОТЕНЦИАЛА

Управление процессом газовой цементации предполагает измерение процентного содержания углерода в печной атмосфере.

Углеродный потенциал, можно определить, как растворимость углерода в железе или равновесную концентрацию углерода в образце из железа, выдержанном в среде данного состава при данной температуре.

Управление углеродным потенциалом возможно путем уменьшения количества подаваемого атмосферного воз-

духа, что приводит к увеличению углеродного потенциала, или путем увеличения количества подаваемого атмосферного воздуха, что приводит к уменьшению углеродного потенциала [4].

В практике химико-термической обработки применяются, в основном, два метода контроля углеродного потенциала, основанных на измерении термодинамических параметров печной атмосферы.

Система, основанная на первом методе, использует в качестве датчика инфракрасный оптико-акустический (ИК) газоанализатор для измерения концентрации двуокиси углерода в печной атмосфере. Существенным недостатком для практического применения этой технологии является необходимость транспортировки образца печной атмосферы к газоанализатору.

Система, основанная на втором методе, использует в качестве датчика кислородный зонд в печной атмосфере - это датчик уровня кислорода в газовой смеси, который действует по принципу гальванического элемента с твердым электролитом в виде керамики из диоксида циркония (ZrO_2). Иначе говоря, это стандартный зонд, функционирующий по принципу использования ионов кислорода, проходящих через сенсорный элемент, для генерации высоко-низкого напряжения переключения. Схема кислородного зонда представлена на рис. 1. Принцип работы кислородного зонда заключается в образовании мембранного потенциала, который возникает между двумя электродами датчика. Один электрод анализирует газ, а второй - атмосферный воздух. Разность потенциалов возникает при нагревании электролита, когда через него происходит движение ионов кислорода от атмосферного воздуха и таким образом он оценивает количество оставшегося свободного кислорода в углекислом газе. Напряжение, возникающее на электродах датчика, зависит от концентрации кислорода в науглероживающей атмосфере. Чем она выше, тем ниже напряжение. Диапазон напряжений сигнала кислородного зонда находится в пределах от 100 до

900 мВ. Таким образом, это единственный зонд, доступный для измерения газа на месте при науглероживании металла. Недостатком является внешний электрод зонда, который должен быть очень хорошим электрическим проводником. Также данные зонды отличаются малой инерционностью, что способствует обеспечить точность измерения не более 0,17 % от величины содержания углерода на поверхности металла [5].

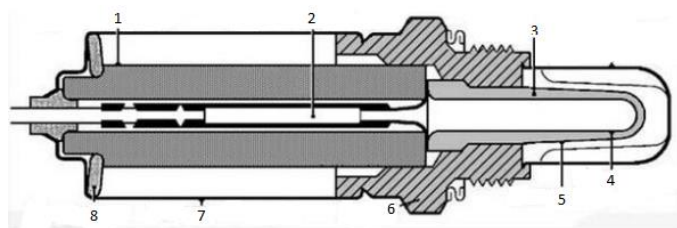


Рис. 1 – Схема кислородного зонда

1 – защитный слой; 2 – контактный элемент; 3 – чувствительный элемент; 4 – электрод (+); 5 – электрод (-); 6 – корпус; 7 – защитный кожух; 8 – уплотнение

Также для контроля процесса регулирования углеродного потенциала атмосферы применяют методы прямого и косвенного измерения.

Суть прямого метода или по-другому «метода фольги», заключается в определении изменения электрического сопротивления датчика, который представляет собой тонкую проволоку, сделанную из технического чистого железа или фольги в результате его науглероживания в химико-термической обработке. Схема определения углеродного потенциала с помощью фольги, показана на рис. 2.

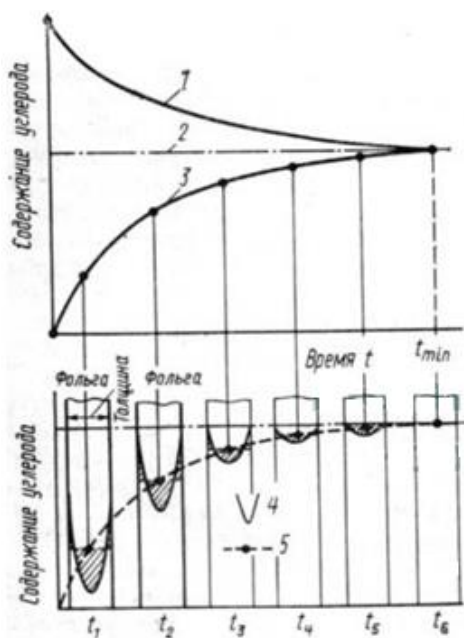


Рис. 2 – Схема определения углеродного потенциала с помощью фольги
1 – фольга с высоким содержанием углерода; 2 – С-потенциал; 3 – фольга с низким содержанием углерода; 4 – изменение содержания углерода по сечению фольги; 5 – результат аналитического определения содержания углерода по всей фольге

При данном методе необходимо учитывать все возможные колебания температурного режима, давления и составляющие компоненты газа в печи.

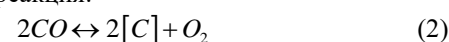
При косвенном методе контроля и регулирования углеродного потенциала осуществляется отбор пробы газа из газогенератора или непосредственно из печи и производится анализ пробы на содержание воды или углекислого газа, или природного газа.

Газ в зависимости от содержания углеродного потенциала может весьма гибко воздействовать на одну и ту же сталь, т. е. может науглеродить и обезуглеродить ее поверхностные слои или находиться с ней в состоянии равновесия без какого-либо изменения состава поверхностного слоя [5].

Современные косвенные методы базируются на измерении в печной атмосфере концентрации какой-либо из пары газов: оксида и диоксида углерода или оксида углерода и кислорода. В первом случае основополагающей является реакция:



Для метода определения углеродного потенциала по содержанию кислорода в науглероживающей атмосфере основной является реакция:



Таким образом, углеродный потенциал в печной атмосфере может быть определен функцией содержания трех газов: окиси углерода (CO) и диоксида углерода (CO₂).

Для определения концентрации окиси углерода и диоксида углерода в печной атмосфере можно использовать инфракрасный газовый сенсор Gassard NG производства компании Edinburgh Instruments Ltd, вид которого представлен на рис. 3.

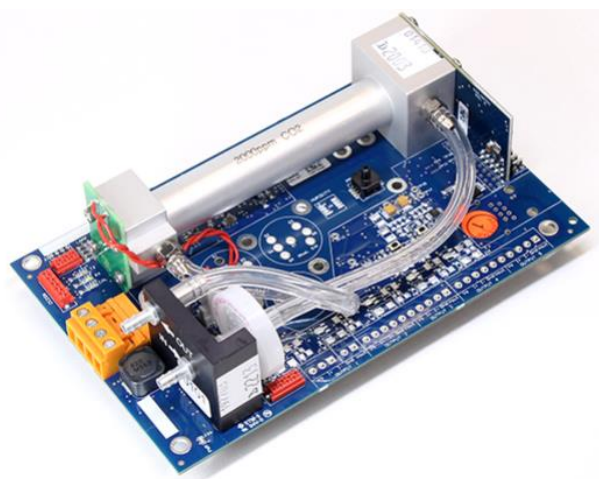


Рис. 3 – Инфракрасный газовый сенсор Gassard NG

Изменение содержания CO при науглероживании напрямую влияет на точность углеродного потенциала, определенного с использованием кислородного зонда, инфракрасного анализатора CO₂ или точки росы [6].

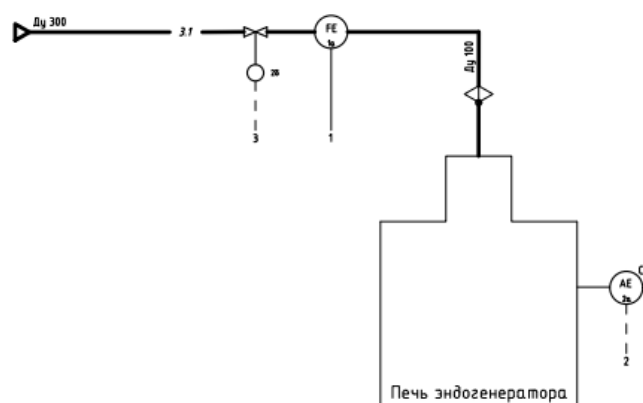
ТЕХНИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ КОНТУРА КОНТРОЛЯ УГЛЕРОДНОГО ПОТЕНЦИАЛА

Схема автоматизации контура управления углеродного потенциала представлена на рис. 4.

Чувствительный элемент для измерения расхода газов диафрагма DKS 0,6 – 200, поз. 1а. Информация с диафрагмы поступает в расходомер MSY-3-3, поз. 1б. Далее

электрический сигнал на управляющий контроллер SIMATIC S7-400, поз. РМК. Газы смешиваются в смесителе и подаются в печь эндогенератора. В печи стоит газоанализатор Eurotherm-AC2081115030, поз. 2а, который измеряет углеродный потенциал в газе и отправляет его на управляющий контроллер. Контроллер формирует управляющее воздействие и подает его на исполнительный механизм M-9 Y4065AC08Q, поз. 2б. Если количество углерода будет больше заданного, исполнительный механизм по средствам регулирующего органа добавляет необходимое количество атмосферного воздуха в печь; а в случае, если количество углерода будет меньше заданного, уменьшает подачу атмосферного воздуха в печь [7, 8].

Для визуализации всего процесса используется промышленный компьютер SIMATIC HMI KP400 Basic color, поз. ПК [9]. С его помощью производится визуализация текущих параметров и выбор режима управления (автоматический или дистанционный).



Приборы по месту			
Управляющий контроллер			
HMI			
Параметр	Расход воздуха в смеситель	Концентрация углеродного потенциала	Регулирование расхода воздуха

Рис. 4. Схема автоматизации контура управления углеродного потенциала

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, для того чтобы получить качественный поверхностный слой стальных деталей с требуемыми свойствами поверхности необходимо сделать своевременный и правильный выбор контролируемой атмосферы в процессе газовой цементации.

По мировому опыту, более предпочтительным является применение метода измерения состава

атмосферы печей, основанных на использовании ИК-газоанализаторов.

ЛИТЕРАТУРА

- Жила В. А. Газораспределительные системы и газопотребляющее оборудование: учебник / В. А. Жила, Е. Б. Соловьева, А. А. Малышева. – Москва: Лань, 2020. – 38с. — ISBN 978-5-7264-2197-1. –Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/145077> (дата обращения: 16.12.2022). — Режим доступа: для авториз. пользователей.
- Болеслав В.В. Автоматические системы управления технологическими процессами газовой цементации/ В.В. Болеслав, В.Б. Попов // Современные технологии автоматизации. – 2012. – Т. 2, №1. – С. 56-64.
- https://metallichekiy-portal.ru/articles/plavka_i_rozliv/processi_termoobrabotki_v_gazovoi_atmosfere (дата обращения 28.12.2022) Процессы термообработки в газовой атмосфере. Центральный металлический портал
- Майсурадзе М. В. Цементация, нитроцементация и азотирование стальных изделий: учеб. пособие / М. В. Майсурадзе, М.А. Рыжков, С.В. Беликов [и др.]; Министерство образования и науки Российской Федерации, Уральский федеральный университет. — Екатеринбург: Урал. Ун-та, 2021. — 102 с.: ил. — ISBN 978-5-7996-3199-4. — Текст: непосредственный.
- Шибенко А.С. Газоснабжение: учебник / А. С. Шибенко. — Санкт-Петербург: Лань, 2015. — 520с. — ISBN 978-5-8114-3662-0. — Текст: электронный // Лань: Электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/125714> (дата обращения: 30.12.2021). — Режим доступа: для авториз. пользователей.
- Самарина, И. Г. Метрология и технические измерения: практикум / И. Г. Самарина, Е. Ю. Мухина, А. Р. Бондарева. – Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2021. – 57 с. – ISBN 978-5-9967-2154-2.
- Дубровская А.А. Система автоматического управления составом эндогаза / А.А. Дубровская, Е.Ю. Мухина // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: тезисы докл. 80-й международной научно-технической конф. (Магнитогорск, 18–22 апреля 2022 года.) – Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2022. – С. 354. – EDN EAPBOB.
- Мухина, Е. Ю. Автоматизация технологических процессов: практикум / Е. Ю. Мухина, А. Р. Бондарева. – Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2017. – 110 с.
- Парсункин, Б. Н. Автоматизация технологических процессов и производств в металлургии: Курс лекций / Б. Н. Парсункин, С. М. Андреев, Е. С. Рябчикова. – Магнитогорск, 2011. – 151 с.

CONTROL OF CARBON POTENTIAL IN GAS CARBURIZATION

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

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract. The process of gas carburizing is considered as a frequent method of chemical-thermal treatment of parts. In this process, great attention is paid to the control of the concentration of carbon potential. Therefore, the article considers methods and means for measuring the carbon potential of the furnace atmosphere and the possible implementation of a control system.

Keywords: carbon potential, carburizing, gas, control, gas analyzer, oxygen probe.

REFERENCES

1. Zhila V.A., Solovyeva E.B., Malysheva A.A. *Gazoraspredeletelnye sistemy i gazopotreblyayushchee oborudovanie* [Gas distribution systems and gas consuming equipment], Moscow, Lan, 2020. – 38 p.
2. Boleslav V.V., Popov V.B. Automatic control systems for technological processes of gas carburizing [Avtomaticheskie sistemy upravleniya tekhnologicheskimi protsessami gazovoy tsementatsii], *Sovremennye tekhnologii avtomatizatsii [Modern automation technologies]*, 2012, no.1(2), pp. 56-64
3. https://metallichekiy-portal.ru/articles/plavka_i_rozliv/processi_termoobrabotki_v_gazovoi_atmosfere (28 December 2022)
Protsessy termoobrabotki v gazovoy atmosfere. Tsentralnyy metallicheskiy portal [Heat treatment processes in a gaseous atmosphere. Central metal portal]. Available at: https://metallichekiy-portal.ru/articles/plavka_i_rozliv/processi_termoobrabotki_v_gazovoi_atmosfere (accessed 28 December 2022).
4. Maysuradze M. V., Ryzhkov M.A., Belikov S.V. *Tsementatsiya, nitrotsementatsiya i azotirovanie stalnykh izdeliy: uchebnoye posobiye* [Carburizing, carbonitriding and nitriding of steel products: study guide], Ekaterinburg, Ural. federalnyy universitet., 2021, 102 p
5. Shibenko A.S. *Gazosnabzhenie* [Gas supply], St. Petersburg, Lan, 2015, 520 p.
6. Samarina I.G., Mukhina E. Yu., Bondareva A. R. *Metrologiya i tekhnicheskie izmereniya: praktikum* [Metrology and technical measurements: study guide], Magnitogorsk, Magnitogorsk State Technical University. G.I. Nosova, 2021, 57 p.
7. Dubrovskaya A.A., Mukhina E. Yu. Endogas Composition Automatic Control System [Sistema avtomaticheskogo upravleniya sostavom endogaza], *Trudy "Aktualnye problemy sovremennoy nauki, tekhniki i obrazovaniya"*, Magnitogorsk, 2022, pp 354.
8. Mukhina E. Yu., Bondareva A. R. *Avtomatizatsiya tekhnologicheskikh protsessov: praktikum* [Automation of technological processes: workshop], Magnitogorsk, Magnitogorsk State Technical University. G.I. Nosova, 2021, 110 p.
9. Parsunkin B.N., Andreev S.M., Ryabchikova E.S. *Avtomatizatsiya tekhnologicheskikh processov i proizvodstv v metallurgii* [Automation of technological processes and production in metallurgy], Magnitogorsk, 2011, 151 p.

Дубровская, А.А. Контроль углеродного потенциала в газовой цементации / А.А. Дубровская, К.В. Абрамкин, И.Г. Самарина // Автоматизированные технологии и производства. 2022. №2(26). С.7-10.

A.A. Dubrovskaya, K.V. Abramkin, I.G. Samarina Measurement of Carbon Potential in Gas Carburization. *Avtomatizirovannye tekhnologii i proizvodstva* [Automation of technologies and production], 2022, no.2(26), pp.7-10. (In Russian).

ПЕРЕХОДНЫЙ ПРОЦЕСС В ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕ С УПРУГОЙ НАГРУЗКОЙ В СОСТАВЕ МЕХАТРОНОГО КОМПЛЕКСА

В.Д. Павлов

Владимирский электромеханический завод, Владимир, Россия

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

Аннотация. В работе показано, что при подключении пьезоэлектрического преобразователя с упругой нагрузкой к источнику постоянного напряжения происходит переходный процесс, неотличимый от процесса зарядки конденсатора.

Ключевые слова: пьезоэлектрический преобразователь, переходный процесс, упругая нагрузка, постоянное напряжение.

Электромеханические преобразователи могут иметь различный характер реактивности в зависимости от вида их механической нагрузки [1–3].

Целью работы является установление характера переходного процесса при подключении пьезоэлектрического преобразователя с упругой нагрузкой к источнику постоянного напряжения.

Пусть активное сопротивление $R \neq 0$ и коэффициент трения $b \neq 0$, начальные условия $x(0) = x_0$.

Уравнение механического равновесия запишется

$$d_2 u_{\text{п}} = kx + b \frac{dx}{dt}. \quad (1)$$

Баланс напряжений в соответствии со вторым законом Кирхгофа, с учетом (1)

$$U = u_{\text{п}} + Ri = \frac{k}{d_2} x + \frac{b}{d_2} \frac{dx}{dt} + Rd_1 \frac{dx}{dt},$$

$$\frac{dx}{dt} + \frac{k}{b + Rd_1 d_2} x = \frac{U d_2}{b + Rd_1 d_2}, \quad (2)$$

Решение дифференциального уравнения ищется в виде:

$$x = x_1 + x_2,$$

где

$$x_1 = C_1 e^{-\frac{k}{b+Rz}t},$$

$$x_2 = C_2.$$

При подстановке x_2 в (2)

$$0 + \frac{k}{b + Rz} C_2 = \frac{U d_2}{b + Rz},$$

$$C_2 = \frac{U d_2}{k},$$

$$x = C_1 e^{-\frac{k}{b+Rz}t} + \frac{U d_2}{k},$$

$$C_1 = x_0 - \frac{U d_2}{k},$$

$$x = \left(x_0 - \frac{U d_2}{k} \right) e^{-\frac{k}{b+Rz}t} + \frac{U d_2}{k}.$$

Производная последнего выражения

$$\frac{dx}{dt} = \frac{i}{d_1} = \left(\frac{U d_2}{b + Rz} - \frac{x_0 k}{b + Rz} \right) e^{-\frac{t}{z/k(b/z+R)}} =$$

$$= \left(\frac{U d_2}{b + Rz} - \frac{d_2 x_0 k / d_2}{b + Rz} \right) e^{-\frac{t}{C_k(R_b+R)}}.$$

$$i = \left(\frac{U}{b/z + R} - \frac{k x_0 / d_2}{b/z + R} \right) e^{-t/\tau} =$$

$$= \frac{U - U_0}{R_b + R} e^{-t/\tau}. \quad (3)$$

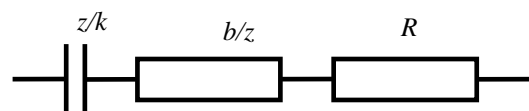
Здесь

$$R_b = \frac{b}{z},$$

$$\tau = C_k (R_b + R) = \frac{b + Rz}{k},$$

R_b – фрикционное сопротивление, τ – постоянная времени электрической цепи.

Характер протекания тока идентичен процессу зарядки конденсатора при включении источника постоянного напряжения. Решению (3) соответствует электрическая схема пьезоэлектрического преобразователя с упругой нагрузкой, представленная на рисунке.



Электрическая схема пьезоэлектрического преобразователя с упругой нагрузкой

При $U = 0$ режим аналогичен процессу разряда конденсатора.

Таким образом, при подключении пьезоэлектрического преобразователя с упругой нагрузкой к источнику постоянного напряжения происходит переходный процесс, неотличимый от процесса зарядки конденсатора.

Полученные результаты могут использоваться при разработке автоматизированных систем [4–6].

ЛИТЕРАТУРА

1. Павлов В.Д. Накопитель энергии транспортно-технологической машины с возможностью автоматического управления // Автоматизированные технологии и производства. 2021 № 2 (24). С. 7–10.
2. Попов И.П. Искусственный емкостный маховик с возможностью автоматического регулирования момента инерции // Автоматизированные технологии и производства. 2020. № 2 (22). С. 29-31.
3. Попов И.П. Инертно-индуктивные колебания в мехатронных системах // Автоматизированные технологии и производства. 2022 № 1 (25). С. 23–25.
4. Автоматизация и оптимизация управления технологическими процессами внепечной доводки стали / Е.Н. Ишметьев, С. М. Андреев, Б. Н. Парсункин [и др.]. –

Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2008. – 311

5. Васильев И.И. Моделирование и управление вакуумом десорбера установки регенерации диэтиленгликоля, при использовании контура автоматического управления, основанного на принципе нечеткой логики / И.И. Васильев, М.И. Васильев, Б.Н. Парсункин, С.М. Андреев // Автоматизированные технологии и производства. 2018. No1(17). С. 18-23. 3.
6. Донецков А.М. Автоматизация процесса разработки одежды // Автоматизированные технологии и производства. 2018. No1(17). С.10-13.

TRANSIENT PROCESS IN A PIEZOELECTRIC TRANSDUCER WITH ELASTIC LOAD AS PART OF A MECHATRON COMPLEX

V.D. Pavlov

Vladimir Electromechanical Plant, Vladimir, Russia

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

Abstract. The paper shows that when a piezoelectric transducer with an elastic load is connected to a constant voltage source, a transient process occurs that is indistinguishable from the process of charging a capacitor.

Keywords: piezoelectric transducer, transient process, elastic load, constant voltage.

REFERENCES

1. Pavlov V.D. Energy storage of a transport-technological machine with the possibility of automatic control [Nakopitel' energii transportno-tekhnologicheskoy mashiny s vozmozhnost'yu avtomaticheskogo upravleniya]. *Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva [Automated technologies and production]*, 2021, no.2(24), pp. 7-10. (In Russian).
2. Popov I.P. Artificial capacitive flywheel with the ability to automatically control the moment of inertia [Iskusstvennyy yemkostnyy makhovik s vozmozhnost'yu avtomaticheskogo regulirovaniya momenta inertsi]. *Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva [Automated technologies and production]*, 2020, no.2(22), pp.29-31. (In Russian).
3. Popov I.P. Inert-inductive oscillations in mechatronic systems [nertno-induktivnyye kolebaniya v mekhatronnykh sistemakh]. *Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva [Automated technologies and production]*, 2022, no.1(25), pp.23-25. (In Russian).
4. Parsunkin B.N., Andreev S.M., Ishmet'ev E.N. Avtomatizatsiya i optimizatsiya upravleniya tekhnologicheskimi pro-

cessami vnepechnoj dovodki stali [Automation and optimization of process control of out-of-furnace steel finishing], *Mag-nitogorsk*, 2008, 311 p.

5. Vasilyev I.I., Vasilyev M.I., Parsunkin B.N., Andreev S.M. Modeling and control vacuum desorber installation of regeneration of diethylene glycol, when used circuit of automatic control, based on the principle of fuzzy logic [Modelirovaniye i upravleniye vakuumom desorbera ustanovki regeneratsii dietilenglikolya, pri ispol'zovanii kontura avtomaticheskogo upravleniya, osnovannogo na printsipe nechetkoy logiki]. *Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva [Automated technologies and production]*, 2018, no.1(17), pp.18-23. (In Russian).

6. Donetskov A.M. Automation of the engineering process of clothing [Avtomatizatsiya protsessa razrabotki odezhdy]. *Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva [Automated technologies and production]*, 2018, no.1(17), pp.10-13. (In Russian).

Павлов, В.Д. Переходный процесс в пьезоэлектрическом преобразователе с упругой нагрузкой в составе мехатронного комплекса / В.Д. Павлов // Автоматизированные технологии и производства. 2022. №2(26). С.11-12.

V.D. Pavlov Transient Process in A Piezoelectric Transducer With Elastic Load as Part of a Mechatron Complex. *Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva [Automation of technologies and production]*, 2022, no.2(26), pp.11-12. (In Russian).

ИНДУКТИВНО-ИНДУКТИВНЫЕ КОЛЕБАНИЯ В СИСТЕМАХ АВТОМАТИКИ

И.П. Попов

Центр высоких технологий, Москва, Россия

e-mail: i.popow@yandex.ru

Аннотация. Рассматривается электрическая колебательная система, состоящая из однородных элементов – двух катушек индуктивности. Показана возможность возникновения в такой системе свободных гармонических колебаний.

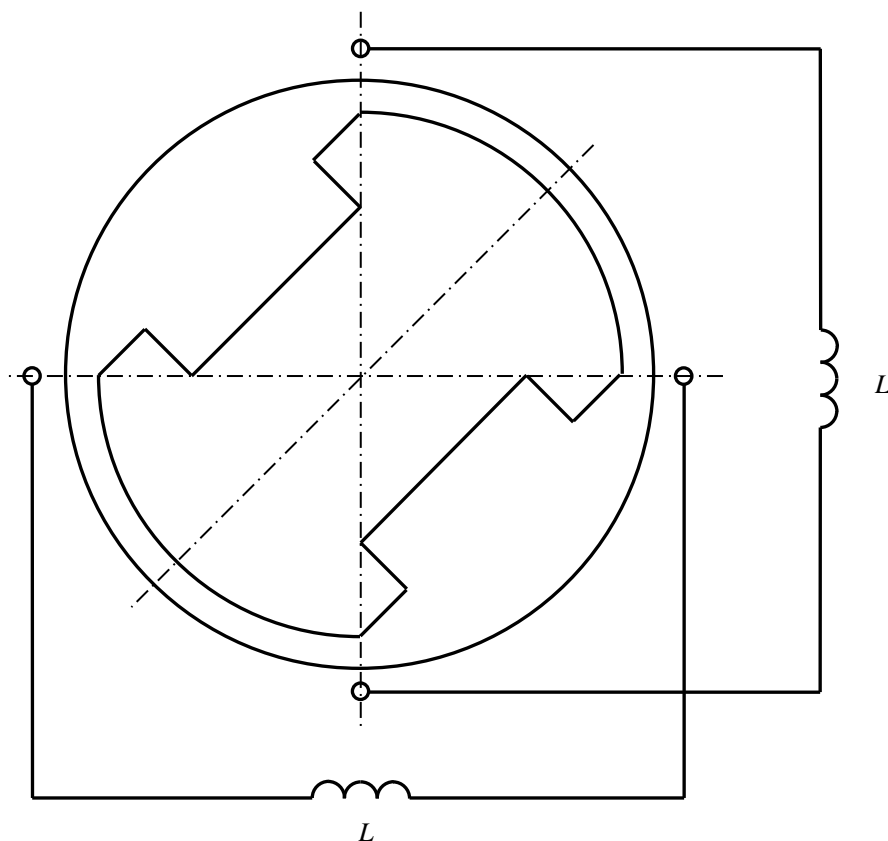
Ключевые слова: колебательная система, индуктивность, гармонические, частота.

В электрическом колебательном LC -контуре происходит взаимное преобразование энергии магнитного поля катушки индуктивности в энергию электрического поля конденсатора. Индуктивность L и емкость C имеют взаимно противоположный характер реактивности. В связи с этим колебательный LC -контур можно рассматривать в качестве *биреактивной* системы. Характерным свойством этой системы является то, что она имеет фиксированную собственную частоту свободных колебаний $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$. Другим ее свойством является то, что сдвиг по фазе между колебаниями энергии элементов составляет $\pi/2$.

Ниже рассматривается колебательная система с однородными элементами, а именно, индуктивно-индуктивная

LL -система и возникновение в ней свободных гармонических колебаний. Поскольку реактивный характер каждого из двух элементов, входящих в LL -систему взаимно идентичен, ее можно рассматривать в качестве *монореактивной* системы.

LL -система. На рисунке изображена LL колебательная система, выполненная в виде двух одинаковых катушек индуктивности, связанных посредством двухфазной синхронной индуктивной электрической машины [1], ротором которой является постоянный магнит.



Индуктивно-индуктивная колебательная система

Катушки индуктивностью L подключены к фазным обмоткам статора. Число витков каждой обмотки статора n , длина активной части витка l , индукция магнитного поля B . Активное сопротивление обмоток и соединительных проводников полагаются равными нулю. Индуктивность обмоток входит в L . Вращающий момент равен нулю.

При названных допущениях условия электрического и механического равновесия в соответствии с законом электромагнитной индукции, вторым законом Кирхгофа, законом Ампера и аналогом третьего закона Ньютона для моментов запишутся

$$\begin{cases} Bl nR \frac{d\varphi}{dt} \sin \varphi = L \frac{di_1}{dt} \\ Bl nR \frac{d\varphi}{dt} \cos \varphi = L \frac{di_2}{dt} \\ Bl n_1 R \sin \varphi = -Bl n_2 R \cos \varphi \end{cases}$$

При интегрировании первых двух уравнений

$$i_1 = -\frac{Bl nR}{L} \cos \varphi + A_1,$$

$$i_2 = \frac{Bl nR}{L} \sin \varphi + A_2$$

и подстановке в третье получается тождество при условии

$$A_1 = A_2 = 0.$$

Здесь A_1, A_2 – постоянные интегрирования. Другими словами, суммарный момент равен нулю при любом характере вращения ротора.

Пусть начальные условия

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

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

В соответствии с аналогом первого закона Ньютона для вращательного движения

$$\frac{d\varphi}{dt} = \omega_0,$$

$$\varphi = \int \omega_0 dt = \omega_0 t + A = \omega_0 t + \varphi_0.$$

Тогда

$$i_1 = -\frac{Bl nR}{L} \cos(\omega_0 t + \varphi_0) = -\frac{Bl nR \omega_0}{L \omega_0} \cos(\omega_0 t + \varphi_0) =$$

$$= -\frac{E}{X_L} \cos(\omega_0 t + \varphi_0),$$

$$i_2 = \frac{Bl nR}{L} \sin(\omega_0 t + \varphi_0) = \frac{E}{X_L} \sin(\omega_0 t + \varphi_0).$$

Таким образом, в системе с двумя катушками индуктивности происходят свободные гармонические колебания электрического тока.

В рассмотренной колебательной системе происходит взаимный обмен энергией между магнитными полями индуктивных элементов. При $\varphi = 0$ энергия магнитного поля первого индуктивного элемента максимальна, а второго – равна нулю. После этого ток во втором элементе начинает возрастать за счет энергии магнитного поля первого элемента, ток которого начинает уменьшаться.

Замечание 1. В качестве индуктивных элементов LL -системы могут использоваться не только катушки индуктивности, но и устройства, обладающие эквивалентной индуктивностью, обусловленной неэлектрическими параметрами, например, массой и коэффициентом упругости [2].

Замечание 2. В LL -системе ротор синхронной машины может содержать обмотку возбуждения.

Замечание 3. Как и в электрическом биреактивном колебательном LC -контуре в рассмотренной монореактивной колебательной LL -системе фазы колебаний энергии катушек сдвинуты на $\pi/2$.

Замечание 4. В отличие от колебательного LC -контур частота свободных колебаний LL -системы не зависит от параметров элементов системы и определяется исключительно начальными условиями. Другими словами, рассмотренная система может совершать свободные гармонические колебания с любой изначально заданной частотой.

Замечание 5. Вращающаяся часть LL -системы совершает равномерное вращательное движение без подвода энергии извне.

Замечание 6. Возможность возникновения свободных колебаний в LC -контуре обусловлена тем, что элементы колебательного контура L и C имеют противоположный характер реактивности. В колебательной LL -системе противоположная реактивность достигается суммированием пространственного сдвига ($\pi/2$) и сдвига по фазе ($\pi/2$).

Замечание 7. В монореактивной LL -системе катушки могут быть связаны между собой не только индуктивным электромеханическим преобразователем, но и синхронными электромеханическими преобразователями, построенными на иных принципах, например, магнитоэлектрическими.

Замечание 8. Индуктивно-индуктивная система может быть выполнена многофазной [3, 4].

В качестве примера многофазной монореактивной колебательной системы может рассматриваться трехфазная колебательная LLL -система, в которой три одинаковых индуктивных элемента L связаны посредством трехфазной синхронной индуктивной электрической машины.

В качестве практического аспекта рассмотренной электрической монореактивной колебательной системы может, в частности, рассматриваться возможность взаимной компенсации реактивных сопротивлений фаз в многофазных системах [5, 6].

ЛИТЕРАТУРА

1. Попов И.П. Учет амплитудно-частотных особенностей режимов нагрузки синхронной электрической машины в составе автоматизированного привода // Автоматизированные технологии и производства. 2021 № 1 (23). С. 12–15.
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. Павлов В.Д. Математическая модель высокоточного метода холостого хода определения рассеяния обмоток

трансформатора по отдельности // Автоматизированные технологии и производства. 2021 № 2 (24). С. 11–13.

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

5. Казакова Т.В. Разработка и исследование работы системы автоматической оптимизации на физической модели процесса // Автоматизированные технологии и производства. 2015. № 3 (9). С. 4–8.

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

INDUCTIVE-INDUCTIVE OSCILLATIONS IN AUTOMATION SYSTEMS

I.P. Popov

Center of High Technologies, Moscow, Russia

e-mail: i.popov@yandex.ru

Abstract. An electric oscillatory system is considered, consisting of homogeneous elements - two inductors. The possibility of occurrence of free harmonic oscillations in such a system is shown.

Keywords: oscillatory system, inductance, harmonic, frequency.

REFERENCES

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

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. Pavlov V.D. Mathematical model of the high-precision no-load method for determining the scattering of transformer windings separately [Matematicheskaya model' vysokotochnogo metoda kholostogo khoda opredeleniya rasseyaniya obmotok transformatora po otdel'nosti], *Avtomatizirovannye tehnologii i proizvodstva [Automation of technologies and production]*, 2021, no. 2 (24), pp. 11–13. (In Russian)

4. Pavlov V.D. Mathematical model of a high-precision short circuit method for determining the scattering of transformer windings separately [Matematicheskaya model' vysokotochnogo metoda korotkogo zamykaniya dlya opredeleniya rasseyaniya obmotok transformatora po otdel'nosti], *Avtomatizirovannye tehnologii i proizvodstva [Automation of technologies and production]*, 2022, no. 1 (25), pp. 14–16. (In Russian)

5. Kazakova T.V. Development and research of the operation of the automatic optimization system on the physical model of the process [Razrabotka i issledovaniye raboty sistemy avtomaticheskoy optimizatsii na fizicheskoy modeli protsessa], *Avtomatizirovannye tehnologii i proizvodstva [Automation of technologies and production]*, 2015, no. 3 (9), pp. 4–8. (In Russian)

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

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

I.P. Popov Inductive-Inductive Oscillations in Automation Systems. *Avtomatizirovannye tehnologii i proizvodstva [Automation of technologies and production]*, 2022, no.2(26), pp.13-15. (In Russian).

УДК 621.3.026.5

АВТОМАТИЧЕСКОЕ СЕКВЕСТИРОВАНИЕ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В СЕТИ

И.П. Попов

Центр высоких технологий, Москва, Россия

e-mail: i.popow@yandex.ru

Аннотация. Целью работы является оценка влияния трансформаторов и шунтирующих реакторов на реактивную мощность в сети при симметричной нагрузке. Установлено, что любая фаза является источником реактивной мощности двух других фаз. И наоборот, любые две фазы являются источником реактивной мощности третьей для фазы.

Ключевые слова: фаза, поток мощности, циркуляция, нагрузка, источник, шунтирование.

Реактивная мощность в сети является нежелательным явлением. Ее циркуляция по проводам вызывает тепловые потери в объеме примерно 10% ее величины. Для ее снижения используют дорогостоящие статические и динамические компенсаторы.

Целью работы является оценка влияния каскада трансформаторов на реактивную мощность в сети при симметричной нагрузке.

Самокомпенсация реактивной мощности при симметричной нагрузке. На рис. 1 представлена существенно идеализированная схема подключения вторичных обмоток трансформатора к симметричной индуктивной нагрузке. Сопротивления рассеяния не показаны [1, 2]. Активные составляющие сопротивлений не рассматриваются. Реактивная мощность в сеть не передается (гипотетически).

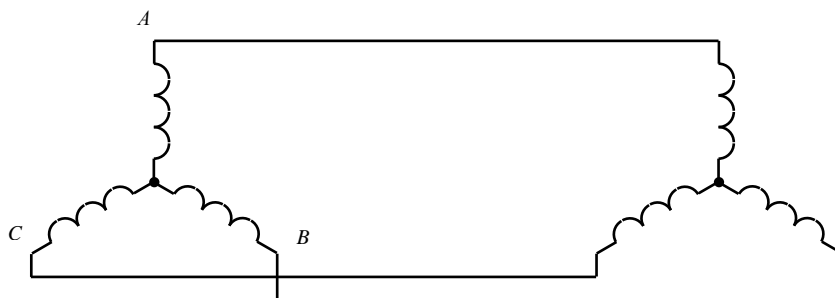


Рис. 1 – Самокомпенсация реактивной мощности

В части опосредованного взаимодействия магнитного поля с нагрузкой схема неотличима от комплекса, в котором вместо трансформатора использована синхронная явноточная машина [3] и в которой источником возбуждения колебаний тока (индуктивного) в любой фазе являются другие (другая) фазы (фаза) нагрузки.

Подобное явление самокомпенсации реактивной мощности известно и в механических системах.

Мгновенные токи, напряжения и мощности (реактивные) фаз соответственно равны

$$i_A = I_m \sin \omega t ,$$

$$u_A = I_m \omega L \cos \omega t ,$$

$$q_A = I_m^2 \omega L \sin \omega t \cos \omega t = \frac{1}{2} I_m^2 \omega L \sin 2\omega t ,$$

$$i_B = I_m \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) ,$$

$$u_B = I_m \omega L \cos \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) ,$$

$$q_B = \frac{1}{2} I_m^2 \omega L \sin \left(2\omega t - \frac{4\pi}{3} \right) ,$$

$$i_C = I_m \sin \left(\omega t + \frac{2\pi}{3} \right) ,$$

$$u_C = I_m \omega L \cos \left(\omega t + \frac{2\pi}{3} \right) ,$$

$$q_C = \frac{1}{2} I_m^2 \omega L \sin \left(2\omega t + \frac{4\pi}{3} \right) .$$

Здесь L – суммарная индуктивность фазы трансформатора (включая рассеяние) и нагрузки.

Сумма мощностей фаз B и C равна

$$\begin{aligned}
 q_{BC} &= q_B + q_C = \frac{1}{2} I_m^2 \omega L \sin \left(2\omega t - \frac{4\pi}{3} \right) + \\
 &+ \frac{1}{2} I_m^2 \omega L \sin \left(2\omega t + \frac{4\pi}{3} \right) = \\
 &= 2 \frac{1}{2} I_m^2 \omega L \sin \frac{2\omega t - 4\pi/3 + 2\omega t + 4\pi/3}{2} \times \\
 &\times \cos \frac{2\omega t - 4\pi/3 - 2\omega t - 4\pi/3}{2} = \\
 &= 2 \frac{1}{2} I_m^2 \omega L \sin 2\omega t \cos \left(-\frac{4\pi}{3} \right) = -\frac{1}{2} I_m^2 \omega L \sin 2\omega t .
 \end{aligned}$$

Эта величина противоположна мощности фазы A .

$$q_B + q_C = -q_A .$$

Это означает, что при оговоренных условиях любая фаза является источником реактивной мощности двух других фаз.

И наоборот, любые две фазы являются источником реактивной мощности третьей фазы.

Таким образом, для данной схемы при симметричной нагрузке происходит самокомпенсация реактивной мощности.

Замечание о мощностях фаз. Может показаться, что соотношение (1) тривиально и обусловлено симметрией трехфазной схемы. Из аналогичных соотношений для мгновенной мощности при идеально активной нагрузке видно, что это не так. Действительно,

$$p_A = I_m^2 R \cos^2 \omega t = I_m^2 R \frac{1 + \cos 2\omega t}{2} =$$

$$= \frac{1}{2} I_m^2 R + \frac{1}{2} I_m^2 R \cos 2\omega t$$

$$p_B = \frac{1}{2} I_m^2 R + \frac{1}{2} I_m^2 R \cos \left(2\omega t - \frac{4\pi}{3} \right)$$

$$p_C = \frac{1}{2} I_m^2 R + \frac{1}{2} I_m^2 R \cos \left(2\omega t + \frac{4\pi}{3} \right)$$

$$p_B + p_C = \frac{1}{2} I_m^2 R + \frac{1}{2} I_m^2 R \cos \left(2\omega t - \frac{4\pi}{3} \right) +$$

$$+ \frac{1}{2} I_m^2 R + \frac{1}{2} I_m^2 R \cos \left(2\omega t + \frac{4\pi}{3} \right) =$$

$$= I_m^2 R + \frac{1}{2} I_m^2 R \left(\cos 2\omega t \cos \frac{4\pi}{3} + \sin 2\omega t \sin \frac{4\pi}{3} \right) +$$

$$+ \frac{1}{2} I_m^2 R \left(\cos 2\omega t \cos \frac{4\pi}{3} - \sin 2\omega t \sin \frac{4\pi}{3} \right) =$$

$$= I_m^2 R - \frac{1}{2} I_m^2 R \frac{1}{2} \cos 2\omega t - \frac{1}{2} I_m^2 R \frac{1}{2} \cos 2\omega t =$$

$$= I_m^2 R - \frac{1}{2} I_m^2 R \cos 2\omega t$$

$$p_B + p_C \neq -p_A .$$

Потоки реактивной мощности в каскаде трансформаторов. Каскад трансформаторов на рис. 2 представлен их упрощенными схемами замещения (без учета рассеяний). Активные сопротивления не рассматриваются.

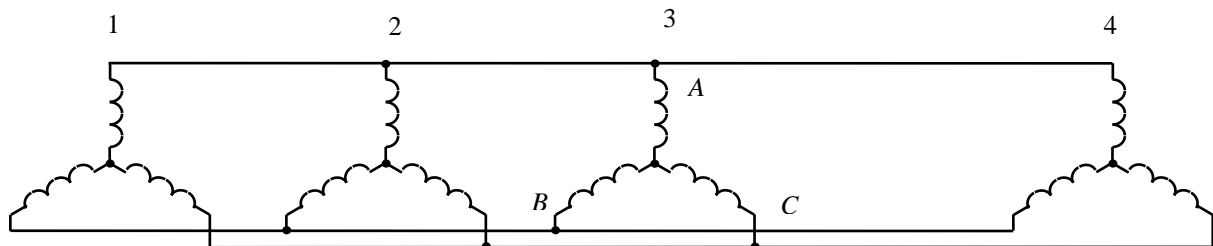


Рис. 2 – Каскад трансформаторов

Идеализация этой схемы меньше, чем первой, поскольку реактивная мощность второго и третьего трансформаторов передается в первичную обмотку.

В таблице представлены значения потоков реактивной мощности в участках сети, отнесенные к величине потока через нагрузку.

До сих пор считалось, что реактивная мощность не перетекает между фазами и поэтому ее поток *без изменения* циркулирует между нагрузкой и источником (генератором) (при условии отсутствия средств компенсации).

В соответствии с рис. 2 поток на участке 3–4 остался без изменений по сравнению с прежними представлениями. Однако уже на участке 2–3 он составляет $2/3$ от его значения для нагрузки, а на участке 1–2 – $1/3$.

Каждый последующий трансформатор по мере удаления от нагрузки *шунтирует* часть потока реактивной

мощности и поэтому в источнике (генераторе) реактивная мощность существенно меньше, чем в нагрузке.

Таблица

Относительные потоки реактивной мощности в участках сети

Участок сети	1-2	2-3	3-4
Относительный поток реактивной мощности	1/3	2/3	1

Соответственно уменьшается усредненный поток реактивной мощности, циркулирующий в сети.

Поскольку снижение усредненного потока реактивной мощности происходит без применения специальных средств компенсации, то это явление можно считать самокомпенсацией реактивной мощности.

В качестве технических средств, обеспечивающих этот реактивный энергообмен, могут выступать *уже имеющиеся*

ся в сети трансформаторы и шунтирующие реакторы. В этом смысле достигаемое таким образом снижение потока реактивной мощности является *естественным*, т. е. не специально организованным, как в случае с синхронными компенсаторами и конденсаторами.

Заключение. В соответствии с изложенным имеет место явление сокращения потока реактивной мощности в сети с трансформаторами.

Полученные аналитические выражения и сделанные выводы не накладывают ограничения на классы напряжений силовых трансформаторов и типы электроэнергетических систем/электрических сетей, в которых они размещаются [4, 5].

ЛИТЕРАТУРА

1. Павлов В.Д. Математическая модель высокоточного метода холостого хода определения рассеяния обмоток трансформатора по отдельности // Автоматизированные технологии и производства. 2021 № 2 (24). С. 11–13.

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

3. Попов И.П. Учет амплитудно-частотных особенностей режимов нагрузки синхронной электрической машины в составе автоматизированного привода // Автоматизированные технологии и производства. 2021 № 1 (23). С. 12–15.

4. Казакова Т.В. Разработка и исследование работы системы автоматической оптимизации на физической модели процесса // Автоматизированные технологии и производства. 2015. № 3 (9). С. 4–8.

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

AUTOMATIC REACTIVE POWER SECTION IN THE NETWORK

I.P. Popov

Center of High Technologies, Moscow, Russia

e-mail: i.popov@yandex.ru

Abstract. The aim of the work is to assess the influence of transformers and shunt reactors on the reactive power in the network at a symmetrical load. It has been established that any phase is a source of reactive power for the other two phases. Conversely, any two phases are the source of the third phase reactive power.

Keywords: phase, power flow, circulation, load, source, shunting.

REFERENCES

1. Pavlov V.D. Mathematical model of the high-precision no-load method for determining the scattering of transformer windings separately [Matematicheskaya model' vysokotochnogo metoda kholostogo khoda opredeleniya rasseyaniya obmotok transformatora po otdel'nosti], *Avtomatizirovannye tehnologii i proizvodstva [Automation of technologies and production]*, 2021, no. 2 (24), pp. 11–13. (In Russian)

2. Pavlov V.D. Mathematical model of a high-precision short circuit method for determining the scattering of transformer windings separately [Matematicheskaya model' vysokotochnogo metoda korotkogo zamykaniya dlya opredeleniya rasseyaniya obmotok transformatora po otdel'nosti], *Avtomatizirovannye tehnologii i proizvodstva [Automation of technologies and production]*, 2022, no. 1 (25), pp. 14–16. (In Russian)

3. Popov I.P. Accounting for amplitude-frequency features of load modes of a synchronous electric machine as part of an

automated drive [Uchet amplitudno-chastotnykh osobennostey rezhimov nagruzki sinkhronnoy elektricheskoy mashiny v sostave avtomatizirovannogo privoda], *Avtomatizirovannye tehnologii i proizvodstva [Automation of technologies and production]*, 2021, no. 1 (23), pp. 12–15. (In Russian)

4. Kazakova T.V. Development and research of the operation of the automatic optimization system on the physical model of the process [Razrabotka i issledovaniye raboty sistemy avtomaticheskoy optimizatsii na fizicheskoy modeli protsesssa], *Avtomatizirovannye tehnologii i proizvodstva [Automation of technologies and production]*, 2015, no. 3 (9), pp. 4–8. (In Russian)

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

Попов, И.П. Автоматическое секвестирование реактивной мощности в сети / И.П. Попов // Автоматизированные технологии и производства. 2022. №2(26). С.16-18.

I.P. Popov Automatic Reactive Power Section in the Network. *Avtomatizirovannye tehnologii i proizvodstva [Automation of technologies and production]*, 2022, no.2(26), pp.16-18. (In Russian).

ВЫБОР И РАСЧЁТ РЕГУЛИРУЮЩИХ ОРГАНОВ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

Д.О. Сниткин¹, И.Г. Самарина², И.С. Бондарев³^{1,2}ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г. И. Носова», г. Магнитогорск, РФ³ООО «КомпасПлюс», г. Магнитогорск, РФ

danijust4fun@gmail.com

Аннотация. В работе рассмотрены виды регулирующих органов, описаны основные параметры и характеристики их работы. Для надежной работы системы автоматического регулирования необходимым условием является правильный выбор формы пропускной характеристики регулирующего органа. Представлен выбор и расчет РО для регулирования расхода пара.

Ключевые слова: Регулирующий орган, пропускная характеристика, коэффициент передачи, расход.

ВВЕДЕНИЕ

Регулирующим органом (РО) называется звено исполнительного устройства, предназначенное для изменения расхода вещества или энергии в объект регулирования. То есть РО оказывают непосредственное регулирующее воздействие на объект. Они приводятся в движение или удерживаются в определенном состоянии с помощью исполнительных механизмов. Исполнительные механизмы и регулирующие органы связаны между собой с помощью тяг, рычагов, тросов или жестко (монолитные конструкции).

Различают дозирующие и дроссельные РО. Дозирующие изменяют расход вещества за счет изменения производительности агрегатов (дозаторы, питатели, насосы, компрессоры, плужковые сбрасыватели и др.). Дроссельный РО представляет собой переменное гидравлическое сопротивление, изменяющее расход вещества за счет изменения своего проходного сечения; к ним относятся регулирующие клапаны, поворотные заслонки, шиберы и краны [1].

Регулирование теплотехнических параметров осуществляется главным образом изменением количества теплоносителя или технологического материала в процессе обработки. В связи с этим чаще всего используют дросселирующий поток (в виде изменения гидравлического сопротивления) устройства или изменяющие его напор (изменением частоты вращения вала устройства, подключением дополнительных нагнетателей и т.п.) аппараты, а также устройства, меняющие расход (дисковые, шнековые, ленточные и др. питатели).

Наиболее распространенным способом является дросселирование потока. Как уже отмечалось, дросселирующие РО – это переменные сопротивления, которые изменяют расход среды при изменении проходного сечения. Так как данный тип РО чаще используется в САР, поэтому рассмотрим их параметры, характеристики подробнее.

ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ДРОССЕЛИРУЮЩИХ РЕГУЛИРУЮЩИХ ОРГАНОВ

Основными параметрами, определяющими работу дросселирующих регулирующих органов (далее регулирующих органов), является пропускная способность, условное и рабочее давление, перепад давления и условное проходное сечение, пропускная и конструктивная характеристики [2].

Пропускной способностью $K_{0M}^3/ч$, называют расход жидкости через регулирующий орган при перепаде давления на нем 0,1 МПа и плотности жидкости $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$.

Условная пропускная способность K_{0y} определяется пропускной способностью при максимальном открытии. Она зависит от типа и условного прохода D_y регулирующего органа [3].

Максимальное рабочее давление характеризует наибольшее давление среды на регулирующий орган при ее рабочей температуре, а условное давление P_y – наибольшее допустимое давление среды при нормальной температуре. Последнее имеет стандартные значения, устанавливаемые ГОСТ 356–80.

Перепад давления на регулирующем органе определяет величину перестановочных усилий на исполнительном механизме и его выбор.

Условный проход характеризует номинальный диаметр прохода регулирующего органа.

Расходная характеристика μ устанавливает зависимость пропускной способности от перемещения РО при постоянном перепаде давления на нем. Эта зависимость может иметь различный характер: линейный или значительно отличающийся от него (равнопроцентные). Линейная имеет прямо пропорциональную зависимость приращения пропускной способности к перемещению РО, а при равнопроцентной – приращение пропускной способности прямо пропорционально текущему значению пропускной способности [2].

ТИПЫ ДРОССЕЛИРУЮЩИХ ОРГАНОВ

К основным типам дросселирующих органов относятся поворотные заслонки, регулирующие клапаны, шиберы и краны.

Регулирующие клапаны применяются для любых видов сред и вариаций их параметров, обеспечивая значительную герметизацию при закрытии. Они представляют собой дросселирующие устройства, включающие: корпус, седло, затвор с дросселирующей и запирающей поверхностями. Затвор, приводимый в движение штоком, перемещаясь, изменяет площадь прохода и пропускную способность клапана.

По виду, числу опорных поверхностей, конструкции плунжеров (затворов) и корпусов клапаны бывают: односедельные и двухседельные с тарельчатым, пробковым и поршневым затвором.

Односедельные клапаны применяют при небольших размерах прохода (от 6 до 50 мм) или вязких и загрязненных средах и характеризуются неуравновешенностью перестановочного усилия и хорошей герметизацией.

Двухседельные клапаны в силу конструктивных особенностей (сдвоенное седло и затвор) в значительной мере разгружены, имеют широкий диапазон пропускных характеристик, но слабо герметизированы. Они используются при больших расходах.

Тарельчатые затворы клапанов бывают коническими и плоскими. Более предпочтительны первые, так как имеют более линейные конструктивные характеристики и большую эксплуатационную надежность.

Клапаны с пробковыми затворами имеют параболическую дросселирующую и конечную поверхности и применяются для тяжелых условий работы (вязкие жидкости, коксующиеся среды и т.п.). В системе ГСП они являются базовыми и имеют широкую номенклатуру пропускных характеристик.

В клапанах с поршневыми затворами дросселирующие поверхности изготавливаются шлицевыми или резьбовыми. Благодаря разновеликости шлицев удается повысить эксплуатационную стойкость затворов. Эти устройства применяются для регулирования чистых жидкостей и газов и имеют любые конструктивные и пропускные характеристики.

Двухседельные клапаны имеют диаметры условного прохода от 50 до 300 мм и допустимые перепады давления P_d от 0,7 до 2,5 МПа [5].

ВЫБОР И РАСЧЕТ ДРОССЕЛЬНЫХ РЕГУЛИРУЮЩИХ ОРГАНОВ

Для конкретной системы расходная характеристика определяется значениями параметров среды, протекающей через РО, и его пропускной характеристикой $K_v = f(S)$ [6].

В общем случае расходная характеристика отличается от пропускной, так как параметры среды (в основном давление и перепад давлений), как правило, зависят от значения расхода. Поэтому задача выбора формы предпочтительной пропускной характеристики разбивается на два этапа:

– выбор формы расходной характеристики, обеспечивающей постоянство коэффициента передачи РО во всем диапазоне нагрузок;

– выбор формы пропускной характеристики, обеспечивающей при данных параметрах среды желаемую форму расходной характеристики.

Пример выбора и расчет РО для регулирования расхода пара на деаэратор [7].

Данные для расчета:

максимальный расход пара $G_{\max} = 10000$ кг/ч;

минимальный расход пара $G_{\min} = 3000$ кг/ч;

давление пара в магистрали $P_0 = 0,5$ МПа;

давление в деаэраторе $P_{дэ} = 0,12$ МПа;

температура пара $T = 210$ °С; внутренний диаметр паропровода $D = 250$ мм.

Паропровод имеет три поворота под углом 90° с радиусом изгиба $0,7$ м; на паропроводе установлена запорная задвижка; разность высот начального и конечного участков сети $\Delta h = -10,7$ м.

Схема паропровода представлена на рис. 1.

Расходная характеристика РО должна быть линейной.

По справочным таблицам водяного пара при $P_0 = 0,5$ МПа и $T = 210$ С:

динамическую вязкость $\eta = 1,68 \cdot 10^{-6}$ кгс·с/м²;

показатель адиабаты $\chi = 1,31$;

плотность пара $\rho_{\text{пар}} = 2,25$ кг/м³.

Гидростатический напор, соответствующий разности уровней верхней и нижней отметок трубопровода:

$$\Delta P_T = \Delta h \rho_{\text{пар}} = -24 \text{ кгс/м}^2 = 0,00024 \text{ МПа.}$$

$$\Delta P_{\text{сети}} = P_0 - P_{дэ} - \Delta P_T = 0,38 \text{ МПа.}$$

Число Рейнольдса при $G_{\max} = 10000$:

$$Re_D = 36,1 \cdot 10^{-3} \cdot G_{\max} / (D \eta) = 8,6 \cdot 10^5.$$

Условие гидравлической гладкости трубопровода:

$$Re_D < 27 \cdot (D/n_1)^{0,7} = 2 \cdot 10^5,$$

где $n_1 = 0,1$ мм – шероховатость трубопровода.

Так как паропровод в данном случае не является гидравлически гладким, то коэффициент трения $\lambda = 0,016$ при $D/n_1 = 2500$ и $Re_D = 8,6 \cdot 10^5$.

Суммарная длина паропровода (по рисунку 1)

$$L = 24,15 \text{ м.}$$

Средняя скорость в паропроводе при максимальном расчетном расходе:

$$v_{\max} = G_{\max} / (\rho_{\text{пар}} F) = 25,2 \text{ м/с.}$$

Потери давления на прямых участках паропровода:

$$\Delta P_{\text{пр}} = \lambda \frac{\rho_{\text{пар}} L v^2}{2D} = 0,0011 \text{ МПа.}$$

Потери давления в местных сопротивлениях трубопровода $\zeta_{\text{вх}} = 0,5$; $\zeta_{\text{вых}} = 1,0$; $\zeta_{90} = 0,66$; $\zeta_{эд} = 0,08$:

$$\Delta P_{\text{л}} = (\zeta_{\text{вх}} + \zeta_{\text{вых}} + 3\zeta_{90} + \zeta_{эд}) \rho_{\text{пар}} v^2 / 2 = 0,0025 \text{ МПа.}$$

Общие потери давления линии:

$$\Delta P_{\text{л}} = \Delta P_{\text{пр}} + \Delta P_{\text{л}} = 0,0036 \text{ МПа.}$$

Перепад давления в РО при максимальном расчетном расходе пара:

$$\Delta P_{\text{РО макс}} = \Delta P_{\text{сети}} - \Delta P_{\text{л}} = 0,3764 \text{ МПа.}$$

При очень малых расходах потери давления в линии являются пренебрежимо малой величиной и перепад давления на РО:

$$\Delta P_{\text{РО мин}} = \Delta P_0 - \Delta P_{дэ} = 0,38 \text{ МПа.}$$

Таким образом, перепад на РО практически остался неизменным.

Так как $\Delta P_{\text{РО}}/P_0 > 0,5$, то максимальная пропускная способность РО:

$$K_{V \text{ макс}} = \frac{G_{\text{макс}}}{74} \cdot \sqrt{\rho_{\text{пар1}} \cdot P_0} = 127 \text{ м}^3/\text{ч},$$

где $\rho_{\text{пар1}} = \rho_{\text{пар}} 2,25 \text{ кг/м}^3$; $P_0 = 0,5 \text{ МПа}$.

Выбираем (по справочным таблицам) двухседельный РО с условной пропускной способностью $K_{vy} = 160 \text{ м}^3/\text{ч} > 1,2K_{V \text{ макс}} = 152 \text{ м}^3/\text{ч}$ с $D_y = 100 \text{ мм}$.

Отношение перепада давления в линии к перепаду давления на РО при максимальном расходе:

$$\Delta P_n / \Delta P_{PO} \approx 0.$$

Так как по условию расходная характеристика должна быть линейной, то при $n = 0$ следует выбрать РО с линейной пропускной характеристикой.

Максимальный расход для выбранного РО:

$$G'_{\text{макс}} = G_{\text{макс}} \cdot K_{vy} / K_{V \text{ макс}} = 12600 \text{ кг/ч}.$$

Относительные значения расходов:

$$\mu_{\text{макс}} = 10000 / 12600 = 0,79;$$

$$\mu_{\text{мин}} = 3000 / 12600 = 0,24;$$

И диапазон перемещений затвора РО с линейной характеристикой при $n = 0$: $\Delta S = 0,55$ [4].

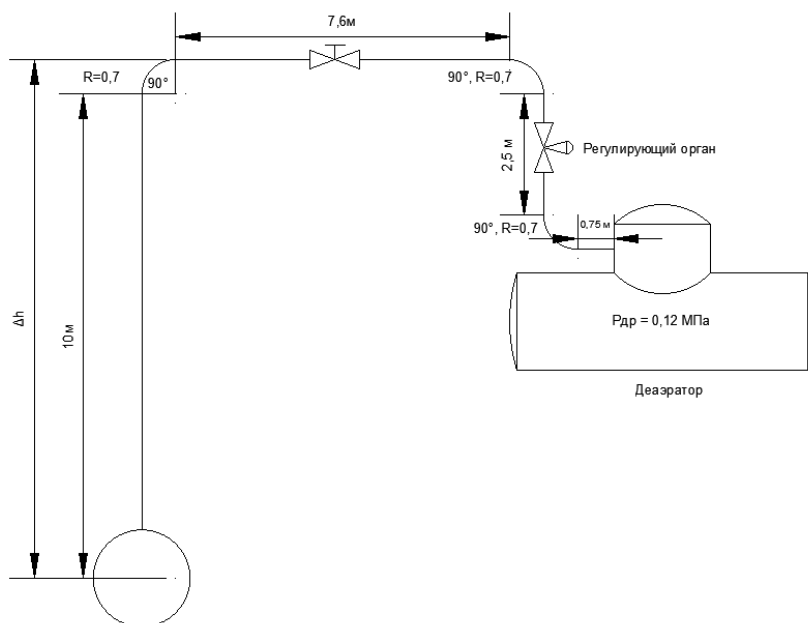


Рис. 1. Расчетная схема

ЗАКЛЮЧЕНИЕ (Выводы)

При математическом моделировании САР необходимо учитывать характеристики регулирующих органов. И необходимым условием надежной работы системы регулирования является правильный выбор формы пропускной характеристики. Что определяет размеры и конструкцию дроссельного регулирующего устройства [8, 9].

Поэтому при создании математической модели САР необходимо учитывать не только форму заводской пропускной расходной характеристики, которая может не совпадать с реальной пропускной характеристикой, вследствие изменения режимов работы системы, свойств регулируемой среды, режимов течения. Поэтому необходимо создать модель, учитывающую особенности выбранного регулирующего органа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Клюев А.С. Настройка средств автоматизации и автоматических систем регулирования: Справочное пособие. / А.С. Клюев, А.Т. Лебедев, С.А. Клюев и др.; под ред. А.С. Клюева – М: Энергоатомиздат, 1989. – 368с.
2. Глинков Г.М. Проектирование систем контроля и автоматического регулирования металлургических процессов – М: Металлургия, 1989. – 268 с.
3. Артамонов Ю. С. Технические средства автоматизации: лабораторный практикум / Ю. С. Артамонов; МГТУ.

- Магнитогорск: МГТУ, 2014. - 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). - Загл. с титул. экрана. - URL: <https://magtu.informsystema.ru/uploader/fileUpload?name=1334.pdf&show=dcatalogues/1/1123638/1334.pdf&view=true> (дата обращения: 25.12.2022). – Макрообъект

4. РМ 4-163-77 Расчет и применение регулирующих органов в системах автоматизации технологических процессов
5. Полоцкий Л.М. Автоматизация химических производств. Теория, расчет и проектирование систем автоматизации. / Л.М. Полоцкий, Г.И. Лапшенков – М.: Химия, 1982. – 296 с
6. ГОСТ 16443-70. Устройства исполнительные. Методы расчета пропускной способности, выбора условного прохода и пропускной характеристики
7. Арзуманов З.С. Расчёт и выбор регулирующих органов автоматических систем. – М.: «Энергия», 1971. – 280с
8. Тверской Ю.С. Особенности моделирования гидравлических систем с регулирующими органами / Ю.С. Тверской, Е.Д. Маршалов // Теплоэнергетика. – 2014 – №9. С. 64-69.
9. Парсункин, Б. Н. Автоматизация технологических процессов и производств в металлургии: Курс лекций / Б. Н. Парсункин, С. М. Андреев, Е. С. Рябчикова. – Магнитогорск, 2011. – 151 с.

SELECTION AND CALCULATION CONTROLLING ELEMENT AUTOMATIC OF CONTROL SYSTEMS

D.O. Snitkin¹, I.G. Samarina², I.S. Bondarev³

^{1,2}Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

³Compass Plus Limited Company, Magnitogorsk, Russia

Abstract. A necessary condition is the correct choice of the form of the controlling element bandwidth characteristic for reliable operation of the ASR. To solve this problem, it is necessary to take into account the influence of internal disturbances on the change in the controlling element transmission coefficient for linear and equivalent consumption characteristics that pass through the channel of regulatory influences and external disturbances.

Keywords: Regulatory body, pass characteristic, transmission coefficient, flow rate.

REFERENCES

1. Klyuev A.S. Adjustment of automation and automatic control systems: A reference manual. / A.S. Klyuev, A.T. Lebedev, S.A. Klyuev et al.; edited by A.S. Klyuev - M: Energoatomizdat, 1989. – 368 p.

2. Glinkov G.M. Design of control systems and automatic regulation of metallurgical pro-processov – M: Metallurgy, 1989. – 268 p.

3. Artamonov Yu. S. Technical means of automation: laboratory workshop / Yu. S. Artamonov; MSTU. - Magnitogorsk: MSTU, 2014. - 1 electron. opt. disk (CD-ROM). - Title with title the screen. - URL: <https://magtu.informsistema.ru/uploader/fileUpload?name=1334.pdf&show=dcatalogues/1/1123638/1334.pdf&view=true> (accessed: 12/25/2022). – Macro object

4. RM 4-163-77 Calculation and application of regulatory bodies in automation systems of technological processes

5. Polotsky L.M. Automation of chemical production. Theory, calculation and design of automation systems. / L.M.Polotsky, G.I.Lapshenkov - M.: Chemistry, 1982. – 296 p.

6. GOST 16443-70. Executive devices. Methods for calculating throughput, selecting conditional passage and throughput characteristics

7. Arzumanov Z.S. Calculation and selection of regulatory bodies of automatic systems. – M.: "Energy", 1971. – 280 p.

8. Tverscoy U.S. Features of modeling hydraulic systems with regulating bodies / U.S. Tverscoy, E.D. Marshalov // Thermal Engineering. – 2014. – is. 9. – P. 64-69.

9. Parsunkin B.N., Andreev S.M., Ryabchikova E.S. Avtomatizaciya tekhnologicheskikh processov i proizvodstv v metallurgii [Automation of technological processes and production in metallurgy], Magnitogorsk, 2011, 151 p.

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.

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

РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ГРУППОВОГО УПРАВЛЕНИЯ ВОЗБУЖДЕНИЕМ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ

О.В. Газизова, С.М. Андреев, Г.П. Корнилов, А.Э. Морщакин, А.Р. Курбанов

ФГБОУ ВС "МГТУ им. Г.И. Носова", Магнитогорск, Россия

e-mail: logan_b_7@mail.ru

Аннотация. Расширение промышленными предприятиями собственной энергетической базы приводит к усложнению возможных нормальных и аварийных режимов, сопровождающихся понижением статической и динамической устойчивости турбогенераторов. Способом повышения устойчивости работы источников питания является выбор оптимального закона регулирования тока обмотки возбуждения одного или группы синхронных генераторов. В данной работе предложен принцип группового регулирования тока обмотки возбуждения с целью обеспечения минимального коэффициента запаса статической устойчивости. Разработанный алгоритм может быть применен для группы генераторов промышленной электростанции, работающей по электрическому графику нагрузки. Вычисление угла ротора производится по параметрам обмоток статора генератора. Использование контроллера позволит использовать сложные законы управления током возбуждения с целью учета принятого закона и ограничений по токам обмоток машины.

Ключевые слова: промышленный контроллер, синхронный генератор, ток возбуждения, групповое регулирование, алгоритм управления, промышленная электростанция.

ВВЕДЕНИЕ

Расширение промышленными электростанциями собственной генерирующей базы приводит к усложнению возможных нормальных и аварийных режимов. К наиболее тяжелым последствиям приводят длительные короткие замыкания различной электрической удаленности по отношению к источникам питания, просадки напряжения больше, чем на 10% и выход электростанции с нагрузкой на автономную с энергосистемой работу. В связи с этим появляется необходимость сохранения устойчивости генераторов в различных условиях эксплуатации.

К основным способам повышения как статической, так и динамической устойчивости машин, относится регулирование выдаваемой генератором активной мощности, изменение структуры электрической сети, а так же тока обмотки возбуждения. Ввиду того, что изменение активной мощности в нормальном режиме согласно существующим требованиям не всегда возможно, как и изменение структуры сети, то наиболее действенным фактором является изменения тока обмотки возбуждения с учетом имеющихся ограничений.

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

В общем случае регулирование тока обмотки возбуждения осуществляется индивидуально. Существует несколько общепринятых законов регулирования обмотки возбуждения, такие как постоянство напряжения на выводах обмотки статора, коэффициента мощности и выдаваемой реактивной мощности. Все перечисленные законы в различных условиях эксплуатации обладают определенной эффективностью. Однако, в условиях промышленной

электростанции с целью повышения устойчивости возможно групповое регулирование параметров генераторов.

Одним из способов повышения статической устойчивости работы отдельных синхронных генераторов в условиях промышленной электростанции является групповое регулирование их возбуждения по различным критериям. Наиболее простым условием, обеспечивающим сохранение одинаковой устойчивости всех генераторов узла, является равенство собственных углов их роторов [1]. Поскольку изменение активных мощностей генераторов в процессе эксплуатации не желательно, то регулирование угла ротора можно осуществлять с помощью изменения тока обмотки возбуждения с учетом различных ограничений. Общая характеристика способов регулирования возбуждения синхронных генераторов приведена в трудах [2-7].

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ ГРУППОВЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ ВОЗБУЖДЕНИЯ ГЕНЕРАТОРОВ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ

Общая схема объекта управления приведена на рис. 1. Группа генераторов работает в параллель с системой большой мощности. Изменение уровня напряжения со стороны энергосистемы приводит к отклонению углов роторов генераторов, поскольку они имеют различные технические характеристики. Изменение тока возбуждения позволит выровнять углы роторов и, соответственно, статическую устойчивость машин. Наиболее простым критерием является определение среднего угла роторов генераторов и приведение к нему углов всех электрических машин. На рис. 1 - энергосистема, 2- синхронный генератор, 3, 4 - трансформатор напряжения и тока, 5 - блок ограничений, 6 - обмотка возбуждения, 7 - трансформатор тока в обмотке возбуждения, 8 - возбудитель, 9 - блок управления, 10 - система управления возбудителем.

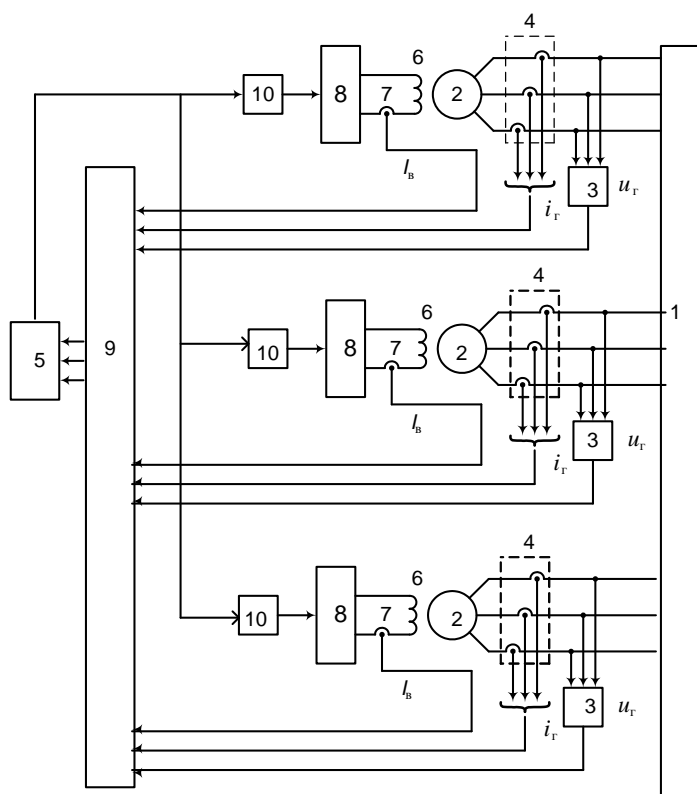


Рис. 1. Регулирование возбуждения группы генераторов

Алгоритм управления в этом случае следующий (рис. 2). Согласно известным активным и реактивным мощностям электрических машин, получаемым из токов $I_{ст}$ и напряжений $U_{ст}$ обмотки статора, определяются углы роторов δ относительно напряжения обмоток статора. Далее контроллер формирует сигнал и производится воздействие на токи обмоток возбуждения посредством системы управления тиристорного преобразователя с целью обеспечения угла ротора, минимального по статической устойчивости (56 эл. град.). Если угол машины больше данного, то ток возбуждения повышается, если меньше снижается до тех пор, пока углы машин не выровняются. Как только углы стали одинаковыми, воздействие на ток возбуждения прекращается.

Изменение напряжения со стороны питающей энергосистемы, а также изменение нагрузок в сети приводит к изменению углов роторов и требуется дополнительная коррекция. При применении данного метода необходимо учитывать ограничения по токам обмотки возбуждения и статора во избежание перегрева.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная структурно-функциональная схема группового регулирования токов обмотки возбуждения позволяет обеспечить одинаковую статическую устойчивость генераторов.

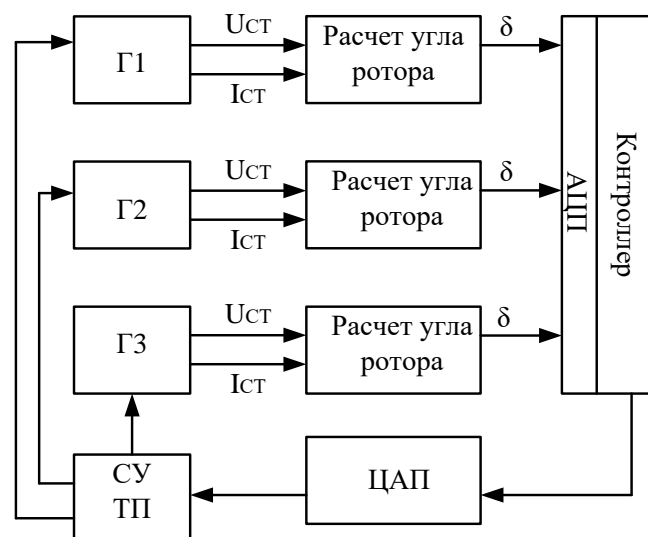


Рис. 2. Структурно-функциональная схема группового регулирования тока возбуждения генераторов для повышения устойчивости

ЛИТЕРАТУРА

1. Калентиюнок Е.В., Филипчик Ю.Д. Управление реактивной мощностью генераторов электростанций для повышения устойчивости электроэнергетических систем. Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2009;(6):23-30.
2. Илюшин П.В. Автоматика управления нормальными и аварийными режимами энергорайонов с распределенной генерацией: монография / П.В. Илюшин, А.Л. Куликов. – Н.Новгород: НИУ РАНХиГС, 2019. – 364 с.
3. Илюшин П.В. Совершенствование противоаварийного и режимного управления энергорайонов с распределенной генерацией: дис. ... д-ра. техн. наук. 05.14.02 / Илюшин Павел Владимирович. Санкт-Петербург, 2019.
4. Коган Ф.Л. Особенности сильного регулирования возбуждения синхронных генераторов в сложной энергосистеме // Электрические станции. 2019. № 7. С. 27-35.
5. Коган, Ф.Л. Повышение эффективности стабилизации режима при возмущениях в энергосистеме / Ф.Л. Коган // Электричество. – 2020. -- № 5. -- С. 4 – 11.
6. Коган, Ф.Л. По поводу статьи А.А. Юрганова «Некоторые соображения о статье Ф.Л. Когана «Особенности сильного регулирования возбуждения синхронных генераторов в сложной энергосистеме» / Ф.Л. Коган // Электрические станции. – 2019. -- № 11. -- С. 55 -- 60.
7. Газизова, О.В. Анализ допустимости режима потери возбуждения синхронного генератора в условиях промышленной системы электроснабжения сложной конфигурации / О.В. Газизова, А.П. Соколов, Н.Т. Патшин, Ю.Н. Кондрашова // Электротехнические системы и комплексы. 2019. № 2 (43). С. 12-18.

DEVELOPMENT OF THE AUTOMATED SYSTEM OF GROUP CONTROL OF THE EXCITATION OF SYNCHRONOUS GENERATORS TO INCREASE STABILITY

O.V. Gazizova, S.M. Andreev, G.P. Kornilov, A.E. Morshchakin, A.R. Kurbanov
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

e-mail: logan_b_7@mail.ru

Abstract. The expansion of industrial enterprises of their own energy base leads to the complication of possible normal and emergency modes, accompanied by a decrease in static and dynamic stability of turbogenerators. A way to increase the stability of the power sources is the choice of the optimal law of regulating the winding of the excitation of one or a group of synchronous generators. In this paper, the principle of group regulation of the winding of excitation is proposed to ensure the minimum coefficient of static stability. The developed algorithm can be used for a group of generators of an industrial power plant operating on an electrical load schedule. The angle of the rotor is calculated according to the parameters of the winding of the generator stator. The use of the controller will allow the use of complex laws of excitation current management to account for the adopted law and restrictions on the current.

Keywords: Industrial controller, synchronous generator, excitation current, group regulation, control algorithm, industrial power station.

REFERENCES

1. Kalentionok E.V., Filipchik Yu.D. [Management of reactive power generators for increasing the stability of electric power systems]. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij i energeticheskikh ob'edinenij SNG. Energetika* [Energetika. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations], 2009, no. 6, pp. 23-30. (in Russian)
2. Ilyushin P.V., Kulikov A.L. *Avtomatika upravleniya normal'nymi i avarijnymi rezhimami ehnergorajonov s raspredelennoj generatsiej* [Automation of the control of normal and emergency modes of energy rates with distributed generation]. Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod branch of the Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration Publ., 2019. 364 p.
3. Ilyushin P.V. *Sovershenstvovanie protivovarijnogo i rezhimnogo upravleniya energorajonov s raspredelennoj generaciej*. Diss. d-ra. tekhn. nauk. [Improvement of anti-emergency and regime management of energy rates with distributed generation. Dr. eng. sci. diss.]. Sankt-Peterburg, 2019.
4. Kogan F.L. [Features of strong control of excitation of synchronous generators in a complex power system]. *El-*

ektricheskie stancii [Electrical stations], 2019, no. 7, pp. 27-35. (in Russian)

<http://dx.doi.org/10.34831/EP.2019.1056.44192>

5. Kogan F.L. [Increasing the efficiency of stabilization of the regime during perturbations in the power system]. *Elektrichestvo* [Elektrichestvo], 2020, no. 5, pp. 4-11. (in Russian) DOI: <https://doi.org/10.24160/0013-5380-2020-5-4-11>

6. Kogan, F.L. [Regarding the article A.A. Yurganova "Some considerations about the article F.L. Kogan "Features of strong control of excitation of synchronous generators in a complex power system"]. *Elektricheskie stancii* [Electrical stations], 2019, no. 11, pp. 55-60. DOI: <http://dx.doi.org/10.34831/EP.2019.1060.43579> (in Russian)

7. Gazizova O.V., Sokolov A.P., Patshin N.T., Kondrashova Yu.N. Analysis of the permissibility of the mode of excitation of a synchronous generator in the conditions of an industrial system of power supply complex configuration. *Electrical systems and complexes*. 2019. No. 2 (43). pp. 12-18. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-2\(43\)-12-18](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-2(43)-12-18)

Газизова, О.В. Разработка автоматизированной системы группового управления возбуждением синхронных генераторов с целью повышения устойчивости / О.В. Газизова, С.М. Андреев, Г.П. Корнилов, А.Э. Морщакин, А.Р. Курбанов // Автоматизированные технологии и производства. 2022. №2(26). С.23-25.

O.V. Gazizova, S.M. Andreev, G.P. Kornilov, A.E. Morshchakin, A.R. Kurbanov Development of the Automated System of Group Control of the Excitation of Synchronous Generators to Increase Stability. *Avtomatizirovannye tehnologii i proizvodstva* [Automation of technologies and production], 2022, no.2(26), pp.23-25. (In Russian).

ТЕХНОЛОГИЯ КЛАССИФИКАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ ОПАСНОГО ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ОБЪЕКТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГИСТОГРАММ ЯРКОСТИ

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

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

e-mail: Logunova66@mail.ru

Аннотация. Целью исследования является определение качества видео материала, получаемого с использованием беспилотных воздушных судов для их последующего использования в системе экспертной оценке технического состояния опасных производственных объектов. По результатам ранее проведенных исследований предложена обобщенная структура изображений с выделением основных элементов. В работе выполнено обоснование использования гистограмм яркости как основного инструмента для построения автоматического классификатора изображений. Описаны технология функционирования классификатора изображений и разработанный программный продукт, который выполняет основные функции по построению гистограмм и его использования в работе классификатора. В результате предлагаемая технология позволила в автоматизированном режиме обработать 106 фотографий опасных производственных объектов и среди них выделить три основных класса: 5 изображений с множественными объектами и непригодными для дальнейшей автоматической обработки; 22 изображения, на которых размещен только объект исследования и не требуют предварительной подготовки для дальнейшего исследования; 70 изображений, которые требуют интерактивного определения областей исследования. Установлено, что при известной структуре изображений возможно определение траектории обработки изображений, определение качества полученного графического материала и функции технологической подготовки изображений.

Ключевые слова: изображение, опасные производственные объекты, гистограмма изображения, структура изображения, объект нерегулярной формы.

ВВЕДЕНИЕ

Современный уровень развития вычислительной техники и программного обеспечения позволил внедрять в промышленные отрасли системы компьютерного зрения и распознавания образов. Все чаще появляются задачи, в которых принятие решений выполняется с использованием визуальной информации, которая оценивается и классифицируется экспертами на основе фото- и видеопотока. Основными устройствами для сбора информации становятся фото- и видеокамеры в руках исследователей или установленные на беспилотных воздушных судах (БВС).

Наиболее известными в промышленной области являются задачи, связанные с исследованием качества продукции или объектов, действующих на производственной территории. В работах [1, 2] рассмотрена проблема оценки качества непрерывнолитой заготовки, получаемой в условиях крупного российского предприятия, с использованием программного обеспечения «Q&S» для снижения влияния человеческого фактора. В исследованиях, проводимых авторами [3], рассматривается решение проблемы получения и сбора информации о техническом состоянии опасных производственных объектов: зданий, сооружений и технических устройств.

В результате обследования объектов собирается уникальный видеоматериал, который подвергается последующей обработке: улучшению, сегментации и распознаванию. Одним из мощных инструментов, позволяющих выполнить обработку полученных изображений является гистограмма яркости [4-11]. С помощью исследования и

трансформации гистограммы выполняются изменение контрастности изображения, изменение резкости на фотографиях, скрытие и извлечение скрытой информации.

ИЗОБРАЖЕНИЯ ОПАСНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ И ИХ СТРУКТУРА

При выполнении исследований по изучению технического состояния опасных производственных объектов для сбора визуальной информации использован беспилотный летательный аппарат. С его помощью собрано более 1000 фото- и видеоинформационных единиц [12, 13]. Примеры изображений приведены на рис. 1. Полученная информация планируется к использованию при интеллектуальной поддержке в системе принятия решений о соответствии технического состояния опасных производственных объектов требованиям нормативной документации к их эксплуатации.

Для собранного видеоматериала возникает проблема оценки его качества для использования в системе. Изображение считается качественным, если выполняются условия:

- большую площадь фотографии занимает объект для исследования;
- изображение исследуемого объекта отличается от яркости фона и окружающих объектов.

Изучение структуры полученных изображений (рис. 2) показало, что:

1) на изображении наблюдается: 1 – общий фон; 2 – основной объект исследования; 3 – нарушение сплошности объекта исследования (рис. 2);

2) нарушения сплошности объекта исследования имеют классификацию по форме, приведенную в табл. 1;

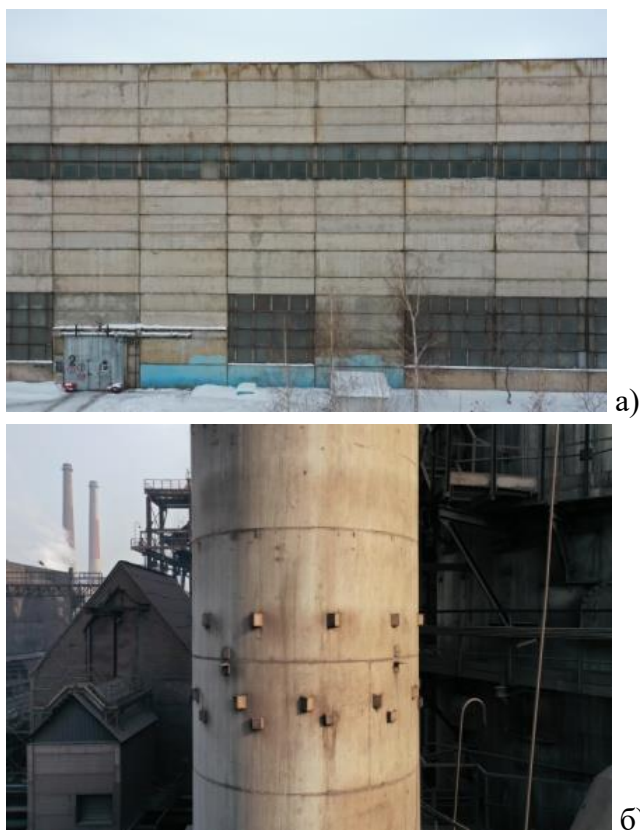


Рис. 1. Примеры изображений опасных производственных объектов: а – фотография фасада производственного здания; б – фотография дымовой трубы

Таблица 1

Описание объектов, характеризующих нарушения сплошности

№	Обозначение	Описание
1	1	Основной фон изображения (фотографии)
2	2	Изображение объекта исследования
3	3	Элементы нарушения сплошности объекта исследования
4	3.1	Распознаваемые объекты регулярной формы
5	3.2	Распознаваемые объекты нерегулярной формы
6	3.3	Распознаваемые объекты нерегулярной формы со сложной структурой
7	3.4	Тонкие объекты регулярной линейной формы
8	3.5	Тонкие объекты нерегулярной формы
9	3.6	Объекты регулярной и нерегулярной формы, для которых не назначено функции распознавания

ГИСТОГРАММА ЯРКОСТИ КАК ИНСТРУМЕНТ ОЦЕНКИ СТРУКТУРЫ ИЗОБРАЖЕНИЯ ОПАСНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

В качестве одного из инструментов оценки качества

получаемого информационного материала выбрана методика, опирающаяся на гистограмму яркости изображения как инструмент для оценки и визуализации [14].

Гистограмма яркости изображения представляет собой столбчатую диаграмму, на которой отображена зависимость частоты появления точек с заданной яркостью. Для исследования были построены гистограммы яркости для каналов Gray, Red, Green, Blue.

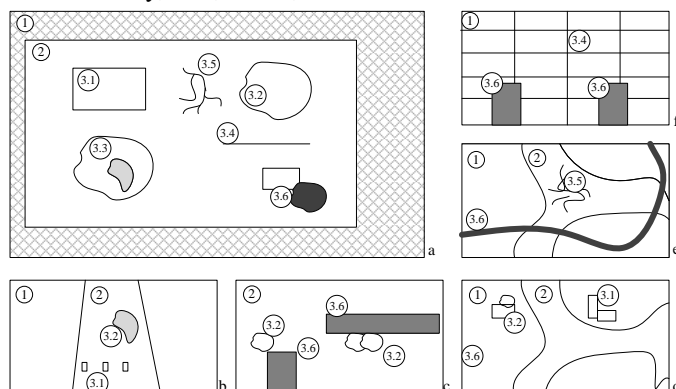


Рис. 2. Структура изображения опасного производственного объекта

В результате визуального исследования гистограмм одной из задач по оценке доли разрушения швов между панелями здания выявлены характерные формы гистограммы (табл. 2).

Идеальным случаем, исключающим интерактивную вмешательство пользователя, является третья гистограмма в табл. 2. Случай 1 и 2 требуют исключения областей повышенной или пониженной яркости в интерактивном режиме. Случаи 4 и 5 определяют изображения, которые относятся «некачественных» для автоматической обработки и должны быть исключены из выборки.

ТЕХНОЛОГИЯ КЛАССИФИКАЦИИ ДЛЯ СОРТИРОВЩИКА ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ ФОРМЫ ГИСТОГРАММА ЯРКОСТИ

Для определения типовой траектории обработки изображений в производственных условиях возникает необходимость в разработке автоматизированного сортировщика исходных данных. Технология работы сортировщика изображений представлена рис. 3.

Согласно приведенной технологии формируется массив изображений (*Image Array*) исследуемых объектов (*Image*). Из массива *Image Array* поочередно извлекается каждое изображение и подвергается оцифровке. На основе полученной матрицы выполняется построение одномерного массива с частотами появления точек с заданной яркостью (*Numeric histogram matrix*) и на его основе визуализируется гистограмма изображения (*Histogram visualization*). Классификатор изображений (*Histogram classifier*) принимает решение об отнесении изображения к заранее определенным классам на основе формы гистограммы. Классификатор гистограмм приводит к задаче обработки одномерного массива, в которой требуется определить количество и положение глобальных экстремумов в одномерном массиве.

При этом необходимо назначение порогов и уступок по ширине интервала и отличию между уровнями экстремумов.

Таблица 2
Характерные формы гистограмм изображения панельного здания

№	Исходное изображение	Гистограмма	Характеристика
1			На изображении наблюдается основной фон изучаемого объекта и элемент(ы) с высокой яркостью, который должен быть исключен из рассмотрения
2			На изображении наблюдается основной фон изучаемого объекта и элемент(ы) с низкой яркостью, который должен быть исключен из рассмотрения
3			Все изображение практически заполнено фоном изучаемого объекта, для которого выполняется поиск нарушения сплошности
4			На изображении представлено множество объектов разной цветности и контрастности
5			На изображении представлено множество объектов разной цветности и контрастности на общем практически монотонной фоне

Для каждого класса аккумулируются частотные показатели гистограмм (Accumulator by class) и строятся групповые гистограммы, форма которых определяет траекторию обработки изображений в классе (Histograms by class). При этом необходимо назначение порогов и уступок по ширине интервала и отличию между уровнями экстремумов. Для каждого класса аккумулируются частотные показатели гистограмм (Accumulator by class) и строятся групповые гистограммы, форма которых определяет траекторию обработки изображений в классе (Histograms by class).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты проведенных исследований показали необходимость разработки программного обеспечения для построения гистограммы и исследования изображения с его помощью на рис. 4 приведен вид рабочего окна в режиме обработки изображения как одного из примеров работы программного обеспечения для визуализации гистограммы (Histogram visualization).

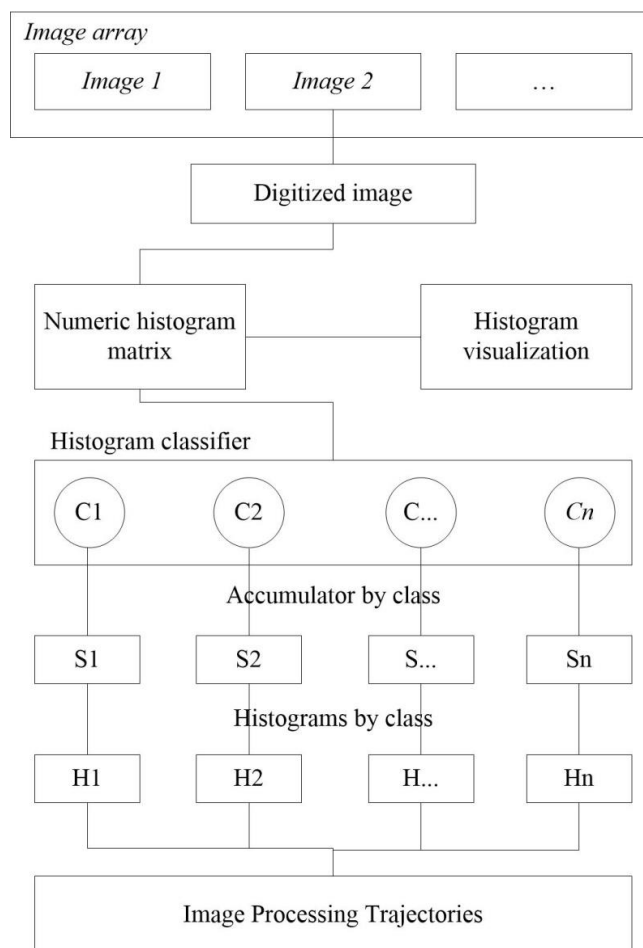


Рис. 3. Технология работы сортировщика изображений: C_i – классы изображений; S_i – накопленные частоты гистограмм; H_i – групповые гистограммы; n – количество классов

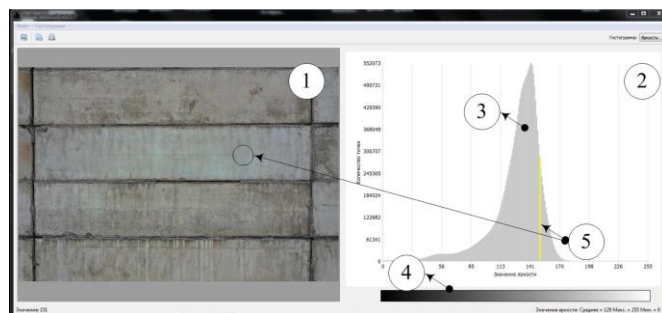


Рис. 4. Вид рабочего окна программного продукта для построения и исследования изображения: 1 – исходное загруженное изображение; 2 – область для построения гистограммы; 3 – гистограмма; 4 – шкала яркости; 5 – точка исследования

В программном продукте заложены возможности исследования гистограммы:

- 1) открытие и загрузка изображения в область (1);
- 2) построение гистограммы (3) открытого изображения в области (2);
- 3) отображение шкалы яркости, в том числе по каналам(4);
- 4) интерактивное указание точки на изображении и поиска ее яркости на гистограмме (5);

5) расчет статистических характеристик изображения: средней яркости изображения, минимального и максимального значения яркости;

6) выгрузку одномерного массива яркостей в файл электронной таблицы;

7) построение канальных гистограмм (рис. 5)

С использованием разработанного программного продукта в автоматизированном режиме выполнена классификация изображений, полученных при исследовании разрушения межпанельных швов промышленного здания. Обработано 106 изображений, среди которых выявлено: 5 изображений с множественными объектами и непригодными для дальнейшей автоматической обработки; 22 изображения, на которых размещен только объект исследования и не требуется предварительной подготовки для дальнейшего исследования; 70 изображений, которые требуют интерактивного отделения областей исследования.

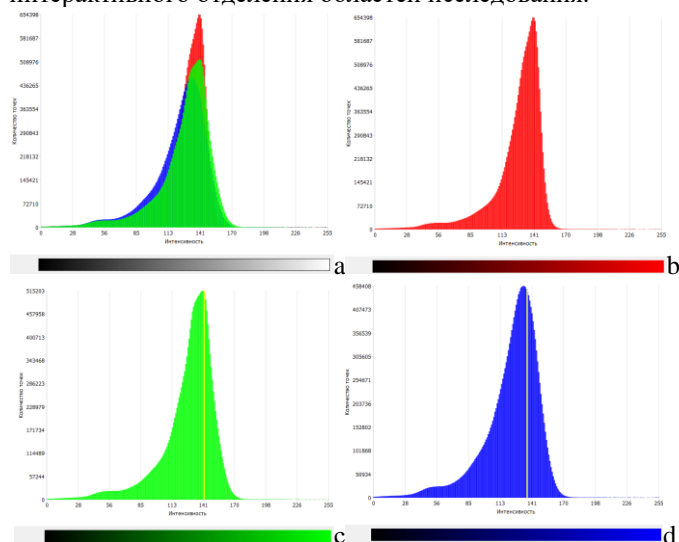


Рис. 5. Вид гистограмм по каналам: а – каналы RGB; б – красный канал; с – зеленый канал; д – синий канал

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам исследования получено, что:

1) применение графической информации в процессе экспертной оценки объектов является приоритетным направлением, которое позволяет снизить влияние человеческого фактора на результаты и в настоящее время становится перспективным для развития технологий экспертной оценки;

2) использование гистограмм яркости требует разработки классификаторов, которые в автоматическом режиме позволяют определить структуру изображений;

3) при известной структуре изображений возможно определение траектории обработки изображений, определение качества полученного графического материала и функции технологической подготовки изображений.

Описание математической основы определения формообразующих характеристик изображения не входит в рамки приведенной работы и будет приведена в последующих публикациях.

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 кон-

троля территорий, зданий и сооружений ПАО «ММК» с использованием беспилотных воздушных судов (БВС)»

ЛИТЕРАТУРА

1. Logunova, O. S. Computerized quality estimates of continuous-cast billet / O. S. Logunova, D. K. Devyatov, K. K. Nurov // *Steel in Translation*. – 2005. – Vol. 35. – No 9. – P. 36-42.

2. Automatic system for intelligent support of continuous cast billet production control processes / O. S. Logunova, I. I. Matsko, I. A. Posohov, S. I. Luk'ynov // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2014. – Vol. 74. – No 9-12. – P. 1407-1418. – DOI 10.1007/s00170-014-6056-4.

3. Results of a pilot experiment on monitoring the condition of buildings and structures using unmanned aerial vehicles / M. Yu. Narkevich, O. S. Logunova, P. I. Kalandarov [et al.] // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science : 2nd International Conference on Energetics, Civil and Agricultural Engineering 2021 (ICECAE 2021), Tashkent, 14–16 октября 2021 года*. – Tashkent: IOP Science, 2021. – P. 012030. – DOI 10.1088/1755-1315/939/1/012030.

4. Васильев, В. Н. Методы сегментации изображений на основе анализа и модификации локальных гистограмм / В. Н. Васильев, И. П. Гурув, М. В. Волков // *Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики*. – 2004. – № 16. – С. 108-112.

5. Белозерский, Л. А. Автоматизация обработки и анализа гистограмм в задачах распознавания космических изображений / Л. А. Белозерский, Л. В. Орешкина // *Исследование Земли из космоса*. – 2009. – № 3. – С. 47-54.

6. Емельянов, Е. Г. Исследование эффективности сегментации сложно-структурируемых изображений посредством нахождения моды гистограммы скользящего окна / Е. Г. Емельянов, В. С. Комков, А. Е. Ханьков // *Российская наука и образование сегодня: проблемы и перспективы*. – 2015. – № 2(5). – С. 155-159.

7. Зено, Б. Распознавание событий на изображениях на основе многоуровневых гистограмм локальных шаблонов / Б. Зено, Д. А. Юдин, Б. Алхатиб // *Международная конференция "Актуальные проблемы робототехники и автоматизации"*, Белгород, 08–09 октября 2015 года / Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2015. – С. 67-74.

8. Пятаева, А. В. Применение эволюционного алгоритма для сглаживания гистограмм при раннем обнаружении дыма на открытых пространствах / А. В. Пятаева, М. Н. Фаворская // *DSPA: Вопросы применения цифровой обработки сигналов*. – 2016. – Т. 6. – № 4. – С. 813-816.

9. Ключев, В. В. Обнаружение объектов на изображениях с помощью гистограммы направленных градиентов / В. В. Ключев // *Аллея науки*. – 2019. – Т. 2. – № 2(29). – С. 913-917.

10. Раухваргер, А. Б. Приведение гистограммы яркости слабоконтрастных цифровых изображений к двухуровневому кусочно-равномерному распределению / А. Б. Раухваргер, Н. А. Пошехонов // *Вестник Астраханского государственного технического университета*. Серия:

Управление, вычислительная техника и информатика. – 2020. – № 1. – С. 57-63. – DOI 10.24143/2072-9502-2020-1-57-63.

11. Раухваргер, А. Б. Обработка цифровых изображений приведением гистограммы яркости к двухуровневому кусочно равномерному распределению / А. Б. Раухваргер, Н. А. Пошехонов // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ. – 2019. – Т. 6. – С. 42-45.

12. Results of experimental tests of building samples / M. Yu. Narkevich, O. S. Logunova, P. I. Kalandarov [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science : 2nd International Conference on Energetics, Civil and Agricultural Engineering 2021 (ICECAE 2021), Tashkent, 14–16 октября 2021 года. – Tashkent: IOP Science, 2021. – P.

012031. – DOI 10.1088/1755-1315/939/1/012031.

13. Results of a pilot experiment on monitoring the condition of buildings and structures using unmanned aerial vehicles / M. Yu. Narkevich, O. S. Logunova, P. I. Kalandarov [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science : 2nd International Conference on Energetics, Civil and Agricultural Engineering 2021 (ICECAE 2021), Tashkent, 14–16 октября 2021 года. – Tashkent: IOP Science, 2021. – P. 012030. – DOI 10.1088/1755-1315/939/1/012030.

14. Представление и визуализация результатов научных исследований : учебник / О. С. Логунова, П. Ю. Романов, Л. Г. Егорова, Е. А. Ильина. – Москва : Издательский Дом "Инфра-М", 2019. – 156 с. – ISBN 978-5-16-014111-4.

TECHNOLOGY FOR IMAGE CLASSIFICATION OF A HAZARDOUS PRODUCTION FACILITY USING BRIGHTNESS HISTOGRAM

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

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

e-mail: Logunova55@mail.ru

Abstract. The purpose of the study is to determine the quality of video material obtained using unmanned aerial vehicles for their subsequent use in the system of expert assessment of the technical condition of hazardous production facilities. Based on the results of previous studies, a generalized structure of images was proposed with the selection of the main elements. The work substantiates the use of brightness histograms as the main tool for building an automatic image classifier. The technology of functioning of the image classifier and the developed software product, which performs the main functions of constructing histograms and its use in the work of the classifier, are described. As a result, the proposed technology made it possible to automatically process 106 photographs of hazardous production facilities and distinguish three main classes among them: images with multiple objects and unsuitable for further automatic processing; 22 images that contain only the object of study and do not require preliminary preparation for further research; 70 images that require interactive identification. It has been established that with a known image structure, it is possible to determine the image processing trajectory, determine the quality of the obtained graphic material and the functions of technological image preparation.

Keywords: image, hazardous production facilities, image histogram, image structure, irregular shape object

REFERENCES

1. Logunova, O. S. Computerized quality estimates of continuous-cast billet / O. S. Logunova, D. K. Devyatov, K. K. Nurov // Steel in Translation. – 2005. – Vol. 35. – No 9. – P. 36-42.

2. Automatic system for intelligent support of continuous cast billet production control processes / O. S. Logunova, I. I. Matsko, I. A. Posohov, S. I. Luk'ynov // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2014. – Vol. 74. – No 9-12. – P. 1407-1418. – DOI 10.1007/s00170-014-6056-4.

3. Results of a pilot experiment on monitoring the condition of buildings and structures using unmanned aerial vehicles / M. Yu. Narkevich, O. S. Logunova, P. I. Kalandarov [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science : 2nd International Conference on Energetics, Civil and Agricultural Engineering 2021 (ICECAE 2021), Tashkent, 14–16 октября 2021 года. – Tashkent: IOP Science, 2021. – P. 012030. – DOI 10.1088/1755-1315/939/1/012030.

4. Vasil'ev, V. N. Metody segmentacii izobrazhenij na os-

nove analiza i modifikacii lokal'nyh gistogramm / V. N. Vasil'ev, I. P. Gurov, M. V. Volkov // Nauchno-tehnicheskij vestnik Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta informacionnyh tekhnologij, mekhaniki i optiki. – 2004. – № 16. – S. 108-112.

5. Belozerskij, L. A. Avtomatizaciya obrabotki i analiza gistogramm v zadachah raspoznavaniya kosmicheskix izobrazhenij / L. A. Belozerskij, L. V. Oreshkina // Issledovanie Zemli iz kosmosa. – 2009. – № 3. – S. 47-54.

6. Emel'yanov, E. G. Issledovanie effektivnosti segmentacii slozhnostrukturiruemyx izobrazhenij posredstvom nahozhdeniya mody gistogrammy skol'zyashchego okna / E. G. Emel'yanov, V. S. Komkov, A. E. Hanykov // Rossijskaya nauka i obrazovanie segodnya: problemy i perspektivy. – 2015. – № 2(5). – S. 155-159.

7. Zeno, B. Raspoznavanie sobytij na izobrazheniyah na osnove mnogourovnevnyh gistogramm lokal'nyh shablonov / B. Zeno, D. A. YUdin, B. Alkhatib // Mezhdunarodnaya konferenciya "Aktual'nye problemy robototekhniki i avtomatiki", Belgorod, 08–09 oktyabrya 2015 goda / Belgorodskij gosudar-

stvennyj tekhnologicheskij universitet im. V.G. SHuhova. – Belgorod: Belgorodskij gosudarstvennyj tekhnologicheskij universitet im. V.G. SHuhova, 2015. – S. 67-74.

6. Emel'yanov, E. G. Issledovanie effektivnosti segmentacii slozhnostrukturiruemym izobrazhenij posredstvom nahozhdeniya mody gistogrammy skol'zyashchego okna / E. G. Emel'yanov, V. S. Komkov, A. E. Hanykov // Rossijskaya nauka i obrazovanie segodnya: problemy i perspektivy. – 2015. – № 2(5). – S. 155-159.

7. Zeno, B. Raspoznavanie sobytij na izobrazheniyah na osnove mnogourovnevnyh gistogramm lokal'nyh shablonov / B. Zeno, D. A. YUdin, B. Alkhatib // Mezhdunarodnaya konferenciya "Aktual'nye problemy robototekhniki i avtomatiki", Belgorod, 08–09 oktyabrya 2015 goda / Belgorodskij gosudarstvennyj tekhnologicheskij universitet im. V.G. SHuhova. – Belgorod: Belgorodskij gosudarstvennyj tekhnologicheskij universitet im. V.G. SHuhova, 2015. – S. 67-74.

8. Pyataeva, A. V. Primenenie evolyucionnogo algoritma dlya sglazhivaniya gistogramm pri rannem obnaruzhenii dyma na otkrytyh prostranstvah / A. V. Pyataeva, M. N. Favorskaya // DSPA: Voprosy primeneniya cifrovoj obrabotki signalov. – 2016. – T. 6. – № 4. – S. 813-816.

9. Klyuev, V. V. Obnaruzhenie ob"ektov na izobrazheniyah s pomoshch'yu gistogrammy napravlennyh gradientov / V. V. Klyuev // Alleya nauki. – 2019. – T. 2. – № 2(29). – S. 913-917.

10. Rauhvarger, A. B. Privedenie gistogrammy yarkosti slabokontrastnyh cifrovym izobrazhenij k dvuhurovnevomu kusochno-ravnomernomu raspredeleniyu / A. B. Rauhvarger,

N. A. Poshekhonov // Vestnik Astrahanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika. – 2020. – № 1. – S. 57-63. – DOI 10.24143/2072-9502-2020-1-57-63.

11. Rauhvarger, A. B. Obrabotka cifrovym izobrazhenij privedeniem gistogrammy yarkosti k dvuhurovnevomu kusochno-ravnomernomu raspredeleniyu / A. B. Rauhvarger, N. A. Poshekhonov // Matematicheskie metody v tekhnike i tekhnologiyah – MMTT. – 2019. – T. 6. – S. 42-45.

12. Results of experimental tests of building samples / M. Yu. Narkevich, O. S. Logunova, P. I. Kalendarov [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science : 2nd International Conference on Energetics, Civil and Agricultural Engineering 2021 (ICECAE 2021), Tashkent, 14–16 oktyabrya 2021 goda. – Tashkent: IOP Science, 2021. – P. 012031. – DOI 10.1088/1755-1315/939/1/012031.

13. Results of a pilot experiment on monitoring the condition of buildings and structures using unmanned aerial vehicles / M. Yu. Narkevich, O. S. Logunova, P. I. Kalendarov [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science : 2nd International Conference on Energetics, Civil and Agricultural Engineering 2021 (ICECAE 2021), Tashkent, 14–16 oktyabrya 2021 goda. – Tashkent: IOP Science, 2021. – P. 012030. – DOI 10.1088/1755-1315/939/1/012030.

14. Predstavlenie i vizualizaciya rezul'tatov nauchnyh issledovanij : uchebnik / O. S. Logunova, P. YU. Romanov, L. G. Egorova, E. A. Il'ina. – Moskva : Izdatel'skij Dom "Infra-M", 2019. – 156 s. – ISBN 978-5-16-014111-4.

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.

O.S. Logunova, M.Yu. Narkevich, V.D. Kornienko, V.V. Kabanova Technology for Image Classification of a Hazardous Production Facility Using Brightness Histogram. *Avtomatizirovannye tehnologii i proizvodstva* [Automation of technologies and production], 2022, no.2(26), pp.26-31. (In Russian).

УДК621.18-5

СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ КОТЛАМИ ТИПА «ГАНОМАГ»

Д.О. Сниткин¹, Е.Ю. Мухина², И.С. Бондарев³

^{1,2}ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г. И. Носова», г. Магнитогорск, РФ

³ООО «КомпасПлюс», г. Магнитогорск, РФ

¹daniljust4fun@gmail.com

Аннотация. В статье рассмотрен технологический процесс паровых котлов типа «ГАНОМАГ». Необходимо предложить такой локальный контур регулирования, который выполнял бы функцию уменьшения себестоимости электроэнергии. Предлагается регулировать расход доменного газа, путём использования средств автоматизации. Температура топки не является контролируемым параметром режима работы парового котла, что позволяет в виде топлива использовать доменный газ, понижая при этом калорийность использованного топлива.

Ключевые слова: котлы «ГАНОМАГ», автоматизация, управление, контур регулирования, расход, доменный газ.

ВВЕДЕНИЕ

Центральная электростанция (ЦЭС) является паротурбинной теплофикационной электростанцией, назначение которой – снабжать потребителей, в основном это цеха публичного акционерного общества «Магнитогорского металлургического комбината» (ПАО «ММК»), электроэнергией, тепловой энергией (пар, теплофикационная вода), химически-очищенной водой (ХОВ) и конденсатом. Основными потребителями тепловой энергии станции являются: Ленинский район города Магнитогорска, где тепло горячей воды используется для нужд отопления и горячего водоснабжения, а также промышленная площадка ПАО «ММК».

Особенностью котельно-турбинного процесса, как объекта автоматического управления, является скорость изменения состояния системы автоматического управления. Параметры подачи топлива сильно изменяются в кратчайшие сроки, что усложняет управление данными агрегатами.

Основной функцией котельного участка являются:

- Снижение потребления природного газа на ЦЭС на основе обеспечения максимального текущего КПД котлов при рациональном соотношении потребления природного и доменного газа.
- Максимальная утилизация доменного газа, снижение выбросов «на свечу».
- Снижение вредного воздействия на окружающую среду.
- Повышение надежности работы Центральной электростанции.
- Снижение риска «Возникновения аварий и инцидентов».

- Создание надежной, гибкой, резервируемой, наращиваемой информационно-вычислительной системы управления, сбора и передачи данных на базе контроллерного оборудования.
- Повышение надежности работы технологического оборудования котельного участка ЦЭС.

В наше время уровень автоматизации котельного производства находится на высоком уровне как в России, так и в других странах, где развито производство такого рода. Высокий уровень конкуренции на рынке разработки средств автоматизации обеспечивает повышение их качества, что дает благонадежную перспективу для автоматизации котельного производства на долгие годы.

Для оптимизации процесса подачи доменного газа необходимо фиксировать и контролировать давление и расход доменного и природного газов. Для улучшения производительности парового котла (ПК) принято работать при максимально полезном соотношении доменный/природный газ, для поддержания КПД ПК в максимальном значении [1].

КОНТУРЫ УПРАВЛЕНИЯ ПАРОВЫХ КОТЛОВ ТИПА «ГАНОМАГ»

Все котлы на Центральной электростанции управляются при помощи систем автоматического регулирования (САР) [2].

Функциональная группа регулирования давления пара в магистральном паропроводе является главным регулятором всей котельной. Она предназначена для поддержания давления пара в газовых пароперегревателях по заданию старшего машиниста котельного участка. Задание давления пара осуществляется при помощи программного обеспечения паровых котлов (рис. 1) [3]. Давление в главных паропроводах поддерживается с целью стабилизации режимов работы станции и обеспечение паром с заданными характеристиками потребителей.

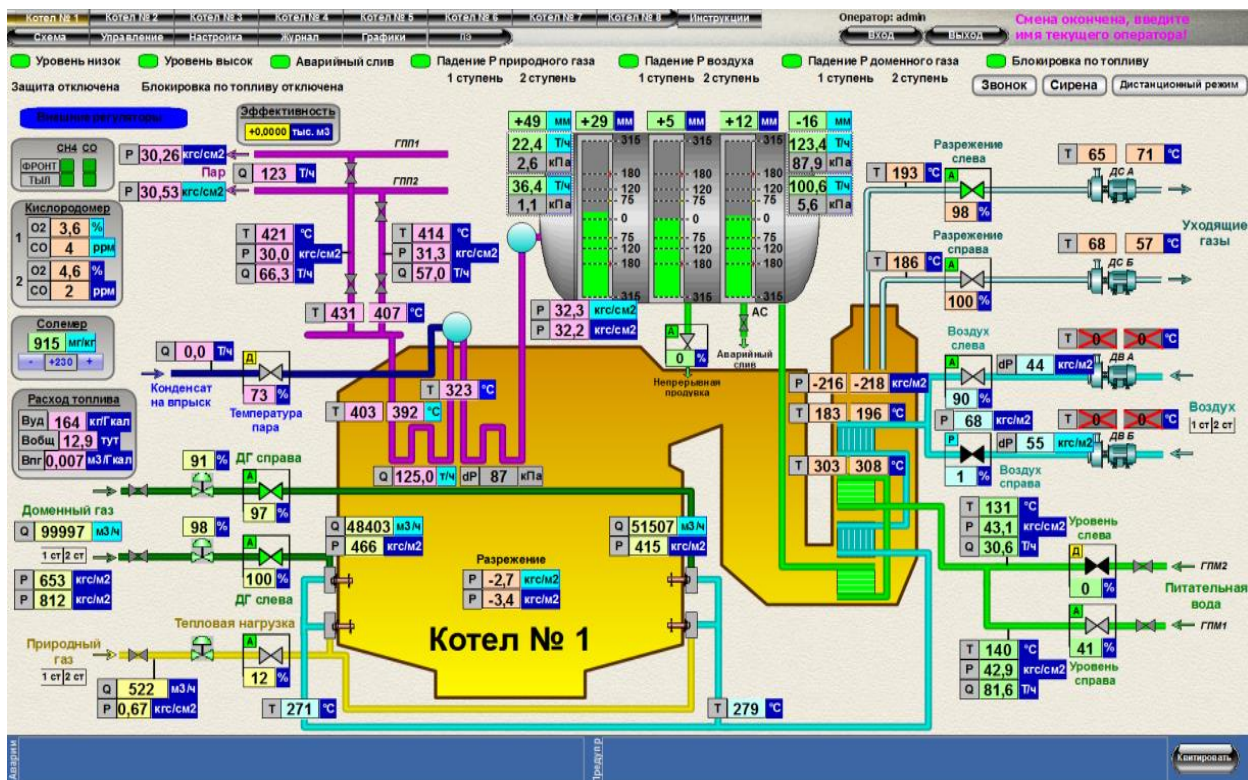


Рис. 1. Видеоквдр структурной схемы котла

Функциональная группа регулирования давления пара в магистральном паропроводе включает в себя:

- четыре датчика давления в магистрали расположенных в разных секциях главных паропроводов;
- управляющий контроллер.

Регулирование давления пара в магистральном паропроводе осуществляется с помощью пропорционального интегрального дифференциального регулятора (ПИД-регулятора), реализованного в контроллере. Сигнал обратной связи ПИД-регулятора поступает в контроллер с одного из датчиков давления в магистрали, определяемого оператором котельной. Задание давления пара в магистральном паропроводе ПИД-регулятора устанавливается оператором котельной.

Функциональная группа регулирования температуры перегретого пара предназначена для поддержания температуры перегретого пара на заданном уровне в соответствие с заданием оператора котла. Регулирование температуры осуществляется путем впрыска конденсата в парохладитель котла. Предельная способность парохладителя для котлов типа “ТАНОМАГ” составляет 45°C.

Функциональная группа регулирования температуры перегретого пара включает в себя:

- управляющий котроллер;
- регулирующий клапан впрыска конденсата;
- датчик температуры пара после пароперегревателя слева;
- датчик температуры пара после пароперегревателя справа;
- датчик положения клапана впрыска конденсата;
- датчик расхода конденсата на впрыск;
- исполнительный механизм изменения положения клапана впрыска конденсата;

– блок ручного управления (БРУ) положением клапана впрыска конденсата.

Регулирование температуры перегретого пара осуществляется с помощью пропорционального интегрального регулятора (ПИ-регулятора), реализованного в контроллере.

Для обеспечения стабильного давления в коллекторе конденсата на впрыск и обеспечения стабильности работы котлов станции, давление в коллекторе поддерживается в автоматическом режиме путем управления с контроллера главного регулятора, имеющего на входе показания давления в коллекторе конденсата, положение клапана циркуляции конденсата и температуру конденсата в общем коллекторе, а на выходе дискретные выходные сигналы по управлению клапаном циркуляции конденсата, установленного в турбинном участке ЦЭС на отметке 10 м.

Функциональная группа регулирования давления воздуха предназначена для поддержания давления воздуха слева и справа на заданном уровне в соответствие с режимной картой котла. Регулирование давления осуществляется путем изменения положения шиберов воздуха слева/справа направляющих аппаратов дутьевых вентиляторов.

Функциональная группа регулирования давления воздуха включает в себя:

- управляющий котроллер;
- регулирующий шибер воздуха слева;
- регулирующий шибер воздуха справа;
- датчик давления воздуха слева;
- датчик давления воздуха справа;
- датчик положения шиберы воздуха слева;
- датчик положения шиберы воздуха справа;

- блок определения оптимального давления воздуха «Монитор-КПД»;
- кислородомер (1 канал);
- кислородомер (2 канал);
- исполнительный механизм изменения положения шиберов воздуха слева;
- исполнительный механизм изменения положения шиберов воздуха справа;
- блок ручного управления положением шиберов воздуха слева;
- блок ручного управления положением шиберов воздуха справа.

Регулирование давления воздуха слева и справа осуществляется по двум независимым схемам с помощью ПИД-регулятора, реализованного в контроллере. Сигнал обратной связи ПИД-регулятора поступает в контроллер с датчика давления воздуха слева и справа.

При регулировании давления воздуха слева и справа обязательным является контроль показаний кислородомеров по содержанию кислорода и углекислого газа СО в уходящих газах.

Функциональная группа регулирования разрежения в топке котла предназначена для поддержания разрежения в топке на заданном уровне в соответствии с режимной картой котла. Регулирование разрежения осуществляется путем изменения количества работающих дутьевых вентиляторов, положения шиберов воздуха слева/справа, шиберов отходящих дымовых газов слева и справа направляющих аппаратов дымососов (ДС) и регулирующих клапанов доменного газа слева и справа.

Функциональная группа регулирования разрежения включает в себя:

- управляющий контроллер;
- регулирующий шибер разрежения слева;
- регулирующий шибер разрежения справа;
- регулирующий клапан доменного газа слева;
- регулирующий клапан доменного газа справа;
- отсекающий доменного газа слева;
- отсекающий доменного газа справа;
- датчик давления доменного газа слева;
- датчик давления доменного газа справа;
- датчик разрежения в топке;
- датчик положения шиберов разрежения слева;
- датчик положения шиберов разрежения справа;
- датчик положения клапана доменного газа слева;
- датчик положения клапана доменного газа справа;
- исполнительный механизм изменения положения шиберов разрежения слева;
- исполнительный механизм изменения положения шиберов разрежения справа;
- исполнительный механизм изменения положения клапана доменного газа слева;
- исполнительный механизм изменения положения клапана доменного газа справа;
- блок ручного управления положением шиберов разрежения слева;
- блок ручного управления положением шиберов разрежения справа;

- блок ручного управления положением клапана доменного газа слева;
- блок ручного управления положением клапана доменного газа справа.

Регулирование разрежения в топке котла осуществляется по двум контурам. Основному контуру регулирования разрежения с использованием дымососов и контуру регулирования подачи доменного газа с использованием клапанов доменного газа слева и справа.

Контур регулирования подачи доменного газа осуществляет стабилизацию подачи газа на максимально возможном уровне. При этом разрежение в топке котла падает вследствие низкой калорийности доменного газа. Поэтому задающим воздействием для данного контура является минимальный расчетный уровень, обеспечивающий выполнение ограничения снизу на допустимые значения колебаний разрежения.

Контур регулирования разрежения дымососами непосредственно влияет на разрежение в топке. С целью увеличения подачи доменного газа вентилятор дымососа должен развивать максимальную производительность, допустимую по технологическому ограничению разрежения в топке. Задающим воздействием для данного контура является максимальный расчетный уровень, обеспечивающий выполнение ограничения сверху на допустимые значения колебаний разрежения.

Регулирование разрежения дымососами слева и справа осуществляется с помощью ПИД-регулятора, реализованного в контроллере. Сигнал обратной связи ПИД-регулятора поступает в контроллер с датчика разрежения в топке. При регулировании предусмотрено синхронное изменение положения шиберов воздуха слева/справа направляющих аппаратов ДС слева и справа.

Регулирование подачи доменного газа слева/справа осуществляется по двум независимым схемам с помощью ПИД-регулятора, реализованного в контроллере. Сигнал обратной связи ПИД-регулятора поступает в контроллер с датчика разрежения в топке.

Функциональная группа регулирования уровня воды в барабане котла предназначена для поддержания уровня воды в барабане котла в пределах допустимых значений. Регулирование уровня воды осуществляется путем изменения положения клапанов питательной воды слева и справа.

Функциональная группа регулирования уровня воды в барабане котла включает в себя:

- управляющий контроллер;
- регулирующий клапан питательной воды слева;
- регулирующий клапан питательной воды справа;
- датчик давления питательной воды слева;
- датчик давления питательной воды справа;
- датчик температуры питательной воды слева;
- датчик температуры питательной воды справа;
- датчик расхода питательной воды слева;
- датчик расхода питательной воды справа;
- датчик положения клапана питательной воды слева;
- датчик положения клапана питательной воды справа;
- датчик давления в барабане;
- датчик уровня слева (защита I ступень);
- датчик уровня слева (защита II ступень);

- датчик уровня справа (аварийный слив);
- исполнительный механизм изменения положения клапана питательной воды слева;
- исполнительный механизм изменения положения клапана питательной воды справа;
- блок ручного управления положением клапана питательной воды слева;
- блок ручного управления положением клапана питательной воды справа.

Регулирование уровня воды в барабане котла осуществляется с помощью ПИД-регулятора, реализованного в контроллере.

Выбор реализации обратной связи, а также регулирующего клапана питательной воды слева и справа осуществляет оператор. Задание уровня воды в барабане ПИД-регулятора устанавливается оператором.

Функциональная группа тепловой нагрузки предназначена для поддержания тепловой нагрузки котла на заданном уровне. Регулирование нагрузки осуществляется путем изменения положения регулирующего клапана природного газа.

Функциональная группа регулирования тепловой нагрузки включает в себя:

- управляющий котроллер;
- регулирующий клапан природного газа;
- датчик давления природного газа;
- датчик давления в барабане;
- датчик давления пара слева;
- датчик давления пара справа;
- датчик расхода пара слева;
- датчик расхода пара справа;
- контроллер PLC Siemens S7414H-20P;
- переключатель режимов управления, находящийся на автоматизированном рабочем месте машиниста котла;
- усилитель ПБР – 2М;
- исполнительный механизм МЭО - 630/63 – 0,25;
- задающее устройство, осуществляется через программное обеспечение оператора;
- регулирующий клапан доменного газа [4, 5].

СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ПОДАЧИ ДОМЕНОГО ГАЗА В КОТЛАХ ТИПА «ГАНОМАГ»

При выплавке чугуна в доменных печах сопутствующим продуктом является доменный газ. Он используется как газообразное топливо в доменном, коксохимическом и энергетическом производстве. Для использования потенциальной энергии доменного газа, поступающего из доменной печи, используют газовые турбины. Котёл «ГАНОМАГ» - это вертикально – водотрубный, с естественной циркуляцией, трёх барабанный котёл системы «Стерлинг». Разработка системы автоматического регулирования расхода доменного газа в котлах типа «ГАНОМАГ» позволит снизить объем потребления покупных энергетических ресурсов за счет использования вторичных энергетических ресурсов [6].

Контур регулирования расхода и давления доменного газа (рис. 2, 3) включает в себя диафрагмы камерные ДКС – 10 – 100 – А/Б, с которых сигнал поступает на измерительный преобразователь Метран– 150 и далее на контроллер PLS Siemens S7414H-20P. Контроллер формирует

управляющие сигналы в зависимости от значения давления доменного газа и отклонения КПД от оптимального и подаёт их на пускатель бесконтактный реверсивный ПБР – 2М, на котором сигнал усиливается и подаётся на исполнительный механизм МЭО 630/63 – 0,25. Визуализация процесса регулирования осуществляется промышленным компьютером на базе процессора Intel i5 – 2300 2,8 ГГц. С его помощью выбираются режимы управления - автоматический или дистанционный.

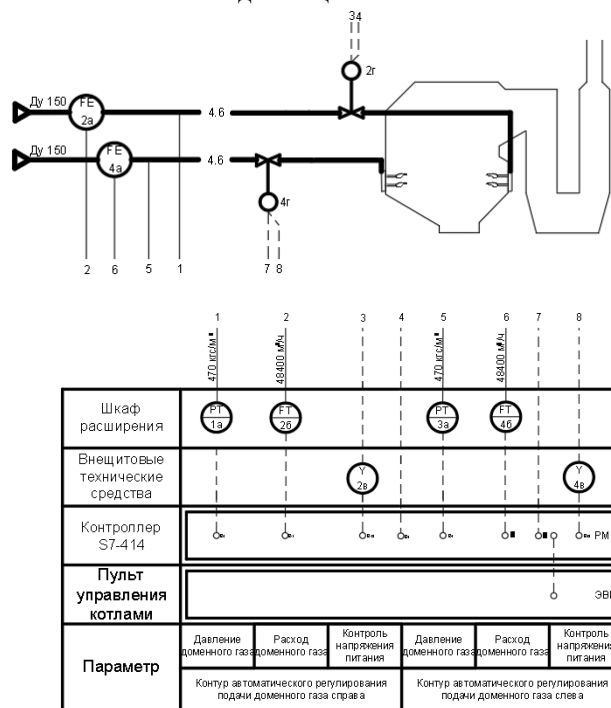


Рис.2. Схема автоматизации системы автоматического регулирования подачи доменного газа в котлах типа «ГАНОМАГ»

Поз.	Наименование	Кол.	Примечание
1а, 2б	Измерительный преобразователь, Метран – 150	4	
3а, 4б			
2а, 4а	Диафрагма камерная, ДКС – 10 – 100 – А/Б – 1	2	
2б, 4б	Пускатель бесконтактный реверсивный, ПБР – 2М	2	
2а, 4а	Исполнительный механизм, МЭО – 630/63 – 0,25	2	
РМК	Регулирующее устройство, PLC Siemens S7414H – 20P	1	
ЭВМ	Промышленный компьютер, Intel i5-2300 2,8 ГГц	1	

Рис.3. Спецификация системы автоматического регулирования подачи доменного газа в котлах типа «ГАНОМАГ»

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Был разработан локальный контур регулирования управлением подачи доменного газа в паровых котлах типа «ГАНОМАГ». Предложенный контур выполняет необходимую функцию уменьшения себестоимости электроэнергии.

ЛИТЕРАТУРА

1. ПАО «ММК». Инструкция ММК СМК УГЭ-33-6. Эксплуатация и обслуживанию котлов «ГАНОМАГ» ст. №№ 1-5, ТП-200-1 ст. №№ 6-8, трубопроводов пара и горячей воды котельного участка ЦЭС ПАО «ММК»: ЭИ ММК ЦЭС–21–2021 / г. Магнитогорск. – Текст: непосредственный // 2021. – Ст. 5 – 82.

2. Парсункин, Б. Н. Система визуализации при создании адаптивного комплекса локального уровня управления в АСУ ТП промышленного производства / Б. Н. Парсункин, А. Р. Бондарева, Е. И. Полухина // Электротехнические системы и комплексы. – 2015. – № 2(27). – С. 44-47.

3. ООО «ОСК». Инструкция ТОИ ОСК КИПиА ЦЭС-52-2017. Техническое обслуживание систем контроля и управления теплоэнергетического оборудования ЦЭС ПАО «ММК» / г. Магнитогорск. - Текст: непосредственный // 2021. – Ст. 47 – 50.

4. Мухина, Е. Ю. Системы управления технологическими процессами и информационные технологии : Учебное пособие. Электронное издание / Е. Ю. Мухина, А. Р. Бондарева. – Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2015. – 110 с.

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

6. Сниткин, Д. О. Система автоматического регулирования подачи доменного газа в котлах типа "Ганомэг" / Д. О. Сниткин, Е. Ю. Мухина // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования : Тезисы 80-й международной научно-технической конференции, Магнитогорск, 18–22 апреля 2022 года. Том 1. – Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2022. – С. 356.

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

AUTOMATIC CONTROL SYSTEM FOR BOILERS OF THE "GANOMAG" TYPE

D.O. Snitkin¹, E.YU. Mukhina², I.S. Bondarev³

^{1,2}Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

³Compass Plus Limited Company

Abstract. The article describes the technological process of steam boilers of the "GANOMAG" type. It is necessary to propose such a local control circuit that would perform the function of reducing the cost of electricity. It is proposed to regulate the consumption of blast furnace gas by using automation tools. The furnace temperature is not a controlled parameter of the steam boiler operating mode, which allows the use of blast furnace gas as fuel, while reducing the caloric content of the fuel used.

Keywords: boilers "GANOMAG", automation, control, control circuit, flow rate, blast furnace gas.

REFERENCES

1. ПАО «ММК». Инструкция ММК SMK UGE-33-6. Эксплуатация и обслуживание котлов «GANOMAG» ст. №№ 1-5, ТР-200-1 ст. №№ 6-8, трубопроводов пара и горячей воды котельного участка ТЭС ПАО «ММК»: EI ММК ТЭС–21–2021 / г. Магнитогорск. – Текст: непосредственный // 2021. – pp. 5 – 82.

2. Parsunkin B.N., Bondareva A.R., Polukhina E.I. Sistema vizualizatsii pri sozdanii adaptivnogo kompleksa lokalnogo urovnya upravleniya v ASU TP promyshlennogo proizvodstva, Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы, 2015, no. 2(27), pp. 44-47.

3. ООО «ОСК». Инструкция ТОИ ОСК КИПиА ТЭС-52-2017. Техническое обслуживание систем контроля и управления теплоэнергетического оборудования ТЭС ПАО «ММК» / г. Магнитогорск. - Текст: непосредственный // 2021. – pp. 47 – 50.

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. 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.

6. Snitkin D.O., Mukhina E.Yu. Sistema avtomaticheskogo regulirovaniya podachi domenogo gaza v kotlakh tipa "Ganomag", Aktualnye problemy sovremennoy nauki, tekhniki i obrazovaniya : Tezisy 80-y mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, Magnitogorsk, 18–22 aprelya 2022 goda. Tom 1, Magnitogorsk, 2022, pp. 356.

7. Parsunkin B.N., Andreev S.M., Ryabchikova E.S. Avtomatizatsiya tekhnologicheskikh processov i proizvodstv v metallurgii [Automation of technological processes and production in metallurgy], Magnitogorsk, 2011, 151 p.

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.

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

СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО РЕЖИМА МЕТОДИЧЕСКОЙ ПЕЧИ

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

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

arslanarullin12@gmail.com, a.bondareva@magtu.ru

Аннотация. Давление в рабочем пространстве методических печей существенно влияет на их тепловую работу. Оно определяет интенсивность нагрева металла, удельный расход топлива, величину угара и окалинообразования, удобство обслуживания и сохранность агрегата. Целью управления газодинамическим режимом в рабочем пространстве методической печи является реализация энерго-сберегающего теплового режима нагрева при условии выполнения всех технологических ограничений и показателей работы нагревательных печей.

Ключевые слова: давление, методическая печь, контроль, автоматизация, газодинамический режим, регулирование, измерение

ВВЕДЕНИЕ

При нагреве металла под обработку давлением применяют проходные нагревательные печи [1]. Газодинамический режим или давление в рабочем пространстве промышленных печей определяет величину удельного расхода топлива, влияет на потери металла с окалиной и сохранность печей, а особенно на загазованность атмосферы производственного помещения. Несмотря на многообразие различных факторов, определяющих величину давления, имеется всего лишь один управляющий параметр. Это изменение разряжения в дымоотводящем канале, путём изменения положения поворотного клапана. Автоматическое управление газодинамическим режимом обычно осуществляется путём стабилизации давления под сводом рабочего пространства в зоне выдачи из печи нагретого изделия или металла [2].

Излишне высокое давление ведёт к выбиванию из печи продуктов сгорания, что наряду с ростом тепловых потерь вызывает ускоренный износ внешних конструкций, затрудняет визуальный контроль и обслуживание, загрязняет атмосферу цеха.

Слишком низкое давление обуславливает подсос в печь через рабочие окна и различные неплотности в кладке холодного воздуха, что ведёт к ухудшению использования топлива, увеличению угара и окалинообразования и затрудняет управление процессом горения [3].

Особенно опасен подсос воздуха через окно выдачи, вызывающий интенсивное охлаждение ближайшей заготовки и подстуживание подины. При длительной паузе в работе стана эта заготовка уже не может быть направлена в прокатку, а возвращается на склад.

Наиболее оптимальным является такой газодинамический режим работы печи, при котором контролируемые подсосы холодного воздуха и выбивания продуктов сгорания были бы минимальны.

СТРУКТУРНАЯ СХЕМА РЕГУЛИРОВАНИЯ ДАВЛЕНИЯ В РАБОЧЕМ ПРОСТРАНСТВЕ МЕТОДИЧЕСКОЙ ПЕЧИ

Система автоматического управления тепловым режимом методической печи стана 2000 содержит следующие основные контуры управления:

- управление температурой по зонам печи;
- управление соотношением газ-воздух в зонах печи;
- управление давлением в печи;
- управление температурой рекуператора;
- управление давлением воздуха в общем воздухопроводе;
- управление давлением газа в общем газопроводе.

Система автоматизации теплового режима методической печи представляет собой двухуровневую систему управления. В нижний уровень входят локальные подсистемы, осуществляющие сбор первичной информации, управление технологическим оборудованием и дистанционное управление технологическими параметрами процесса нагрева. Верхний уровень содержит подсистемы, работающие по алгоритмам, основанным на методах оптимального управления, и реализуется на базе вычислительных машин. Выполняемая циклически прикладная программа содержит аналоговые контуры регулирования, управляющие исполнительными механизмами печей [4].

Давление в рабочем пространстве методических печей существенно влияет на их тепловую работу. Оно определяет при прочих равных условиях интенсивность нагрева металла, удельный расход топлива, величину угара и окалинообразования, удобство обслуживания и сохранность агрегата [5,6].

Целью работы системы автоматического регулирования давления в рабочем пространстве методической печи является поддержание минимального положительного давления в печи для предотвращения поглощения холодного воздуха. Периодическое открытие заслонок окна выдачи вызывает дополнительные изменения давления, особенно сильно проявляющиеся в томильной зоне [7,8].

В реальности о величине текущих значений подсосов холодного воздуха и выбиваний продуктов сгорания можно объективно судить по величине разности текущих значений коэффициентов расхода воздуха на входе $\alpha_B^{BX}(\tau)$ и выходе $\alpha_B^{ВЫХ}(\tau)$ рабочего пространства методической печи.

Абсолютное значение текущей величины подсосов или выбиваний можно ориентировочно определить в соответствии с условием:

$$\Delta V_{\Pi}(\tau) = V_T(\tau) \cdot L_0 \cdot (\alpha_B^{ВЫХ}(\tau) - \alpha_B^{BX}(\tau))$$

где $V_T(\tau)$ - текущий расход топлива на печь м³/ч; τ - текущее время; L_0 - теоретически рассчитанный объем воздуха, необходимый для полного сжигания 1м³, используемого для отопления печи топлива.

Совпадение значений $\alpha_B^{BX}(\tau)$ и $\alpha_B^{ВЫХ}(\tau)$ свидетельствуют о минимальных значениях подсосов атмосферного воздуха и выбиваний из рабочего пространства печи.

Структурная схема контура регулирования давления в методической печи представлена на рис.1.

Измерение давления в печи осуществляется с помощью двух датчиков давления (Д), передающих сигнал о состоянии давления печи на контроллер. В контроллере, реализующем закон регулирования, происходит сравнение действительного значения давления с заданным, то есть рассчитывается сигнал рассогласования и вырабатывается управляющее воздействие. Непосредственное управление давлением в печи осуществляют два исполнительных механизма (ИМ), перемещающие регулирующие органы (РО), расположенные на трубопроводах, отводящих продукты сгорания (от верхних и от нижних зон печи), изменяя газодинамический режим. Управляющий сигнал контроллера поступает на бесконтактный пускатель (П), осуществляющий управление приводом исполнительного механизма. Данные о состоянии контролируемых величин с контроллера поступают на промышленный компьютер (ПК).

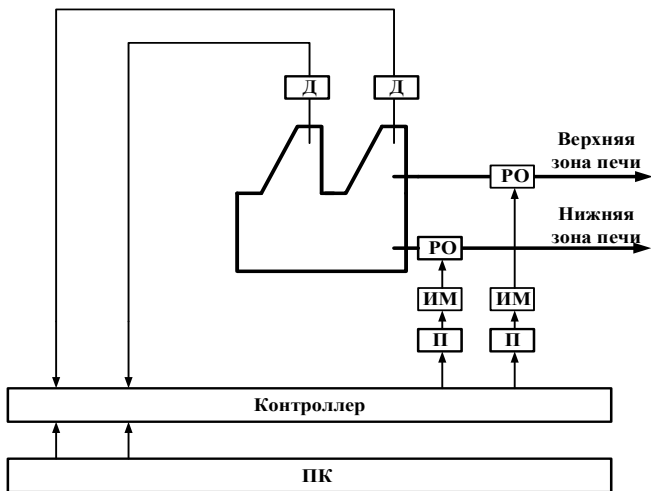


Рис. 1. Структурная схема контура регулирования давления в методической печи

ТЕХНИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ КОНТУРА УПРАВЛЕНИЯ

Функциональная схема автоматизации контура управления газодинамическим режимом методической печи представлена на рис. 2.

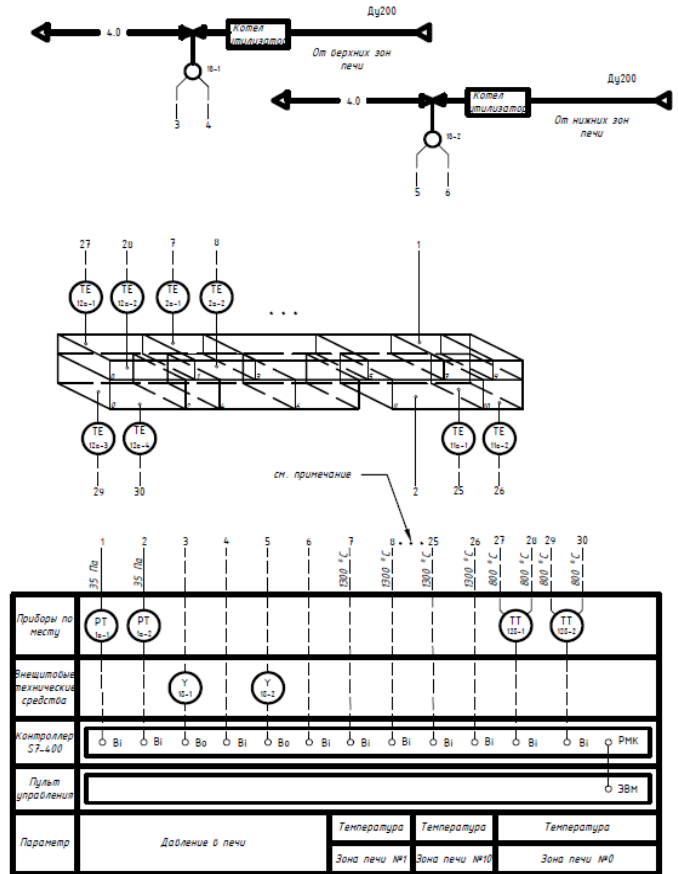


Рис. 2. Функциональная схема автоматизации контура управления

Представленная схема выполнена для двух зон печи, для остальных зон схема аналогична.

Схема автоматизации содержит контролируемые и регулируемые параметры:

- давление в печи;
- температура в зонах печи.

Процессы регулирования, контроля и сигнализации выполняет микропроцессорный контроллер Simatic S7-400, поз. РМК. Данные о состоянии контролируемых величин с контроллера поступают на промышленный компьютер Simatic Rack PC IL 40s, поз. ЭВМ. Simatic Rack PC IL 40s выполняет функцию визуализации, переключения режима управления (дистанционный, автоматический), а также с помощью него осуществляется управление в дистанционном режиме.

Система управления давлением в печи должна обеспечивать небольшое избыточное давление на уровне металла в томильной зоне. Измерение давления осуществляется с помощью двух датчиков давления Метран-150ТГ, поз. 1а-1, поз. 1а-2, передающих сигнал о состоянии давления печи на котроллер Simatic S7-400, поз. РМК.

Непосредственное управление давлением в печи осуществляют два исполнительных механизма МЭО-250/63-0,25, поз. 1в-1, 1в-2 перемещая клапана, расположенные на трубах, отводящих продукты сгорания (1в-1 от верхних зон печи, 1в-2 от нижних зон печи). Регулирующее воздействие из контроллера Simatic S7-400 для МЭО-250/63-0,25 поступает на бесконтактные пускатели ПБР-3М, поз. 1б-1,

16-2, управляющие приводом исполнительного механизма.

Для контроля температуры в методической зоне (зона печи №0) используются, преобразователи температуры ТХА-0192, поз. 12а-1 ... 12а-4, расположенные по две в верхней и нижней части зоны. Сигнал с термоэлектрических преобразователей поступает на вторичные преобразователи Метран-950МК, поз. 12б-1, 12б-2, передающие сигнал о состоянии температуры в методической зоне на контроллер Simatic S7 – 400, поз. РМК.

Для контроля состояния температуры в сварочных и томильных (зоны печи № 1–10) зонах используются пирометры Термоскоп-600-2С, поз. 2а-1 ... 11а-2, расположенные по два в каждой из зон. Сигнал о состоянии температуры передается на контроллер Simatic S7-400, поз. РМК.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

От режима давления в рабочем пространстве методической печи зависят качество нагрева металла и экономичность работы агрегата. Таким образом, как завышение, так и занижение давления приводят к перерасходу топлива и ухудшению работы агрегата [9,10]. Зависимость подсосов холодного воздуха и выбиваний продуктов сгорания от разрежения в дымовом борове имеет экстремальный вид, то есть теоретически существует величина разрежения в дымовом борове, при которой значение подсосов холодного воздуха и выбиваний продуктов сгорания равно нулю. Это делает целесообразным применение системы экстремального регулирования для оптимизации управления газодинамическим режимом нагревательных печей.

Литература

1. Андреев, С.М. Оптимизация режимов управления нагревом в печах проходного типа: монография / С.М. Андреев, Б.Н. Парсункин; Магнитогорский гос. технический ун-т им. Г.И. Носова. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та, 2013. – 378 с. – ISBN 978-5-9967-0431-6. – Текст: непосредственный.
2. Суходоев, М.С. Основы автоматизации производственных процессов / М.С. Суходоев, В.С. Аврамчук, С.В. Замятин. – Томск: Академия, 2012. – 95 с. – ISBN 978-5-9729-0373-3. – Текст: непосредственный.
3. Соснин, О.М. Основы автоматизации технологических процессов и производств: учебное пособие для вузов / О.М. Соснин. – 2 – е изд., испр. – Москва: Академия, 2012. – 240с. – Текст: непосредственный.

4. Парсункин Б.Н., Андреев С.М., Жадинский Д.Ю., Партин В.Н., Чеботов В.М. О реализации энергосберегающих режимов нагрева непрерывно-литых заготовок перед прокаткой // Сталь. – 2005. – № 12. – С. 44-46.

5. 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.

6. Об определении экономической эффективности оптимизирующего управления технологическими процессами прокатного производства / Б. Н. Парсункин, С. М. Андреев, А. Р. Бондарева, В. П. Чернов // Теория и технология металлургического производства. – 2022. – № 1(40). – С. 30-36.

7. Парсункин, Б. Н. Автоматизированное энергосберегающее управление сжиганием смешанного газа в проходных печах листопрокатных станов / Б. Н. Парсункин, С. М. Андреев, И. Г. Самарина // Электротехнические системы и комплексы. – 2022. – № 1(54). – С. 68-74. – DOI 10.18503/2311-8318-2022-1(54)-68-74. – EDN HOTPGO.

8. Парсункин, Б. Н. Экстремально-оптимизирующее автоматизированное управление нагревом непрерывнолитых заготовок в печах проходного типа / Б. Н. Парсункин, С. М. Андреев, Е. Ю. Мухина // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2021. – № 5(104). – С. 22-34. – DOI 10.23859/1994-0637-2021-5-104-2.

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

10. Беленький, А.М. Автоматическое управление металлургическими процессами / А.М. Беленький, Ф.М. Бердышев. – Москва: Металлургия, 1989. – 384 с. – ISBN 5-229-00224-7. – Текст: непосредственный.

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

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

AUTOMATIC REGULATION SYSTEM FOR THE GAS DYNAMIC MODE OF A CONTINUOUS FURNACE

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

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation

arslanarullin12@gmail.com, a.bondareva@magtu.ru

Abstract. Pressure in the working space of continuous furnaces significantly affects their thermal performance. It determines the intensity of metal heating, specific fuel consumption, the value of slagging and scale formation, convenience of maintenance and safety of the unit. The

purpose of controlling the gas-dynamic mode in the working space of the continuous furnace is to implement energy-saving thermal heating mode, provided that all technological constraints and indicators of heating furnaces are fulfilled.

Keywords: pressure, continuous furnace, control, automation, gas-dynamic mode, regulation, measurement.

REFERENCES

1. Andreev S.M. Optimizatsiya rezhimov upravleniya nagrevom zagotovok v pechakh prokhodnogo tipa [Optimizing the modes of controlling the heating of billets in through-type furnaces] / C.M. Andreev, B.N. Parsunkin; Magnitogorsk state. technical university im. G.I. Nosov. - Magnitogorsk, 2013. - 378 p. - ISBN 978-5-9967-0431-6. - Text: direct.

2. Sukhodoev, M.S. Osnovy avtomatizatsii proizvodstvennykh protsessov [Fundamentals of automation of production processes] / M.S. Sukhodoev, V.S. Avramchuk, S.V. Zamyatin. - Tomsk: Academy, 2012. - 95 p. - ISBN 978-5-9729-0373-3. - Text: direct.

3. Sosnin, O.M. Osnovy avtomatizatsii tekhnologicheskikh protsessov i proizvodstv: uchebnoe posobie dlya vuzov / O.M. Sosnin. - 2nd ed., corrected. - Moscow: Academy, 2012. - 240p. - Text: direct.

4. Parsunkin B.N., Andreev S.M., Zhadinskii D.Yu., Partin V.N., Chebotov V.M. Energy-saving heating of continuous-cast billet prior to rolling. *Stal [Steel]*, 2005, no.12, p.44-46.

5. 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.

6. Parsunkin B. N. Extreme-optimal automated control for concast billet heating in through-feed furnaces [Ob opredelenii ekonomicheskoy effektivnosti optimiziruyushchego upravleniya tekhnologicheskimi protsessami prokatnogo proizvodstva] / B. N. Parsunkin, S. M. Andreev, A. R. Bondareva, V. P. Chernov // *Teoriya i tekhnologiya metallurgicheskogo pro-*

izvodstva [The theory and process engineering of metallurgical production]. – 2022. – № 1(40). – S. 30-36.

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

8. Parsunkin, B. N. Ekstremalno-optimiziruyushchee avtomatizirovannoe upravlenie nagrevom nepreryvnolitykh zagotovok v pechakh prokhodnogo tipa / B. N. Parsunkin, S. M. Andreev, E. Yu. Mukhina // *Vestnik Cherepovetskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2021. – Vol. 5, no. 104, p. 22-34. – DOI 10.23859/1994-0637-2021-5-104-2. – EDN PQFOWS.

9. Parsunkin B.N., Samarina I.G. Automatic Energy-saving Control System based on a Mathematical Model of the Gasdynamic Mode of a Continuous Furnace. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2017, no. 2 (35), pp. 55–60. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-2\(35\)-55-60](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-2(35)-55-60)

10. Belenky, A.M. Automatic control of metallurgical processes / A.M. Belenky, F.M. Berdyshev. - Moscow: Metallurgy, 1989. - 384 p. - ISBN 5-229-00224-7. - Text: direct.

11. Parsunkin B.N., Andreev S.M., Ryabchikova E.S. Avtomatizatsiya tekhnologicheskikh protsessov i proizvodstv v metallurgii [Automation of technological processes and production in metallurgy], Magnitogorsk, 2011, 151 p.

12. Parsunkin B.N., Andreev S.M. Predicting the heating time of continuous-cast billet in a stepping-beam continuous furnace. *Stal [Steel]*, 2003, no. 1, p. 71-74.

Яруллин, А.Р. Система автоматического регулирования газодинамического режима методической печи / А.Р. Яруллин, Е.С. Бондарев, А.Р. Бондарева // *Автоматизированные технологии и производства*. 2022. №2(26). С.37-40.

A.R. Yarullin, E.S. Bondarev, A.R. Bondareva Automatic regulation system for the gas dynamic mode of a continuous furnace. *Avtomatizirovannye tehnologii i proizvodstva* [Automation of technologies and production], 2022, no.2(26), pp.37-40. (In Russian).