

# **АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПРОИЗВОДСТВА**

---

---

# АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПРОИЗВОДСТВА

№1 (19) июнь 2019 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)  
Радионов Андрей Александрович - доктор технических наук, профессор (ЮУрГУ)

Карандаев Александр Сергеевич - доктор технических наук, профессор (МГТУ им. Г.И. Носова)  
Вдовин Константин Николаевич - доктор технических наук, профессор (МГТУ им. Г.И. Носова)  
Спирин Николай Александрович - доктор технических наук, профессор (УрФУ)  
Дмитриенко Валерий Дмитриевич - доктор технических наук, профессор (НТУ «Харьковский политехнический институт»)  
Ишметьев Евгений Николаевич - доктор технических наук (ЗАО «Консом СКС»)

### Редакция

#### Председатель редакционной коллегии

Парсункин Борис Николаевич – доктор технических наук, профессор

#### Главный редактор:

Андреев Сергей Михайлович – кандидат технических наук, доцент

## Контакты

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

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

Выходит в свет 06.2019.

## СОДЕРЖАНИЕ

## CONTENTS

### Автоматизированные системы управления

### Automatic control systems

*Н.В. Лежнева, Д.В. Шайдуллин*

*N.V. Lezhneva, D.V. Shaydullin*

Автоматизация процесса пуска установки десорбции диметилформамида..... 4

Automation of the process of starting the installation desorption of dimethylformamide ..... 4

*А.Ф. Мирзагалиева, Н.В. Лежнева*

*A.F. Mirzagalieva, N.V. Lezhneva*

Управление кубом ректификационной колонны выделения легколетучих углеводородов из этанольной фракции ..... 7

Management of the cube of the distillation column allocation of volatile hydrocarbons from ethanol fraction..... 7

### Математическое моделирование технологических систем и объектов управления

### Mathematical simulation of control systems and objects

*А.В. Журавлев, Н.В. Лежнева*

*A.V. Zhuravlev, N.V. Lezhneva*

Моделирование и автоматизация узла получения изопрена из изоамилен-изопреновой и изопрен-изоамиленовой фракций ..... 11

Modeling and control of the process of decomposition of isopentane-pentane and isoprene-isoamylene fraction ..... 11

*Ю.С. Толстова, В.А. Газизова, И.Г. Самарина*

*Yu.S. Tolstova, V.A. Gazizova, I.G. Samarina*

Оптимизация параметров процесса непрерывного горячего цинкования с использованием экспериментально - статистической модели ..... 14

Optimization of parameters of process of continuous hot galvanising with use of the experimental statistical model ..... 14

### Технические средства автоматизации

### Automation equipment

*И.П. Попов*

*I.P. Popov*

Спонтанные упруго-индуктивные колебания в технических средствах автоматизации ..... 18

Spontaneous elastically inductive oscillations in technical automation means ..... 18

*В.А. Газизова, Ю.С. Толстова, Е.Ю. Мухина*

*V.A. Gazizova, Yu.S. Tolstova, E.Yu. Mukhina*

Обзор методов и средств измерения уровня металла в кристаллизаторе МНЛЗ ..... 21

The review of methods and measuring instruments of level of metal in machine continuous-casting machines crystallizer ..... 21

*А.С. Кириллов, К.А. Кунурбаев, Е.А. Бичурин*

*A.S. Kirillov, K.A. Kunurbaev, E.A. Bichurin*

Исследование метрологических характеристик электронного датчика температуры КТУ84/130 ..... 25

Investigation of the metrological characteristics of the electronic temperature sensor KTY84/130 ..... 25

### Краткие сообщения

### Summary statement

*Ю.С. Толстова, В.А. Газизова, Е.Ю. Мухина*

*Yu.S. Tolstova, V.A. Gazizova, E.Yu. Mukhina*

Обзор систем управления температурой в методических печах ..... 29

The review of control systems of temperature in methodical furnaces ..... 29

# 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](http://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

## Предоставление материалов

УДК 681.5.015.32

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

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

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

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

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

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

#### Введение

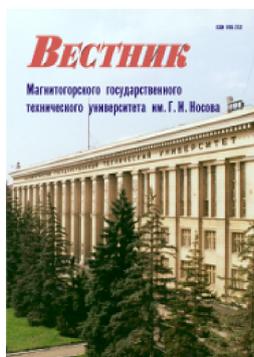
При адаптации современного микропроцессорного регулирующего комплекса (МРК) к управляемому технологическому процессу приоритетной задачей является оперативное и достоверное определение динамических параметров объектов управления: коэффициента передачи объекта  $K_{об}$ , постоянной

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

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

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

## Другие рекомендуемые периодические издания



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



Электротехнические системы и комплексы



Журнал молодых исследователей: магистров и аспирантов



Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах

УДК 665.65: 62-521

## АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ПУСКА УСТАНОВКИ ДЕСОРБЦИИ ДИМЕТИЛФОРМАМИДА

Н.В. Лежнева, Д.В. Шайдуллин

Казанский национальный исследовательский технологический университет, Нижнекамск, Россия

e-mail: crytek@bk.ru

**Аннотация.** Процесс пуска технологической установки на производстве зависит от множества факторов: опытность персонала, время года, строгой последовательности действия оператора. Большинство современных производств оснащено распределенными системами управления технологическим процессами на базе промышленных контроллеров, которые позволяют решить данную проблему. Данная статья направлена на модернизацию существующей системы управления завода этилена ПАО «Нижнекамскнефтехим» путем разработки и ввода в эксплуатацию алгоритма и программы автоматизированного пуска установки десорбции диметилформамида, уменьшение расхода энергоресурсов, минимизации времени выхода установки на технологический режим, а также модернизирован интерфейс оператора технолога данной установки. В процессе автоматизированного пуска установки, функция оператора будет заключаться в слежении за ходом технологического процесс. Данный алгоритм и программа автоматического пуска установки десорбции диметилформамида может быть использована в распределенной системе управления ДельтаВ данной установки.

**Ключевые слова:** алгоритм, автоматизация, десорбция, автоматизированный пуск, распределенная система управления.

### ВВЕДЕНИЕ<sup>©</sup>

Процесс пуска технологической установки после ремонта или останова является сложнейшей производственной задачей, которая, как правило, осуществляется вручную технологическим персоналом путем выполнения определенной последовательности действий по открытию либо закрытию регулирующих органов. При этом неправильная последовательность открытия (закрытия) регулирующих клапанов при пуске приведет к дестабилизации процесса и увеличению времени выхода установки на технологический режим.

### АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ПУСКА

Большинство современных производств оснащено распределенными системами управления технологическим процессами на базе промышленных контроллеров, которые позволяют решить данную задачу путем разработки алгоритма и программы автоматизированного пуска технологической установки [1,2].

Установка десорбции диметилформамида (ДМФА) завода этилена ПАО «Нижнекамскнефтехим» (рисунок 1) предназначена для извлечения экстрагента ДМФА из бутадиевой фракции, состоящей из бутадиев-1,3 и сопутствующих 1,2-бутадиев, этил- и винилацетиленовой смеси, и включает в себя тарельчатую колонну G-DA-102, кипятильник G-EA-108A/B, теплообменник G-EA-105 и G-EA-106, конденсатор G-EA-107, емкость G-FA-103, насосное оборудование G-DA-104A/B, G-DA-105A/B и G-DA-106A/B. На установке десорбции предусмотрено регулирование следующих параметров: расхода пара в кипя-

тильник G-EA-108AB (FCV117) с коррекцией по температуре куба колонны G-DA-102; уровня в кубе колонны G-DA-102 (поз. LCV112); температуры на выходе из конденсатора G-EA-107 (поз. TCV144); уровня в емкости G-FA-103 (поз. LCV115); температуры верхнего продукта на выходе из теплообменника G-EA-106 (поз. TCV116).

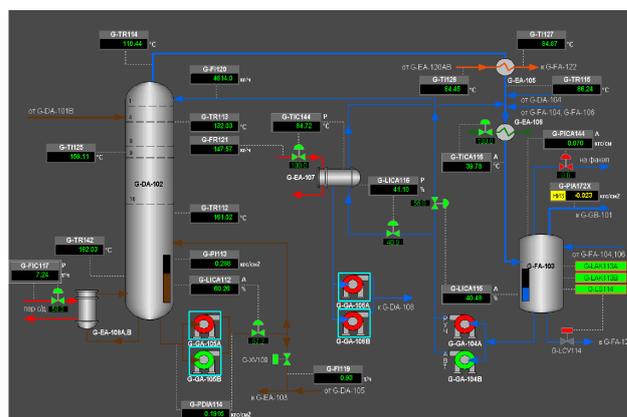


Рис. 1. Общий вид мнемосхемы установки десорбции G-DA-102

При ручном пуске установки десорбции ДМФА преждевременное открытие регулирующих клапанов, отсечного клапана на сливе куба колонны, а также резкое открытие регулирующего клапана на подаче пара в кипятильник приведет к дестабилизации процесса. В связи с этим актуальна задача минимизация влияния человеческого фактора при пуске технологической установки.

Решение данной проблемы возможно путем автоматизи-

зированного программного пуска установки десорбции ДМФА. С этой целью разработан алгоритм автоматизированного пуска (рис. 2). На основе алгоритма разработана программа (рис. 3) на языке стандартных библиотечных функциональных блоков DeltaV, согласно которому при пуске установки десорбции ДМФА регулирующие клапаны LCV112 по уровню колонны G-DA-102 и FCV117 по расходу пара в кипятильник G-EA-108A\B переводятся в ручной режим с заданием 0%, а в конце процесса пуска - автоматический режим.

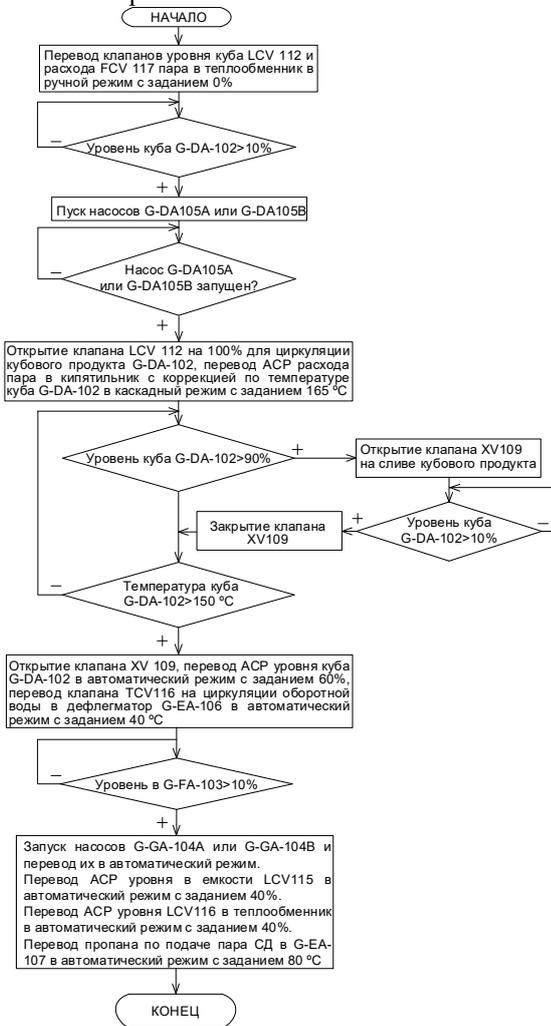


Рис. 2. Блок-схема алгоритма пуска установки десорбции ДМФА

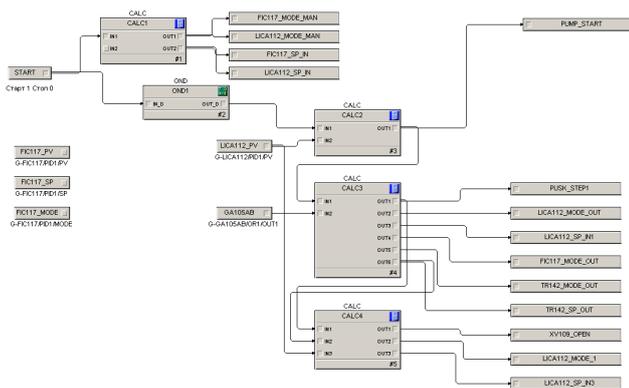


Рис. 3. Программа автоматизированного пуска установки десорбции ДМФА

В процессе автоматизированного пуска установки, функция оператора будет заключаться в слежении за ходом технологического процесса. Инициализация программы пуска в распределенной системе управления осуществляется путем нажатия кнопки «Пуск» (рис. 4) со станции оператора уровня диспетчерского управления установкой десорбции ДМФА.

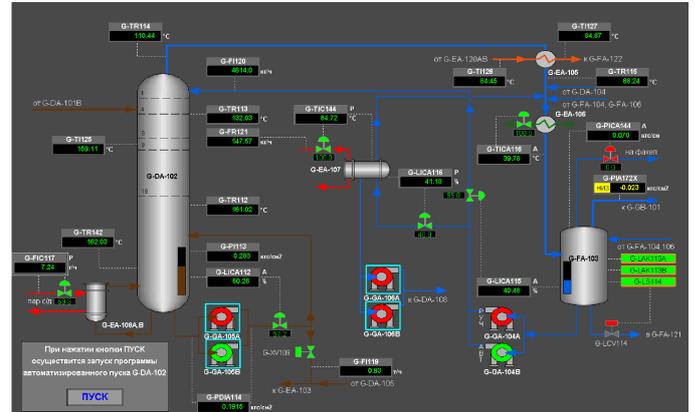
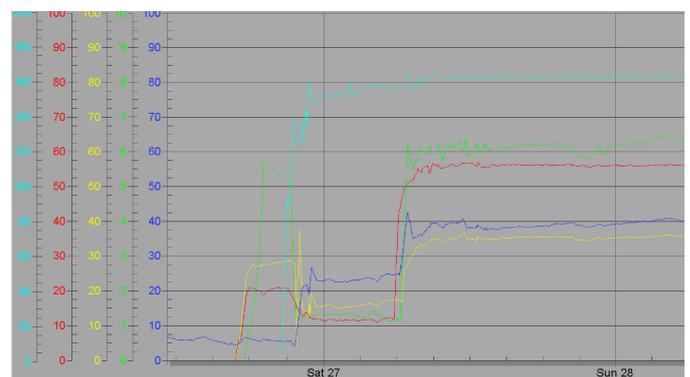
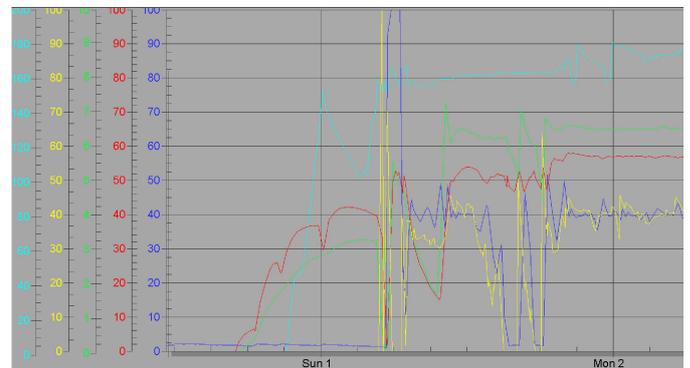


Рис. 4 Общий вид модернизированной мнемосхемы автоматизированного пуска колонны десорбции G-DA-102



■	Температура куба G-DA-102
■	Уровень в G-DA-102
■	Уровень в G-FA-103
■	Расход пара в G-EA-108A/B
■	Температуры на выходе из G-EA-106

Рис. 5 Технологический график пуска установки ДМФА в ручном и автоматическом режиме

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Внедрение программы автоматизированного пуска позволит уменьшить расход пара в кипятильник G-EA-108A/B с существующих 82 тонн до 42 тонн, а также ми-

---

---

нимизировать время выхода данной установки на технологический режим с 28 часов до 18 часов (рис. 5).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кабанов В.В. Математическое моделирование параметров пуска установки предварительной дебутанизации сырья // В.В. Кабанов, А.В. Мушчинин, В.В. Елизаров, В.И. Елизаров // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. -Т.17. -Вып. 9. -С.292-294.

2. Мушчинин А.В. Программное управление расходом питания в колонну при пуске установки дебутанизации углеводородов // А.В. Мушчинин, В.В. Елизаров, В.И. Елизаров // Вестник Казанского технологического университета. – 2015. -Т.18. -Вып. 21. -С.131-133.

3. Парсункин, Б.Н. Локальные стабилизирующие контура автоматического управления в АСУ ТП / Б.Н. Парсункин, С.М. Андреев, О.С. Логунова. – Магнитогорск.: КТ «Буки-Веди», 2012. 406 с.

## AUTOMATION OF THE PROCESS OF STARTING THE INSTALLATION DESORPTION OF DIMETHYLFORMAMIDE

N. V. Lezhneva, D.V.Shaydullin

Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia

**Abstract.** The developed algorithm and the program for automatic start-up installation desorption of dimethylformamide ethylene plant of PJSC "Nizhnekamskneftekhim", and also upgraded the operator interface. This program can be used in a distributed DeltaV control system of this installation.

**Keywords:** algorithm, automated start-up, distributed control system.

#### REFERENCES

1. Kabanov V.V., Mushchinin A.V., Elizarov V.V., Elizarov V.I. Mathematical modeling of the parameters of the start-up of the preliminary debutanization of raw materials [Математическое моделирование параметров пуска установки предварительной дебутанизации сырья], Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta [Bulletin of Kazan Technological University], 2014, vol.17, no. 9, pp .292-294.

2. Muschinin A.V., Elizarov V.V., Elizarov V.I. Software control of the power supply to the column when the hydrocar-

bon debut unit is started up [Programmnoe upravlenie raskhodom pitaniya v kolonnu pri puske ustanovki debutanizatsii uglevodorodov], Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta [Bulletin of Kazan Technological University], 2015, vol.18., no. 21, pp. 131-133.

3. Parsunkin B.N., Andreev S.M., Logunova O.S. *Lokal'nye stabiliziruyushhie kontura avtomaticheskogo upravleniya v ASU TP* [Local stabilizing circuits of automatic control in the automated process control system], Magnitogorsk, 2012, 406 p.

---

Лежнева, Н.В. Автоматизация процесса пуска установки десорбции диметилформамида / Н.В. Лежнева, Д.В. Шайдуллин // Автоматизированные технологии и производства. 2019. №1(19). С.4-6.

Lezhneva N.V., Shaydullin D.V. Automation of the process of starting the installation desorption of dimethylformamide *Avtomatizirovannye tehnologii i proizvodstva* [Automation of technologies and production], 2019, no.1(19), pp.4-6. (In Russian)

## УПРАВЛЕНИЕ КУБОМ РЕКТИФИКАЦИОННОЙ КОЛОННЫ ВЫДЕЛЕНИЯ ЛЕГКОЛЕТУЧИХ УГЛЕВОДОРОДОВ ИЗ ЭТАНОЛЬНОЙ ФРАКЦИИ

А.Ф. Мирзагалиева, Н.В. Лежнева

Нижнекамский химико-технологический институт ФГБОУ ВО «КНИТУ», Нижнекамск, Россия

e-mail: nlejeva@list.ru

**Аннотация.** Разработана адаптивная система управления кубом ректификационной колонны выделения легколетучих углеводородов из этанольной фракции методом динамического программирования и функций Ляпунова.

**Ключевые слова:** ректификация, этанольная фракция, адаптивная система управления.

### ВВЕДЕНИЕ<sup>©</sup>

Этанол является сырьем для получения многих химических веществ (например, ацетальдегид, диэтиловый эфир, тетраэтилсвинец, уксусная кислота, хлороформ, этилацетат, этилен и др.); применяется как топливо; является компонентом антифризов и стеклоомывателей; в бытовой химии применяется в чистящих и моющих средствах; является универсальным растворителем различных веществ; в медицине применяется как антисептик; в пищевой промышленности наряду с водой является основным компонентом спиртных напитков и т.д. [1].

### ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС

На заводе СПС в цехе 2506 ПАО «Нижнекамскнефтехим» технологическая схема узла выделения возвратного этанола включает ректификационную установку Кт-340, предназначенную для выделения легколетучих углеводородов из этанольной фракции. Ректификационная колонна Кт-340 имеет следующие режимные и конструктивные параметры:

- число тарелок 40 шт;
- номер тарелки питания 19, 21;
- тип тарелки - колпачковая однопоточная;
- расстояние между тарелками 300 мм;
- диаметр колонны 1 м;
- высота цилиндрической части 24,233 м;
- давление верха 1 кгс/см<sup>2</sup>;
- давление куба 1,4 кгс/см<sup>2</sup>;
- расход питания 1300-1500 кг/час;
- флегмовое число 7-8;
- температура верха 65- 80°С;
- температура куба 80- 100 °С.

В существующей автоматизированной системе управления установкой выделения легколетучих углеводородов из этанольной фракции используется каскадная система регулирования расхода греющего пара в кипятильник Т-341 ректификационной колонны Кт-340 с коррекцией по температуре в кубе (рис.1), настройки регуляторов которой получены для объекта с заданной моделью в зависимости от возмущений в заданном диапазоне по конкрет-

ным каналам: математическая модель расхода греющего пара в кипятильник колонны в виде передаточной функции следующая:  $W(p) = \frac{0.2e^{-5p}}{12p+1}$ .

При существующем режиме работы ректификационной установки Кт-340 потери этанола с дистиллятом колонны и энергозатраты на процесс разделения существенны: расход греющего пара в кипятильник до 1000 кг/ч. Ректификационная установка является сложным многомерным объектом управления с большим количеством возмущающих воздействий, в зависимости от которых необходимо адаптировать модель объекта и корректировать настройки регулятора по измеренным значениям регулируемого параметра. Высокоточное, быстрое и надежное управление процессами ректификации с целью повышения качества продуктов разделения и/или минимизация энергозатрат в условиях жесткой конкуренции является актуальной задачей.

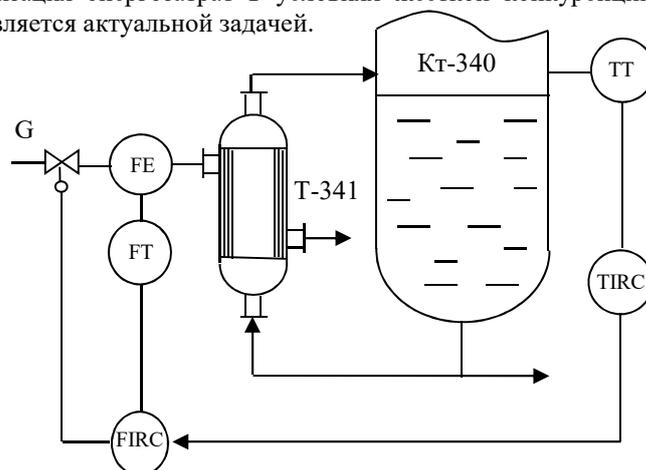


Рис.1. Схема автоматического регулирования расхода пара в кипятильник с коррекцией по температуре в кубе колонны Кт-340

С целью снижения энергозатрат (расхода тепла) на выделение легколетучих углеводородов из этанольной фракции и повышения качества разделения предлагается каскадную АСР заменить на адаптивную систему управления параметрами куба ректификационной колонны Кт-340

(рис.2). Вследствие двухуровневой структуры адаптивной системы управления кубом ее построение проведено в два этапа: синтез основного контура (контур коррекции расхода греющего пара в кипятильник по уровню жидкости в кубе колонны) и контура адаптации. Управляющий сигнал из контура адаптации, пропорциональный расходу греющего пара, сравнивается с сигналом на выходе регулятора расхода пара и в случае рассогласования проводится коррекция настроек регулятора. Адаптация параметров настраиваемого регулятора осуществляется по минимуму отклонения выходной координаты эталонной модели и модели объекта.

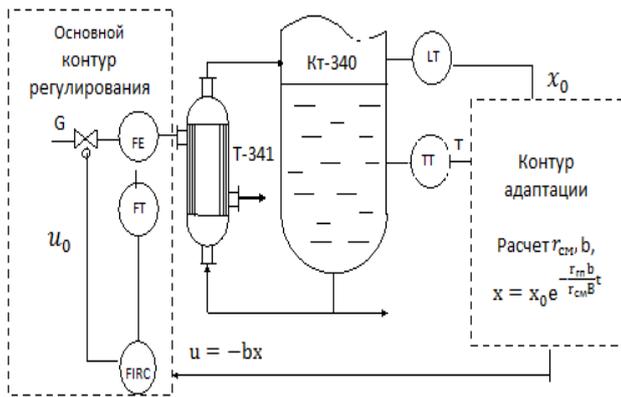


Рис.2. Схема адаптивного управления параметрами куба колонны КТ-340

Построение алгоритма адаптации осуществляется методами, основанными на применении функций Ляпунова, представляющими собой сумму целевой функции и квадрата невязки между настраиваемыми и идеальными параметрами. Алгоритм адаптации строится в направлении антиградиента от скорости изменения целевой функции. Закон адаптации и параметры регулятора определяются из условия обеспечения асимптотической устойчивости процесса.

Настройки контура адаптации определяются из уравнения материального баланса куба колонны в отклонениях от стационарного состояния [2,3]:  $\frac{dx}{dt} = \frac{r_{гн}}{Br_{cm}}G$ , где  $x$  - отклонение уровня жидкости в кубе от заданного значения (м),  $B$  - площадь поперечного сечения колонны ( $m^2$ ),  $G$  - отклонение расхода греющего пара в кипятильник от стационарного значения ( $m^3/ч$ ),  $t$  - время,  $r_{cm}$  - теплота парообразования кубовой жидкости (КДж/кг),  $r_{гн}$  - теплота конденсации водяного насыщенного пара (КДж/кг). Регулирующий параметр - расход греющего пара, тогда управление  $u = G$ , следовательно

$$\frac{dx}{dt} = \frac{r_{гн}}{Br_{cm}}u, x(t=0) = x_0, \quad (1)$$

где  $x_0$  - начальное отклонение уровня.

Поиск закона управления  $u(x)$  для процесса, описываемого уравнением (1), при котором отклонения уровня и расхода пара от заданных значений не превосходят допустимых величин:

$$\gamma_1 = \int_0^{\infty} \frac{x^2}{A_1} dt \leq 1, \gamma_2 = \int_0^{\infty} \frac{u^2}{A_2} dt \leq 1, \quad (2)$$

выполнялся методом последовательных приближений ( $A_1, A_2$  - предельно допустимые заданные значения отклонений). Заданная величина отклонения на управление  $u(x)$

обоснована необходимостью сокращения энергозатрат на очистку этанольной фракции.

Первое приближение управления и функция Ляпунова имеют вид:  $u_0^{(1)} = -bx, S(x, t) = S_0 x^2$ , где  $b = const$ . Решение (1) при данном управлении следующее:  $x = x_0 e^{-\frac{r_{гн}b}{r_{cm}B}t}$ . Значения функционалов  $\gamma_1, \gamma_2$ :  $\gamma_1 = \int_0^{\infty} \frac{x_0^2}{A_1} e^{-\frac{2r_{гн}b}{r_{cm}B}t} dt, \gamma_2 = \int_0^{\infty} \frac{b^2 x_0^2}{A_2} e^{-\frac{2r_{гн}b}{r_{cm}B}t} dt$ .

Сравнивая  $\gamma_1$  и  $\gamma_2$ , получим:

а) при  $b > \sqrt{A_2/A_1}$   $\gamma_2 > \gamma_1$  и  $\max(h_1, h_2) = h_2(x, t)$ , где  $h_1(x, t), h_2(x, t)$  - подынтегральные функции функционалов  $\gamma_1, \gamma_2$ ;

б) при  $b < \sqrt{A_2/A_1}$   $\gamma_1 > \gamma_2$  и  $\max(h_1, h_2) = h_1(x, t)$ ;

в) при  $b = \sqrt{A_2/A_1}$   $\gamma_1 = \gamma_2$ .

Находится в первом приближении параметр функции Ляпунова  $S_0^{(1)}$  из уравнения  $(\max(h_1, h_2) + \frac{dS^{(1)}}{dt})|_{u_0^{(1)}} = 0$  и  $S^{(1)}(x, t)$ .

Для случая а):

$$S_0^{(1)} = \frac{bBr_{cm}}{2r_{гн}A_2}, S^{(1)}(x, t) = \frac{bBr_{cm}}{2r_{гн}A_2} x_0^2 e^{-\frac{2r_{гн}b}{r_{cm}B}t},$$

для случая б):

$$S_0^{(1)} = \frac{Br_{cm}}{2r_{гн}A_1b}, S^{(1)}(x, t) = \frac{Br_{cm}}{2r_{гн}A_1b} x_0^2 e^{-\frac{2r_{гн}b}{r_{cm}B}t}.$$

Для устойчивого решения уравнения (1) необходимо, чтобы  $S^{(1)}(x, t) \geq 0, \frac{dS^{(1)}}{dt} \leq 0$ . Условия асимптотической устойчивости выполняются при  $b > 0$ .

Управление  $u_0^{(1)} = -bx$  удовлетворяет (2), если  $S^{(1)}(x_0, 0) \leq 1$ , т.е. в случае а) при  $x_0 \leq \sqrt{\frac{2r_{гн}A_2}{bBr_{cm}}}$ , (3)  $b >$

$\sqrt{A_2/A_1}$ ; в случае б) при  $x_0 \leq \sqrt{\frac{2r_{гн}A_1b}{Br_{cm}}}$ , (4)  $b < \sqrt{A_2/A_1}$ .

Если начальное отклонение  $x_0$  удовлетворяет указанным условиям, то управление  $u_0^{(1)} = -bx$  - решение задачи, где  $b$  - коэффициент усиления регулятора. Величина коэффициента пропорциональности  $b$  определяет время переходного процесса, т.е. чем больше значение  $b$ , тем меньше время регулирования.

Если выбором  $b$  не удастся выполнить неравенство (3) для а) или (4) для б) или выбором  $b$  добиваются выполнения соответствующего неравенства, но при этом время переходного процесса является находящимся второе приближение управления:  $u_0^{(2)} = u_0^{(1)} + \varepsilon \frac{\partial K}{\partial u}$  при  $\frac{\partial K}{\partial u} < 0$  или  $u_0^{(2)} = u_0^{(1)} - \varepsilon \frac{\partial K}{\partial u}$  при  $\frac{\partial K}{\partial u} > 0$ , где  $K(u) = \max(h_1, h_2) + \frac{dS^{(1)}}{dt}$ . Величина шага спуска  $\varepsilon$  находится из условия  $h_1 = h_2$ . Решение минимаксной задачи примет вид:

$u_0^{(2)} = -\sqrt{A_2/A_1}x$ , а решение уравнения (1) при данном управлении следующее:  $x = x_0 e^{-\frac{r_{гн}}{r_{cm}B}\sqrt{A_2/A_1}t}$ .

Условия, при которых управление  $u_0^{(2)}$  удовлетворяет неравенствам (2), имеют вид:  $x_0 \leq \sqrt{\frac{2r_{гн}\sqrt{A_1A_2}}{Br_{cm}}}$  для случая

а);  $x_0 \leq \sqrt{\frac{2r_{гн}A_1b}{Br_{cm}}}$  для случая б).

Процесс последовательных приближений продолжается до тех пор, пока не выполнится условие  $S(x_0, 0) \leq 1$ .

Таким образом, по измеренному значению отклонения уровня  $x_0$  определяются коэффициент пропорциональности  $b$  контура адаптации и закон управления  $u$ , обеспечивающие выполнение показателей качества (2) и требования устойчивости процесса

Ректификационная колонна выделения легколетучих углеводородов из этанольной фракции Кт-340 имеет следующие параметры:  $B = 0785 \text{ м}^2$ ,  $r_{\text{см}} = 1674 \text{ КДж/кг}$ ,  $r_{\text{гп}} = 2107 \text{ КДж/кг}$ . Решение (1) при управлении  $u_0 = -bx$  имеет вид:  $x = x_0 e^{-1.6bt}$ . Принимая  $A_1 = 0.01, A_2 = 1$ , задав время регулирования уровня в кубе колонны  $T=0.3 \text{ ч}$ ,  $x(T) = 0.05x_0$ , получим  $b = 6.25 \text{ м}^2/\text{ч}$ . Значения функционалов  $\gamma_1, \gamma_2$  при  $x_0 = 0.1 \text{ м}$  удовлетворяют неравенствам (2):

$$\gamma_1 = \int_0^{\infty} \frac{x_0^2}{0.01} e^{-32t} dt = 0.03 < 1, \gamma_2 = \int_0^{\infty} \frac{100x_0^2}{1} e^{-32t} dt = 0.03 < 1.$$

Увеличение коэффициента усиления  $b$  приводит к уменьшению времени регулирования  $T$  (рис.3).

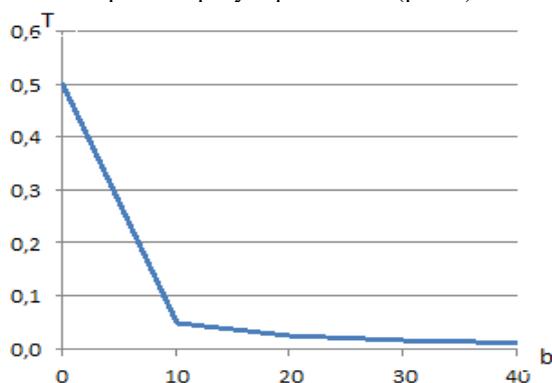


Рис. 3. Зависимость времени регулирования  $T$  от коэффициента пропорциональности  $b$  регулятора

Например, при  $b = 100 > \sqrt{A_2/A_1}$  время регулирования  $T = 0.005 \text{ ч}$ , а  $x_0 \leq 0.179 \text{ м}$ , начальное отклонение расхода  $u(t=0) = 17.9 \text{ м}^3/\text{ч}$ . При меньшем значении  $b = 11$ ,  $x_0 \leq 0.539 \text{ м}$ ,  $T = 0.045 \text{ ч}$ , начальное отклонение расхода  $u(t=0) = 5.929 \text{ м}^3/\text{ч}$ . При положительном или отрицательном отклонении уровня от заданного значения (рис.4, 5) расход греющего пара в кипятильник колонны пропорционально уменьшается или увеличивается соответственно.

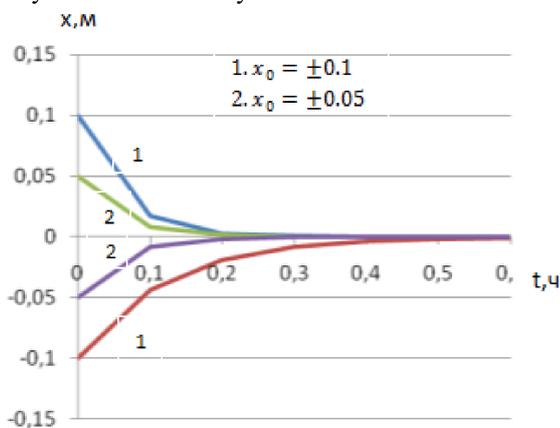


Рис.4. Зависимость отклонения уровня от времени при измеренных значениях  $x_0$ , м

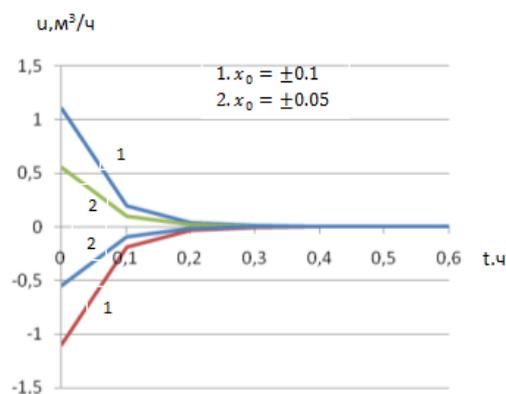


Рис.5. Зависимость расхода греющего пара от времени при измеренных значениях  $x_0$ , м

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С целью снижения энергозатрат на выделение легколетучих углеводородов из этанольной фракции в ректификационной установке Кт-340 и повышения качества возвратного этанола предложено заменить существующую каскадную систему регулирования расхода греющего пара в кипятильник Т-341с коррекцией по температуре в кубе колонны Кт-340 на адаптивную систему управления параметрами куба. Построение адаптивной системы управления кубом ректификационной установки Кт-340 проведено в два этапа методом динамического программирования и функций Ляпунова.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [https:// ru.wikipedia.org/ wiki/Этанол](https://ru.wikipedia.org/wiki/Этанол) (дата обращения 14.06.2019). Этанол: области применения.
- Елизаров, В.И. Оптимальные и адаптивные системы управления: учеб. пособие/ В.И. Елизаров, В.В. Елизаров. –Нижекамск: Нижекамский химико-технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО «КНИТУ», 2018. -82 с.
- Сафиуллин, И.Р. Управление кубом ректификационной колонны разделения бутулен-изобутиленовой фракции / И.Р. Сафиуллин, Н.В. Лежнева // Математические методы в технике и технологиях: сб. тр. Междунар. науч. конф.: в 12 т. Т.1.-СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2018. -С. 75-78.
- Баннх, О.П. Расчет основных процессов и аппаратов химической технологии: учеб. пособие / О.П. Баннх, Е.И. Борисова, В.А. Константинов, О.В. Муратов, В.В. Фомин – СПб: изд-во ун-та ИТМО, 2017.-82 с.
- Технологический регламент цеха 4821. Завод «СПС». ПАО «НКНХ».
- Теория автоматического управления: учеб. для вузов по спец. «Автоматика и телемеханика»: в 2 ч. 2-е изд. / А. А. Воронов, Д. П. Ким, В. М. Лохин и др.; под ред. А. А. Воронова. -М.: Высш. шк., 1986. Ч. II. Теория нелинейных и специальных систем автоматического управления.
- Чаки, Ф. Современная теория управления. Нелинейные, оптимальные и адаптивные системы/ Пер. с англ.; под ред. Н. С. Райбмана. М.: Мир, 1975.
- Воронов, А.В. Основы теории автоматического управления. М.; Л.: Энергия, 1965. Т. 1, 2.

---

# MANAGEMENT OF THE CUBE OF THE DISTILLATION COLUMN ALLOCATION OF VOLATILE HYDROCARBONS FROM ETHANOL FRACTION

A.F.Mirzagalieva. N.V.Lezhneva

Nizhnekamsk Institute for Chemical Technology", Nizhnekamsk, Russia.

**Abstract.** An adaptive control system for the cube of the distillation column for the extraction of volatile hydrocarbons from the ethanol fraction by the method of dynamic programming and Lyapunov functions is developed.

**Keywords:** distillation, ethanol fraction, an adaptive control system.

## REFERENCES

1. [https:// ru.wikipedia.org/](https://ru.wikipedia.org/) (accessed 14 Juner 2019)  
Ethanol.Ethanol: applications [Electronic resource]:
2. In Elizarov.I. *Optimal and adaptive control systems: studies. The Manual/* V. I. Elizarov, V. V. Elizarov. – Nizhnekamsk: Nizhnekamsk chemical technological Institute (branch) FSBEI "KNRTU", 2018. -82 С.
3. And Safiullin.R., Lezhneva N. In. Management of the cube of the distillation column separating a butylene-isobutylene faction/I. R. Safiullin, N. In. Lezhneva// [*Mathematical methods in technics and technologies: collection of works*]. International. science. Conf.: in 12 vol. 1.-SPb.: Publishing house of Polytechnical Institute. UN-TA, 2018. - P. 75-78.
4. About Bath.P., Borisova E. I., In Konstantinov.Oh, Muratov.V. *Fomin.Calculation of basic processes and devices of chemical technology: Textbook – St. Petersburg: 2017 ITMO University,-82 С.*
5. *Technological regulations of shop 2506.* The plant SPS. PAO "NIZHNEKAMSKNEFTEKHIM".
6. *Theory of automatic control: studies. for universities on special. "Automation and telemechanics":* at 2 PM 2nd ed. / A. A. Voronov, D. P.
7. Chucky F. Modern control theory. *Nonlinear, optimal and adaptive systems/* Per. with English.; ed. S. Raibman. M.: Mir, 1975
8. Voronov A.V. *Fundamentals of the theory of automatic control.* M.; L.: Energy, 1965. Vol. 1, 2.

---

Мирзагалиева, А.Ф. Управление кубом ректификационной колонны выделения легколетучих углеводородов из этанольной фракции / А.Ф. Мирзагалиева, Н.В. Лежнева // Автоматизированные технологии и производства. 2019. №1(19). С.7-10.

Mirzagalieva A.F., Lezhneva N.V. Management of the cube of the distillation column allocation of volatile hydrocarbons from ethanol fraction. *Avtomatizirovannye tehnologii i proizvodstva* [Automation of technologies and production], 2019, no.1(19), pp.7-10. (In Russian)

УДК 665.65: 62-521

## МОДЕЛИРОВАНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ УЗЛА ПОЛУЧЕНИЯ ИЗОПРЕНА ИЗ ИЗОАМИЛЕН-ИЗОПРЕНОВОЙ И ИЗОПРЕН-ИЗОАМИЛЕНОВОЙ ФРАКЦИЙ

А.В. Журавлев, Н. В. Лежнева

Казанский национальный исследовательский технологический университет г. Нижнекамск, Россия

zhuravlevav383@gmail.com

**Аннотация.** Проведено моделирование процесса ректификации изоамилен-изопреновой и изопрен-изоамиленовой фракций. На основе моделирования найдены оптимальные тарелки ввода питания ректификационной колонны в зависимости от состава разделяемой смеси, а так же разработаны алгоритм и программа для определения номера тарелки питания, обеспечивающего получение продуктов разделения в соответствии с требованием технологического регламента. Разработанная программа может быть реализована в распределенной системе управления процессом.

**Ключевые слова:** ректификация, тарелка питания, изоамилен-изопреновая фракции, изопрен-изоамиленовая фракция, моделирование систем управления, распределенная система управления.

### ВВЕДЕНИЕ<sup>©</sup>

Ректификация является одним из наиболее распространенных процессов в химической, нефтехимической, нефтеперерабатывающей, фармацевтической, металлургической и других отраслях промышленности. Поиск оптимальных решений при управлении данными процессами является актуальной задачей.

Повышение качества продуктов разделения в условиях изменения состава разделяемой смеси возможно путем определения оптимальной тарелки ввода питания в ректификационную колонну. Поскольку большинство современных производств оснащено распределенной системой управления, то решение данной задачи можно осуществить путем разработки алгоритма и на его основе программа выбора в режиме реального времени оптимальной тарелки питания в зависимости от его состава, которая может быть реализована в распределенной системе управления ректификационной установкой.

### ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС

На заводе СК цеха №1507 ПАО "Нижнекамскнефтехим" процесс получения изопрена из изоамилен-изопреновой и изопрен-изоамиленовой фракций осуществляется в ректификационной установке К-20, которая имеет следующие конструктивные параметры :

Число тарелок:	101 шт. ;
Номер тарелки (проектный):	4, 10, 30, 38;
Диаметр колонны:	3,6 м.;
Высота колонны:	47,3 м.

Согласно требованиям технологического регламента содержание изопрен-изоамеленовой фракции в кубовой жидкости колонны должно быть не менее 97.5 % мас. При

существующем технологическом режиме работы ректификационной установки К-20 происходит существенное колебание состава ИИФ (табл.1).

Однако исходная разделяемая смесь углеводородов независимо от состава постоянно подается на 10 тарелку питания.

Таблица 1

Содержание изопрен-изоамиленовой фракции при существующем технологическом режиме

14.02.2018	27.04.2018	03.07.2018	11.09.2018
36,73% мас.	41,3% мас.	50,07% мас.	44,21% мас.

В связи с этим разработана математическая модель процесса ректификации изопрена из изоамилен-изопреновой и изоамилен-изопреновой фракций в программном пакете HYSYS. В качестве теоретической основы математического описания использованы законы сохранения и условия термодинамического равновесия. Для расчета термодинамических свойств многокомпонентной смеси углеводородов в модели используются уравнение состояния Пенга-Робинсона.

Результаты моделирования процесса получения изопрена из изоамилен-изопреновой и изопрен-изоамиленовой фракций при различном составе питания свидетельствуют о том, что оптимальными тарелками ввода питания в ректификационную колонну К-20 являются при содержании изоамилен-изопреновой фракции в питании 30-40% мас., 26 (рис.1) , при 40-50% мас., 40 (рис.2), при 50-60% мас., 48 (рис.3), при 60-70% мас., 56 (рис.4).

На основе моделирования разработаны алгоритм определения оптимальной тарелки ввода изопре

изоамелена в колонну по результатам её хроматографического анализа, блок-схема которого приведена на (рис.5), а так же программа (рис.6) на языке функциональных блоков, которая может быть реализована в РСУ установкой на базе контроллера CENTUM.

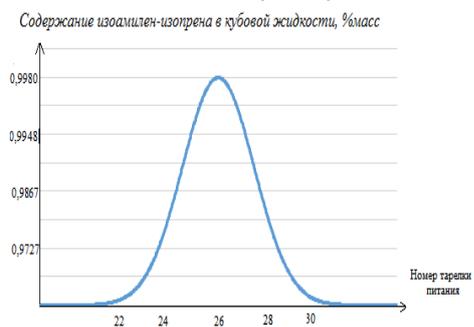


Рис. 1. Зависимость содержания изоамилен-изопрена в кубовой жидкости К-20 от номера тарелки питания при содержании изоамилен-изопрена в питании 35 % масс

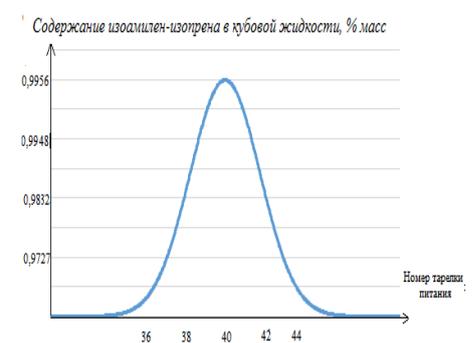


Рис. 2. Зависимость содержания изоамилен-изопрена в кубовой жидкости К-20 от номера тарелки питания при содержании изоамилен-изопрена в питании 45 % масс.

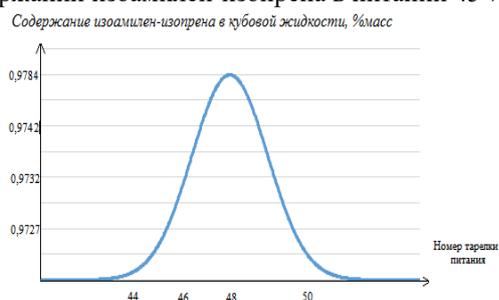


Рис. 3. Зависимость содержания изоамилен-изопрена в кубовой жидкости К-20 от номера тарелки питания при содержании изоамилен-изопрена в питании 55 % масс.

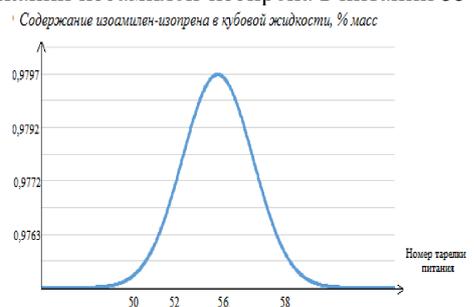


Рис. 4. Зависимость содержания изоамилен-изопрена в кубовой жидкости К-20 от номера тарелки питания при содержании изоамилен-изопрена в питании 65 % масс.

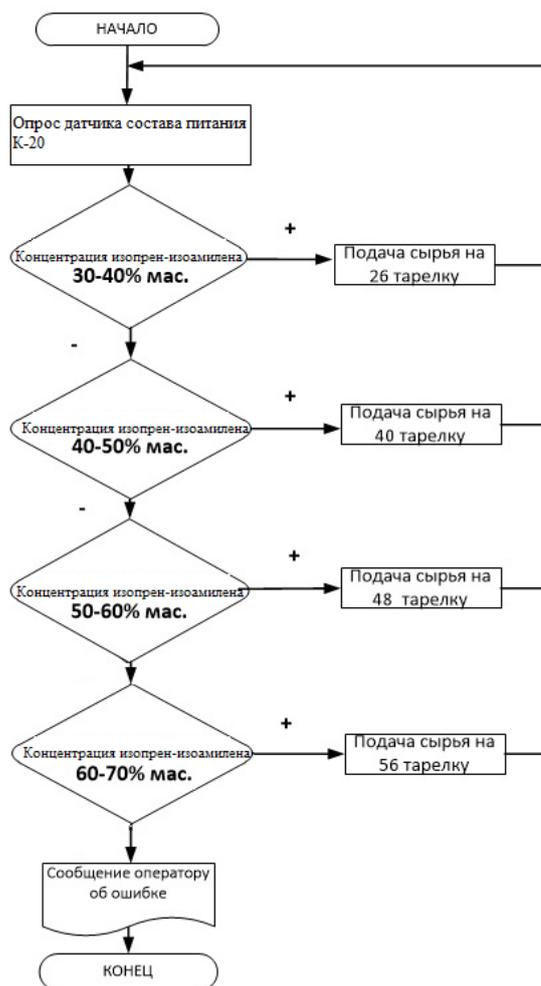


Рис.5 Блок схема алгоритма выбора тарелки питания

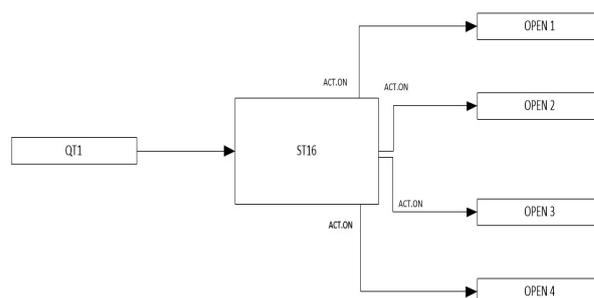


Рис.6 Программа на языке функциональных блоков CENTUM

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана математическая модель процесса получения изопрена из изоамилен-изопреновой и изопрен-изоамиленовой фракций в колонне К-20 в программной среде HYSYS. На основе моделирования процесса разделения ИИФ определены оптимальные тарелки ввода питания в зависимости от состава исходной многокомпонентной смеси углеводородов, а так же разработаны алгоритм и программа определения в режиме реального времени номера тарелки питания по результатам опроса датчика состава изопентан-пентановой фракции для реализации в РСУ процессом

---

---

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Мушнин, А.В. Программное управление расходом питания в колонну при пуске установки дебутанизации углеводородов / А.В. Мушнин, В.В. Елизаров, В.И. Елизаров. Вестник Казанского технологического университета. 2015. Т.18. Вып.21. С. 131-133.

2. Галеев, Э.Р. Математическое моделирование процесса полимеризации бутилкаучука / Э.Р. Галеев, Н.В. Лежнева. В.В. Елизаров, В.И. Елизаров // Вестник Казанского технологического университета. 2016. Т.19. Вып.23. С. 92-95.

3. Mukhonadhyay M. // Ind. Eng. Chem. Res./ M. Mukhonadhyay, G.V. RadhuranRao. 1993. № 32. P. 922.

4. Васильев, И.И. Проектирование системы автоматической оптимизации управления работы установок регенерации метанола и диэтиленгликоля /И.И. Васильев, М.И. Васильев, Б.Н. Парсункин, С.М. Андреев // Автоматизированные технологии производства. 2018. №1(17). С.4-9.

5. Парсункин, Б.Н. Локальные стабилизирующие контура автоматического управления в АСУ ТП / Б.Н. Парсункин, С.М. Андреев, О.С. Логунова. – Магнитогорск.: КТ «Буки-Веди», 2012. 406 с.

## MODELING AND CONTROL OF THE PROCESS OF DECOMPOSITION OF ISOPENTANE-PENTANE AND ISOPRENE-ISOAMILENE FRACTION

A.V. Zhuravlev, N.V. Lezhneva

Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia

**Abstract:** The process of rectification of the isoamilene-isoprene and isoprene-isoamilene fraction was simulated. Based on the simulation, optimal plates for the feed of the distillation column were found, depending on the composition of the mixture to be separated, and an algorithm and a program were developed for determining the number of the feed plate providing the separation products in accordance with the process schedule requirements. The developed program can be implemented in a distributed process control system.

**Keywords:** rectification, feed plate isoamilene-isoprene and isoprene-isoamilene fraction, modeling, distributed control system

#### REFERENCES

1. Muschinin A.V., Elizarov V.V., Elizarov V.I. Software control of the power supply to the column when the hydrocarbon debut unit is started up [Programmnoe upravlenie raskhodom pitaniya v kolonnu pri puske ustanovki debutanizatsii uglevodorodov], Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta [Bulletin of Kazan Technological University], 2015, vol.18., no. 21, pp. 131-133.

2. Galeev E.R., Lezhnev N.V., Elizarov V.V., Elizarov V.I. Mathematical modeling of the polymerization process of butyl rubber [Matematicheskoe modelirovanie processa polimerizatsii butilkauchuka ], Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta [Bulletin of Kazan Technological University], 2016, vol.19, no.23, pp. 92-95.

3. Mukhonadhyay M. // Ind. Eng. Chem. Res. / M.Mukhonadhyay, RadhuranRao G.V. - 1993. - No. 32. - p. 922.

4. Vasilev I.I., Vasilev M.I., Parsunkin B.N., Andreev S.M. Design of automatic optimization control of the recovery units of methanol and diethylene glycol [Proektirovanie sistemy avtomaticheskoy optimizatsii upravleniya raboty ustanovok regeneratsii metanola i dietilenglikolya], *Avtomatizirovannye tekhnologii proizvodstva* [Automation of Technologies and Production], 2018, no.1(17), pp. 4-9.

5. Parsunkin B.N., Andreev S.M., Logunova O.S. *Lo-kal'nye stabiliziruyushhie kontura avtomaticheskogo upravleniya v ASU TP* [Local stabilizing circuits of automatic control in the automated process control system], Magnitogorsk, 2012, 406 p.

---

Журавлев, А.В. Моделирование и автоматизация узла получения изопрена из изоамилен-изопреновой и изопрен-изоамиленовой фракций / А.В. Журавлев, Н.В. Лежнева // Автоматизированные технологии и производства. 2019. №1(19). С.11-13.

Zhuravlev A.V., Lezhneva N.V. Modeling and control of the process of decomposition of isopentane-pentane and isoprene-isoamilene fraction. *Avtomatizirovannye tehnologii i proizvodstva* [Automation of technologies and production], 2019, no.1(19), pp.11-13. (In Russian)



$$x_i = \frac{X_i - X_{i0}}{\Delta X_i}, \quad (1)$$

где  $X_i, X_{i0}, \Delta X_i$  – значения факторов, выраженные через натуральные величины.

Давление в сопле, скорость полосы и расстояние сопла от полосы изменялись в соответствии с планом ПФЭ  $2^3$ . Для перевода натуральных значений факторов в кодированные уровни факторов использованы выражения:

$$\begin{aligned} X_{1B} &= \frac{400-310}{90} = +1; & X_{1H} &= \frac{220-310}{90} = -1; \\ X_{2B} &= \frac{180-130}{50} = +1; & X_{2H} &= \frac{80-130}{50} = -1; \\ X_{3B} &= \frac{16-13}{3} = +1; & X_{3H} &= \frac{10-13}{3} = -1. \end{aligned} \quad (2)$$

Расчеты статистических показателей осуществляется в следующей последовательности:

- шаг 1. Рассчитываем среднее значение выходной величины по формуле:

$$\bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_{q=1}^n Y_q, \quad (3)$$

где  $\bar{Y}$  – среднее арифметическое значение переменной состояния.

- шаг 2. Оцениваем воспроизводимость результатов эксперимента. Для этого вычисляют дисперсию каждого опыта матрицы планирования в виде среднего значения квадратов отклонений результатов повторных опытов от их среднего арифметического по формуле:

$$S_i^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{q=1}^n (Y_q - \bar{Y})^2 \quad (4)$$

- шаг 3. Определяем расчетное значение критерия Кохрена, представляющего собой отношение наибольшей из дисперсий опыта к сумме всех дисперсий по формуле:

$$G_p = \frac{(S_i^2)_{max}}{\sum_{i=1}^N S_i^2}, \quad (5)$$

где  $G_p$  – расчетное значение критерия Кохрена;  $(S_i^2)_{max}$  – максимальное значение дисперсии в опытах.

- шаг 4. Определяем табличное значение критерия Кохрена. Для этого принимает 5% уровень значимости проверки. Число степеней свободы  $f$  определяем из условия  $f_1=n-1, f_2=N$ .

- шаг 5. Проверяем выполнение условия воспроизводимости или равнозначности экспериментов на всем интервале варьирования факторов в соответствии с условием  $G_p < G_T$ . Если условие выполняется, то результаты эксперимента воспроизводимы.

- шаг 6. Вычисление коэффициентов линейной экспериментально-статистической модели в виде полинома первой степени осуществляем с использованием следующих формул. Для свободного члена уравнения линии регрессии:

$$b_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \bar{Y}_i. \quad (6)$$

Для коэффициентов при  $j$ -ом факторе вычисления проводим по формуле:

$$b_j = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \bar{Y}_i X_{ij}. \quad (7)$$

- шаг 7. Проверяем значимость коэффициентов уравнения при каждом факторе. Проверку значимости осуществляем по критерию Стьюдента, значение которого определяем по формуле:

$$t_{pj} = \frac{|b_j|}{S(b_j)}, \quad (8)$$

где  $|b_j|$  – абсолютное значение коэффициента при  $X_j$  факторе;  $S(b_j)$  – квадратичная ошибка определения коэффициента при  $X_j$  факторе.

Значение  $S(b_j)$  определяется в соответствии с формулой:

$$S(b_j) = \sqrt{S_Y^2 / (N \cdot n)}, \quad (9)$$

где  $S_Y^2$  – дисперсия эксперимента;  $N \cdot n$  – общее число опытов в матрице планирования.

Дисперсия эксперимента  $S_Y^2$  определяется по формуле:

$$S_Y^2 = \frac{1}{N} \sqrt{S_i^2}, \quad (10)$$

где  $S_i^2$  – дисперсия  $i$ -ого опыта матрицы планирования.

Расчетное значение  $t_{pj}$  необходимо сравнивать с величиной табличного значения критерия Стьюдента, определяемого для каждого фактора в виде табличного значения  $t_{Tj}$ .

- шаг 8. Принимаем решение о значимости каждого коэффициента  $b_j$ . Коэффициент  $b_j$  в уравнении экспериментально-статистической модели считается значимым, если выполняется условие  $t_{pj} \geq t_{Tj}$  при  $j = 1, 2, 3, \dots, k$ .

- шаг 9. Определение расчетного значения критерия Фишера осуществляем в соответствии с выражением:

$$F_p = S_{Ад}^2 / S_Y^2, \quad (11)$$

где  $F_p$  – расчетное значение критерия Фишера;  $S_{Ад}^2$  – дисперсия адекватности;  $S_Y^2$  – дисперсия эксперимента.

Дисперсия адекватности определяется по формуле:

$$S_{Ад}^2 = \frac{n \sum_{i=1}^n |\bar{Y}_i - \bar{Y}_i|^2}{N - (k+1)}, \quad (12)$$

где  $\bar{Y}_i$  – экспериментальное среднее арифметическое значение переменной состояния в  $i$ -м опыте;  $\bar{Y}_i$  – вычисленное по уравнению экспериментально-статистической модели процесса значение выходного параметра в  $i$ -м опыте;  $k$  – число значимых факторов в уравнении.

Для принятия гипотезы о адекватности полученной экспериментально-статистической модели процесса необходимо сравнить с табличным значение критерия Фишера  $F_T$ .

- шаг 10. Определение табличного значения критерия Фишера осуществляем для 5% уровня значимости при определенных значениях числа степеней свободы для числителя  $f_1$  и знаменателя  $f_2$  в выражении для определения расчетного значения  $F_p$  критерия Фишера.

Число степеней свободы для числителя определяем по формуле  $f_1=N-(k+1)$ . Число степеней свободы для знаменателя определяем по формуле  $f_2=N(n-1)$ .

Уравнение считается адекватным процессу, если выполняется условие  $F_p < F_T$  [4].

Результаты опытов при различных значениях факторов сведены в табл. 1.

Расчет и исследование полученного экспериментального материала при реализации матрицы планирования приведен в табл. 2.

По данным, которые были рассчитаны в табл. 2, определим коэффициенты линии регрессии. Согласно формулам, описанным выше, получим  $b_0 = 13,68; b_1 = -2,79; b_2 = 5,12; b_3 = 2,19$ . Затем определим значимость коэффициентов  $t_{p0} = 25,35; t_{p1} = 5,18; t_{p2} = 9,48; t_{p3} = 4,06$ . Табличное значение критерия Стьюдента  $t_T = 2,31$ , сравнив рассчитанные значения значимости и табличное значение, можно сказать, что все коэффициенты значимы.

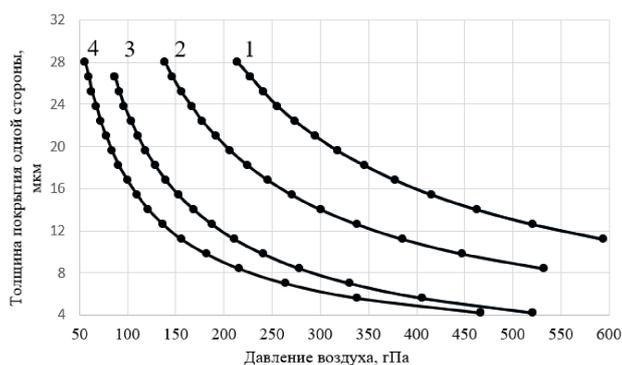
Матрица планирования и результаты опытов при дублированном ПФЭ 2<sup>3</sup> по исследованию толщины цинкового покрытия

Номер опыта	Факторы				Опыты	
	X <sub>0</sub>	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	Y <sub>11</sub>	Y <sub>12</sub>
1	1	1	1	1	16,1	21,8
2	1	-1	1	1	27,3	25,9
3	1	1	-1	1	7	5,1
4	1	-1	-1	1	11,9	11,9
5	1	1	1	-1	11,2	10,5
6	1	-1	1	-1	18,2	19,4
7	1	1	-1	-1	4,9	10,5
8	1	-1	-1	-1	7,7	9,5

Таблица 2

Расчет по экспериментальным значениям

X <sub>0</sub>	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	Y <sub>11</sub>	Y <sub>12</sub>	Y <sub>ср</sub>	S <sub>i</sub> <sup>2</sup>	Y	Y <sub>ср</sub> - Y
1	1	1	1	16,1	21,8	18,95	16,25	18,2	0,56
1	-1	1	1	27,3	25,9	26,6	0,98	23,79	7,91
1	1	-1	1	7	5,1	6,05	1,80	7,96	3,66
1	-1	-1	1	11,9	11,9	11,9	0	13,55	2,72
1	1	1	-1	11,2	10,5	10,85	0,245	13,81	8,78
1	-1	1	-1	18,2	19,4	18,8	0,72	19,4	0,360
1	1	-1	-1	4,9	10,5	7,7	15,68	3,58	17,02
1	-1	-1	-1	7,7	9,5	8,6	1,62	9,16	0,32
-	-	-	-	-	Σ	109,45	37,3	-	41,32
-	-	-	-	-	-	Максимум	16,25	-	-



1- d=16 мм, v=180 м/мин; 2 - d=10 мм, v=180 м/мин; 3 - d=16 мм, v=80 м/мин; 4 - d=10 мм, v=80 м/мин

Рис. 2. Зависимость толщины от давления при различных факторах

Определим значение расчетного критерия Фишера и табличное значение:

$$F_p = S_{Ад}^2 / S_Y^2 = 16,529 / 4,662 = 3,55; F_T = 3,84 \quad (13)$$

Так как выполняется условие адекватности, то есть  $F_p < F_T$ ,  $3,55 < 3,84$ , можно составить уравнение регрессии с полученными коэффициентами:

$$Y = -2,79X_1 + 5,12X_2 + 2,19X_3 + 13,68 \quad (14)$$

На рис. 2 представлены линии регрессии, построенные по полученному уравнению, с учетом основных факторов. При регулировании толщины цинкового покрытия давление в сопле будет использовано в качестве основной регулируемой величины.

Согласно рис. 2 можно наглядно оценить влияние каждого фактора на формирование цинкового покрытия.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате было получено уравнение регрессии (14) на основе экспериментально-статистической модели. Как мы видим, выходная величина (толщина покрытия) зависит от трех факторов, которые оказывают непосредственное влияние на формирование покрытия.

Данная модель, при применении ее в производственных условиях, позволит обеспечить качественное и точное регулирование толщины, сократить отклонение толщины цинка от заданного значения и тем самым уменьшить расходы цинка на производство горячеоцинкованного проката.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Окулов, В.В. Цинкование. Техника и технология/Под редакцией проф. В.Н. Кудрявцева. – М.: Глобус, 2008. – 252 с.
2. Автоматизированные высокоскоростные линии горячего цинкования рулонной стали [Электронный ресурс]. Производственно-инжиниринговая компания ENCE GmbH (ЭНЦЕ ГмбХ) – Режим доступа: <http://www.galvanizing-line.ru/index.php> – Заглавие с экрана.
3. Самарина, И. Г. Область применения и особенности создания имитационной модели нагрева полосы в печи АНГЦ / И. Г. Самарина, Б. Н. Парсункин, М. М. Чертыковцева // Автоматизированные технологии и производства. – 2013. – № 5. – С. 43 – 48.

---

4. Парсункин, Б.Н. Статистическое исследование и моделирование экономических и технологических процессов металлургического производства: учеб. пособие / Б.Н. Парсункин, М.В. Бушманова, С.М. Андреев. – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ». 2007.- 315 с.

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

## OPTIMIZATION OF PARAMETERS OF PROCESS OF CONTINUOUS HOT GALVANISING WITH USE OF THE EXPERIMENTAL STATISTICAL MODEL

Yu.S. Tolstova, V.A. Gazizova, I.G. Samarina

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

**Abstract.** Cast iron and steel quickly rust and the hydroxide of iron which is formed on their surface does not protect metal from the further destroying corrosion action. One of ways of prevention of formation of rust is the covering of a surface of metal the impenetrable barrier interfering influence on it of moisture and air. The basic element providing increase in term of operation of products from metals is the protecting cover which use allows to increase firmness, to reduce losses of metal from corrosion. From metal coverings in world practice zinc are widely used.

**Keywords:** hot galvanizing, coating thickness, regulation, statistical model, full-factor experiment.

### REFERENCES

1. Okulov, V.V. Galvanizing. The equipment and technology [Tsinkovaniye. Tekhnika i tekhnologiya]/ Under edition of the prof. V.N. Kudryavtsev. – M.: Globe, 2008. – pp.252 .

2. Avtomatizirovannyye vysokoskorostnyye linii goryachego tsinkovaniya rulonnoy stali [The automated high-speed lines of hot galvanizing of coiled steel]. Available at: <http://www.galvanizing-line.ru/index.php> (accessed 22 May 2019).

3. Samarina, I. G. A scope and features of creation of a simulation model of heating of a band in the ANGTS furnace [Ob-last' primeneniya i osobennosti sozdaniya imitatsionnoy modeli nagreva polosy v pechi ANGTS]/ I.G. Samarina, B.N. Parsunkin, M.M. Chertykovtseva//the Automated technologies and productions. – 2013. – No. 5. – pp.43 – 48.

4. Parsunkin, B.N. Statisticheskoye issledovaniye i modelirovaniye ekonomicheskikh i tekhnologicheskikh protsessov metallurgicheskogo proizvodstva [Statistical research and modeling of economic and technological processes of metallurgical production]/ B.N. Parsunkin, M.V. Bushmanova, S.M. Andreyev. – Magnitogorsk: Public Educational Institution of Higher Professional Training MSTU. 2007.- pp. 315.

5. Raybchikov M. Yu., Parsunkin B.N., Andreyev S.M., Golovko N.A. Use of heating of a band model for temperature mode control in the tower type lingering furnace [Ispol'zovanie modeli nagreva polosy pri upravlenii temperaturnym rezhimom v protyazhnoj pechi bashennogo tipa], Journal Neurocomputers [Nejrokompyutery: razrabotka, primeneniye], . 2011, no. 5, pp. 41-50.

---

Толстова, Ю.С. Оптимизация параметров процесса непрерывного горячего цинкования с использованием экспериментально-статистической модели / Ю.С. Толстова, В.А. Газизова, И.Г. Самарина // Автоматизированные технологии и производства. 2019. №1(19). С.14-17.

Tolstova Yu.S., Gazizova V.A., Samarina I.G. Optimization of parameters of process of continuous hot galvanising with use of the experimental statistical model. *Avtomatizirovannyye tehnologii i proizvodstva* [Automation of technologies and production], 2019, no.1(19), pp.14-17. (In Russian)

УДК 53.091

## СПОНТАННЫЕ УПРУГО-ИНДУКТИВНЫЕ КОЛЕБАНИЯ В ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВАХ АВТОМАТИЗАЦИИ

И.П. Попов

Центр высоких технологий, Москва, Россия

e-mail: i.popow@yandex.ru

**Аннотация.** Целью работы является представление упругой нагрузки в виде емкостного сопротивления в электрической цепи пьезоэлектрического преобразователя и обоснование возможности возникновения свободных гармонических колебаний при подключении к нему катушки индуктивности. Пьезоэлектрический преобразователь с упругой нагрузкой запасает потенциальную энергию пружины, чем отличается от конденсатора, который запасает энергию электрического поля. Вместе с тем, он воспринимается цепью как емкостное устройство, поэтому может рассматриваться как объект с искусственной (упругой) емкостью. При соединении преобразователя, обладающего искусственной емкостью, с катушкой индуктивности образуется колебательная система, в которой могут возникать свободные гармонические колебания. При этом происходит взаимное превращение энергии магнитного поля соленоида в потенциальную энергию пружины, т.е. взаимодействие величин различной физической природы.

**Ключевые слова:** упругая емкость, упруго-индуктивная колебательная система.

### ВВЕДЕНИЕ<sup>©</sup>

В настоящее время в различных областях деятельности широко внедряются системы автоматизации [1–3], в том числе, роботизированные комплексы. В составе таких систем в качестве датчиков и высокоточных приводов используются, в частности, пьезокерамические электромеханические преобразователи. Актуальной задачей является выявление влияния упругой нагрузки преобразователей на реактивное сопротивление их электрических цепей [4] и вытекающей из этого возможности возникновения свободных гармонических колебаний, которые могут иметь как отрицательное, так и положительное воздействие на систему в целом. Предпосылкой решения этой задачи является одна из двух систем аналогий между электромагнитными и механическими величинами, в соответствии с которыми упругость связана дуальным соотношением с емкостью

$$k \Rightarrow C.$$

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

Целью настоящей работы является представление упругой нагрузки в виде емкостного сопротивления в электрической цепи пьезоэлектрического преобразователя и обоснование возможности возникновения свободных гармонических колебаний при подключении к нему катушки индуктивности.

### МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Основными методами исследования в рамках настоящей работы являются методы математического моделирования и анализа. При этом исследуется не сам физический объект, а его математическая модель – "эквивалент" объекта, отражающий в математической форме важнейшие его свойства – законы, которым он подчиняется, связи, присущие составляющим его частям, и т.д. Используемые виды моделирования являются детерминированными, динамическими и непрерывными. Основными этапами математического моделирования являются построение модели, решение математической задачи, к которой приводит модель, интерпретация полученных следствий из математической модели, проверка адекватности модели, модификация модели. Используемые методы позволяют получить достоверное описание исследуемых объектов.

### РЕЗУЛЬТАТЫ

На рисунке изображена упруго-индуктивная ( $kL$ ) колебательная система в составе пьезоэлектрического преобразователя с упругой нагрузкой (коэффициент упругости  $k$ ) и соленоида с индуктивностью  $L$ . Работа преобразователя основана на прямом и обратном пьезоэффектах. Прямой пьезоэффект проявляется в том, что на обкладках пьезоэлемента при его деформации  $x$  появляется электрический заряд  $q$ .

$$q = d_1 x, \quad (1)$$

где  $d_1$  – пьезомодуль. При подаче на обкладки напряжения  $u$  пьезоэлемент деформируется и развивает усилие  $F$ . В этом заключается обратный пьезоэффект.

$$F = d_2 u. \quad (2)$$

Для выявления характера реактивного сопротивления преобразователя и установления возможности возникновения свободных гармонических колебаний целесообразно абстрагироваться от собственных емкости, индуктивности, массы и упругости пьезоэлемента, потерь на трение и активного сопротивления. Пусть начальные условия:  $x(0) = x_0$ ,  $i(0) = 0$ ,  $u(0) = U_0$ . Здесь  $i$  – ток,  $u$  – напряжение. Для представленной на рисунке электрической схемы уравнение, составленное в соответствии со вторым законом Кирхгофа, имеет вид:

$$u = -L \frac{di}{dt}. \quad (3)$$

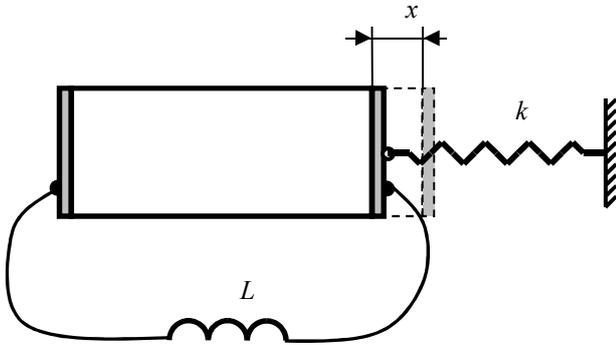


Рис.1. Упруго-индуктивная колебательная система

Сила взаимодействия пьезоэлемента и пружины определяется законом Гука. С учетом (2)

$$F = kx = d_2 u. \quad (4)$$

Используя (4) и (1), выражение (3) можно записать в виде:

$$\frac{k}{d_2} x + L \frac{di}{dt} = 0, \quad (5)$$

$$\frac{k}{d_1 d_2} q + L \frac{di}{dt} = 0.$$

Пусть для компактности  $d_1 d_2 = z$ .

$$\frac{k}{z} \frac{dq}{dt} + L \frac{d^2 i}{dt^2} = 0,$$

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

Последнее выражение представляет собой классическое уравнение свободных гармонических колебаний. Его решение:

$$i = C_1 \cos(\omega_0 t) + C_2 \sin(\omega_0 t),$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{zL}}, \quad (6)$$

$$i(0) = C_1 \cos(\omega_0 \cdot 0) + C_2 \sin(\omega_0 \cdot 0),$$

$$C_1 = 0,$$

$$\frac{di}{dt} = C_2 \omega_0 \cos(\omega_0 t).$$

В соответствии с (5) и (2)

$$\frac{k}{d_2} x_0 + L \frac{di}{dt}(0) = 0,$$

$$\frac{k}{d_2} x_0 + LC_2 \omega_0 \cos(\omega_0 \cdot 0) = 0,$$

$$C_2 = -\frac{kx_0}{d_2 \omega_0 L} = \frac{U_0}{\omega_0 L},$$

$$i = I \sin(\omega_0 t),$$

$$I = \frac{U_0}{\omega_0 L} = U_0 \sqrt{\frac{z}{kL}} = \frac{U_0}{X_{kL}},$$

$$X_{kL} = \sqrt{\frac{kL}{z}}.$$

Последнее выражение представляет собой волновое сопротивление упруго-индуктивной ( $kL$ ) колебательной системы.

Сравнение выражения (6) с формулой для частоты «обычного» электрического колебательного контура

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

позволяет определить «упругую емкость» и электрическое реактивное «упругое сопротивление»

$$C_k = \frac{z}{k},$$

$$X_k = \frac{1}{\omega C_k} = \frac{k}{\omega z}.$$

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Упругая нагрузка пьезоэлектрического преобразователя обуславливает емкостный характер его электрической цепи.

Пьезоэлектрический преобразователь с упругой нагрузкой запасает потенциальную энергию пружины, чем отличается от конденсатора, который запасает энергию электрического поля. Вместе с тем он воспринимается цепью как емкостное устройство, поэтому может рассматриваться как объект с искусственной (упругой) емкостью.

При соединении преобразователя, обладающего искусственной емкостью, с катушкой индуктивности образуется колебательная система, в которой могут возникать свободные гармонические колебания. При этом происходит взаимное превращение энергии магнитного поля соленоида в потенциальную энергию пружины, т.е. взаимодействие величин различной физической природы, что принципиально отличает их от колебательных систем с однородными элементами.

Образование подобных колебательных систем в устройствах автоматики может приводить к резонансным явлениям и иметь негативные последствия.

Перспективными для робототехники являются индуктивно-емкостные электромеханические преобразователи, использующие магнитоэлектрический и пьезоэлектрический эффекты. Такие преобразователи способны обеспечивать высокоточные трехмерные перемещения. Их наивысшие энергетические показатели обеспечиваются в режиме электромеханического резонанса, в частности, при реализации упруго-индуктивной ( $kL$ ) колебательной системы, что доставляет пример ее положительного воздействия.

---

---

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Васильев, И.И. Проектирование системы автоматической оптимизации управления работы установок регенерации метанола и диэтиленгликоля / И.И. Васильев, М.И. Васильев, Б.Н. Парсункин, С.М. Андреев // Автоматизированные технологии и производства. 2018. №1(17). С. 4-9.

2. 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. Донецков, А.М. Автоматизация процесса разработки одежды // Автоматизированные технологии и производства. 2018. No1(17). С.10-13.

4. Попов, И.П. О емкостных и индуктивных свойствах электромеханических преобразователей / И.П. Попов, Ф.Н. Сарапулов, С.Ф. Сарапулов // Вестник Курганского государственного университета. Технические науки. Вып. 6. 2011. №1(20). С. 102-103.

## SPONTANEOUS ELASTICALLY INDUCTIVE OSCILLATIONS IN TECHNICAL AUTOMATION MEANS

I.P. Popov

Center of High Technologies, Moscow, Russia

e-mail: i.popow@yandex.ru

**Abstract.** The aim of the work is to represent the elastic load in the form of capacitance in the electric circuit of the piezoelectric transducer and to substantiate the possibility of the occurrence of free harmonic oscillations when the inductor is connected to it. The elastic load piezoelectric transducer stores the potential energy of the spring, which is different from the capacitor that stores the energy of the electric field. At the same time, it is perceived by the chain as a capacitive device, therefore it can be considered as an object with an artificial (elastic) capacity. When a transducer with an artificial capacitance is connected to an inductance coil, an oscillating system is formed in which free harmonic oscillations can occur. When this occurs, the mutual transformation of the magnetic field energy of the solenoid into the potential energy of the spring, i.e. interaction of quantities of different physical nature.

**Keywords:** elastic capacity, elastic-inductive oscillatory system.

#### REFERENCES

1. Vasilyev I.I., Vasilyev M.I., Parsunkin B.N., Andreev S.M. Design of automatic optimization control of the recovery units of methanol and diethylene glycol. *Avtomatizirovannye tehnologii i proizvodstva* [Automation of technologies and production], 2018, no.1(17), pp. 4-9. (In Russian).

2. 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. *Avtomatizirovannye tehnologii i proizvodstva* [Automation of technologies and production], 2018, no.1(17), pp.18-23. (In Russian).

3. Donetskov A.M. Automation of the engineering process of clothing. *Avtomatizirovannye tehnologii i proizvodstva* [Automation of technologies and production], 2018, no.1(17), pp.10-13. (In Russian).

4. Popov I.P., Sarapulov F.N., Sarapulov S.F. On capacitive and inductive properties of electromechanical converters. *Vestnik Kurganskogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskkiye nauki* [Bulletin of Kurgan State University. Technical science], 2011, no. 1 (20), pp. 102, 103. (In Russian).

---

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

Popov I.P. Spontaneous elastically inductive oscillations in technical automation means. *Avtomatizirovannye tehnologii i proizvodstva* [Automation of technologies and production], 2019, no.1(19), pp.18-20. (In Russian)

## ОБЗОР МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЯ УРОВНЯ МЕТАЛЛА В КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ МНЛЗ

В.А. Газизова, Ю.С. Толстова, Е.Ю. Мухина

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

valentina-magnit@mail.ru

**Аннотация.** В статье рассматриваются основные методы и средства регулирования уровня металла в кристаллизаторе машины непрерывного литья заготовок. Для обеспечения высокого качества стали необходимо поддерживать постоянный уровень металла в кристаллизаторе МНЛЗ в течение всего времени разливки. Для достижения данной цели очень важно добиться точного контроля данного параметра, что возможно при правильном выборе метода и средства регулирования. Более подробно рассмотрены радиометрический, инфракрасный и вихретоковый методы регулирования, приведены их достоинства и недостатки.

**Ключевые слова:** кристаллизатор, МНЛЗ, уровень, радиометрический метод, инфракрасный метод, вихретоковый метод, электромагнитный метод.

### ВВЕДЕНИЕ<sup>©</sup>

С внедрением в чёрную металлургию технологии непрерывной разливки стали точное и надежное определение и регулирование уровня металла в кристаллизаторе остаётся одной из наиболее важных задач в этом процессе.

Кристаллизация жидкого металла - один из наиболее важных этапов в формировании готового слитка. Именно на этом этапе задается необходимая для дальнейшего проката форма и размер слитка. Высокого качества выпускаемой продукции из кристаллизатора можно добиться точным регулированием уровня металла в нем.

Уровень в процессе разливки задается в достаточно узких пределах. Это необходимо для предотвращения различных аварийных ситуаций, таких как повышение уровня (приводит к переливу металла через верхнюю границу кристаллизатора); понижение уровня (приводит к возникновению корочки на готовом слитке).

Для измерения уровня металла в кристаллизаторе опробованы и испытаны различные методы, например:

- радиометрический (радиоактивный);
- инфракрасный;
- вихретоковый (электромагнитный);
- тепловой;
- оптический;
- ультразвуковой;
- электромеханический.

В статье рассмотрены три вида методов: радиометрический, инфракрасный и вихретоковый.

При измерении уровня металла в кристаллизаторе важнейшими считаются следующие параметры устройства:

1. Готовность измерительного устройства к работе, характеризующие его надежность и устойчивость при возникновении неожиданных серьезных неполадок и аварий, сопровождающихся потерей измерительного сигнала;

2. Стабильность устройства, характеризующая воспроизводимость результатов измерений, например, дрейф сигнала в результате изменения температуры свидетельствует о низкой стабильности;

3. Время отклика, характеризующее быстроту реакции измерительного устройства на изменение уровня металла;

4. Разрешающая способность позиционирования, характеризующая точность измерения уровня металла и минимальные изменения уровня;

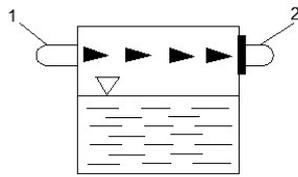
5. Адаптируемость устройство, характеризующая возможность его применения при измерениях по различным сценариям (разных размеров и формы кристаллизаторов, наличие электромагнитных перемешивающих и тормозных устройств, применение открытые разливки или использования литейного порошка) [1, 2].

### РАДИОМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД

Измерение уровня с помощью радиоактивных изотопов имеет место быть, в агрессивных, разряженных средах и средах с высоким давлением, где невозможно применять обычные приборы.

Основой измерения уровня при помощи искусственных радиоактивных изотопов является принцип поглощения радиоактивного излучения материалом, содержащимся в измеряемом пространстве. Пучок гамма-лучей, который излучается радиоактивным источником, проникает через резервуар прямолинейно. Напротив излучателя помещается приемник преобразования принятых лучей в электрические импульсы. По причине поглощения радиоактивных лучей материалом, который находится внутри резервуара, интенсивность излучения ( $I_{\text{излуч}}$ ) в большей степени зависит от высоты уровня ( $h$ ). Выбрав подходящее распределение активности источника радиации, которое компенсирует различные расстояние и толщину стенок между источником и приемником радиации, можно обеспечить линейную характеристику сигнала отклика на изменение уровня

стали во всём диапазоне измерений. Схема радиоактивного излучателя представлена на рис. 1.



1- излучатель; 2- приемник

Рис. 1. Схема радиоактивного излучателя уровня

Выходящие из приемника импульсы, частота которых пропорциональна  $I_{\text{излуч}}$ , передвигаются к переключающему устройству, реле которого приходит в действие в тот момент, когда число импульсов в единицу времени достигает минимума. Из-за того, что чаще всего измеряют толстые слои материала, используют в большей степени гамма-лучи.

Системы измерения уровня металла в кристаллизаторе фирмы «Berthold» в качестве источника радиоактивного излучения используют изотоп  $\text{Co-60}$ , иногда  $\text{Cs-137}$ . Источник состоит из проволочной спирали, которая покрыта благородным металлом, обладающим защитными свойствами от химически агрессивных сред. Чтобы компенсировать нелинейность измерения уровня жидкого металла, которая обуславливается изменением толщины просвечивания, изменяют шаг намотки спирали. Мощность источника рассчитывается для каждого случая. Источник помещается в свинцовый чехол и поток излучения коллимируется с помощью поворотного коллиматора. Приемником излучения в системе служит сцинтилляционный детектор на базе кристалла  $\text{NaY}$ , для защиты которого используют стальной водоохлаждаемый кожух.

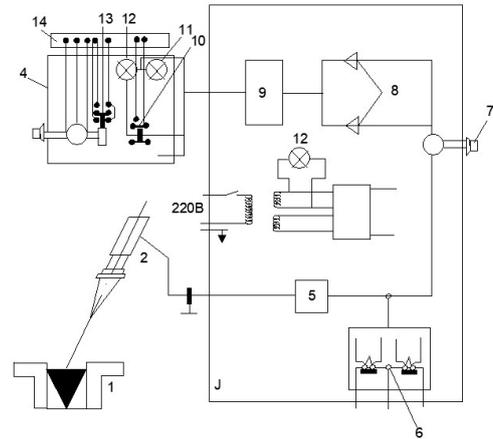
Радиометрические измерения могут быть применены на МНЛЗ практически любого типа и формы, при разливке стали любого качества с любой скоростью. Благодаря тому, что это аппаратура имеет фиксированный геометрический интервал измерений и защитное исполнение, ее доступность чрезвычайно высока, а внешние воздействия практически не влияют на показания. Это привело к тому, что радиометрические измерители уровня металла в кристаллизаторе получили наибольшее распространение в промышленности.

Однако очевидно, что обращение с источником радиоактивного излучения требует принятия дополнительных мер безопасности.

Также отмечено неблагоприятное влияние шлакообразующей смеси и шлака в кристаллизаторе, вызывающих отклонение измеренных значений. Шлакообразующая смесь и шлак имеет значительно меньшую плотность, чем сталь, и их слой на поверхности жидкой стали поглощает часть радиации, что приводит к повышению показания уровня стали в кристаллизаторе [3].

Помимо радиоизотопных уровнемеров в зарубежных странах разрабатываются средства контроля уровня металла в кристаллизаторе упрощенные с точки зрения размещения их в составе оборудования и более надежные в эксплуатации. Примерами разработчиков таких систем являются фирмы «Concast» (Швейцария) и «Clesid» (Франция). Они разработали датчик инфракрасного излучения

для определения уровня металла в кристаллизаторе. Его помещают на разливочной площадке, и он механически не связан с кристаллизатором. Уровнемер, созданный этими фирмами, отличается простотой и надежностью, функционирует независимо от состояния поверхности ванны жидкого металла в кристаллизаторе. Структурная схема датчика представлена на рис. 2.



1-кристаллизатор; 2 – датчик уровня; 3 – шкаф электронной аппаратуры; 4 – коммутационная панель; 5 – блок первичной обработки сигнала; 6 – сигнальное устройство; 7 – переключатель размеров кристаллизатора; 8 – ПИ регулятор; 9 – усилитель мощности; 10 – переключатель; 11 – контрольная лампа; 12 – индикаторная лампа; 13 – кнопка нуля; 14 – соединительный клеммник

Рис. 2. Структурная схема инфракрасного измерителя уровня металла

Подобный уровнемер разработан фирмой «CEDA» (Италия). Этот датчик, как и предыдущий, работает на основе принципа инфракрасного излучения от ванны жидкого металла в кристаллизаторе, однако он имеет преимущество - не требует переградуировки при изменении размеров кристаллизатора. Это определяется тем, что измеритель работает на основе облучения покрытой шлаком ванны жидкого металла. От поверхности чистого металла отражается поток инфракрасного излучения, далее он детектируется оптоэлектронным датчиком, к примеру, датчик фирмы Balluff. На показания прибора не оказывают влияние ни температура металла, ни наличие шлака на поверхности металла [4].

#### ВИХРЕТОКОВЫЙ МЕТОД

В вихретоковом датчике имеется катушка индуктивности, присоединенная к источнику переменного тока и генерирующая переменное электромагнитное поле, которое индуцирует вихревые токи в электропроводящем материале в окрестностях катушки. Вихревые токи создают встречное электромагнитное поле, интенсивность которого регистрируют одна или несколько специально предназначенных для этого измерительных катушек. Величина сигнала, генерируемого вихревыми токами в электропроводящем объекте, напрямую зависит от проводимости и от расстояния до катушки индуктивности. В идеальном случае, когда изменения, индуцированные в цепи вихретокового датчика, обусловлены только изменением уровня ванны жидкого металла, сигнал датчика находится в прямой связи с уровнем в кристаллизаторе. Возможность применения в конкретном случае зависит от того, насколько близким к идеальным

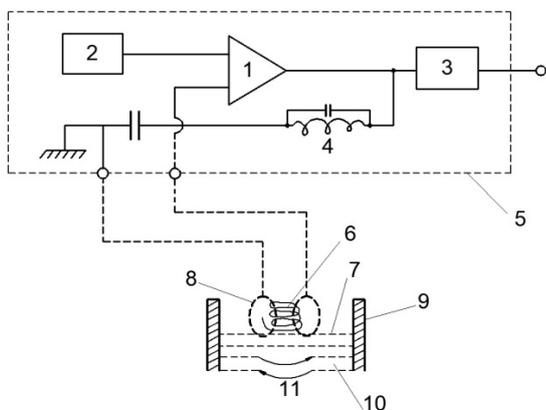
могут быть условия, созданные при непрерывной разливке, или в какой степени удастся ослабить внешние возмущения.

Вихретоковые датчики применимы только к электропроводящим материалам, поэтому не чувствительны к присутствию шлака и шлакообразующей смеси и обнаруживают только действительный уровень стали под шлаком.

Датчики данного типа очень чувствительны к внешним воздействиям. Изменения температуры также влияет на электропроводность окружающих элементов металлоконструкции и, следовательно, на показания. В течение времени разливки можно наблюдать температурный дрейф до нескольких сантиметров.

Любой металлический объект вызывает реакцию вихретокового датчика, поэтому перемещение промежуточного ковша, перенастройка размеров сечения кристаллизатора, движение лопаты, стального стержня, других инструментов в руках операторов вблизи датчика могут привести к ложным сигналам и нарушить процесс измерения. Кроме того, вихретоковые системы измерения, предлагаемые на промышленном рынке, не всегда совместимы с устройством электромагнитного торможения и перемещения.

Данный метод применяется в зарубежных датчиках фирмы «Nippon Kogan» (Япония). Схема датчика представлена на рис. 3.



1 – усилитель обратной связи; 2 – осциллятор; 3 – детектор; 4 – реактивная катушка; 5 – основной блок; 6 – измерительная катушка; 7 – зеркало ванны; 8 – магнитное поле; 9 – кристаллизатор; 10 – ванна жидкого металла; 11 – вихревые токи

Рис. 3. Схема измерителя уровня металла в кристаллизаторе, разработанного фирмой «Nippon Kogan», Япония

Источником питания для измерительной катушки является высокочастотный генератор. По отношению к положению зеркала металла полное сопротивление измерительной катушки также изменяется. Это значение является мерой уровня жидкого металла в кристаллизаторе. Измерительная катушка размещается в защитном керамическом стакане, охлаждаемом потоками воздуха [5].

В отечественном производстве также применяется данный метод, так в кислородно-конверторном цехе ПАО «ММК» на МНЛЗ №6 имеется электромагнитный уровнемер SH компании VUNZ, который используется для измерения уровня жидкой стали в кристаллизаторе МНЛЗ. Уровнемер содержит электромагнитный датчик VUNZ SH7-S10, включая кабель с разъёмом, предварительный усилитель SH-P и блок оценки SH-E. Компонировка

отдельных частей уровнемера изображено на рис. 4.

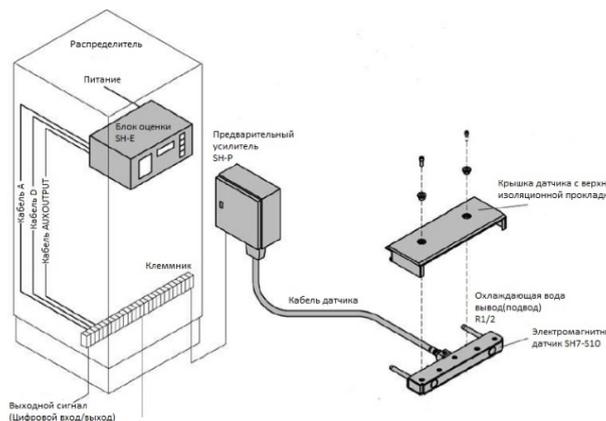


Рис. 4. Измерение уровня в кристаллизаторе, сборочный комплект

Заданное значение уровня заполнения в нормальном режиме работы составляет 75-100 мм ниже верхней кромки кристаллизатора. Необходимая точность регулирования уровня составляет  $\pm 3$  мм.

Датчик в виде призмы упруго прижат прямо к верхней части медной плиты кристаллизатора с помощью крышки датчика. Блок оценки автоматически компенсирует влияние колебаний кристаллизатора на выходной сигнал [6].

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, для точного измерения уровня металла в кристаллизаторе существует большое количество различных методов измерения, у каждого из которых есть свои плюсы и минусы.

Радиометрический метод может быть применен практически на любых МНЛЗ, он прост и доступен в обращении, но необходимо соблюдать осторожность при работе с радиоактивными материалами. Инфракрасный и вихретоковый методы безопасны в использовании, точность их измерения высока только в том случае, если на пути датчик – среда не наблюдаются посторонние предметы, инструменты.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Мёрман, Д. Быстрое и точное измерение уровня металла на установках непрерывной разливки стали / Д. Мёрман, Й. Шмид, С. Спагнул // Новости черной металлургии за рубежом – М.: ОАО «Черметинформация» - 2012. №4. С. 52-58.
2. Мухина, Е. Ю. Проектирование автоматизированных систем: [Электронный ресурс]: конспект лекций / Е.Ю. Мухина. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова. 2015.
3. Радионуклидные приборы [Электронный ресурс]. М. : Челябинск, 2016. – Режим доступа: <http://www.rip74.ru/>. Заглавие с экрана ISBN – 3685 – 926 – 13682 -7.
4. Мёрман, Д. Быстрое и точное измерение уровня металла в кристаллизаторах машин непрерывного литья [Текст] / Д. Мёрман Й. Шмид, С. Спагнул // Черные металлы– М.: Изд. дом «Руда и металлы». 2012. №3. С. 53-61.
5. Чернышев, Н.Н. Комбинированная система автоматического регулирования уровнем металла в кристаллизаторе / Н.Н. Чернышев // Черные металлы – М.: ДонНТУ, фак. [АиТ]. 2013. – 5 с. : ил., табл.

6. Мухина, Е.Ю. Выбор метода измерения уровня жидкого металла в кристаллизаторе МНЛЗ / Е.Ю. Мухина, М.В.Федорова // Роль науки в развитии общества -Уфа: Аэтерна. 2015. С.23-24.

7. Парсункин, Б.Н. Локальные стабилизирующие контура автоматического управления в АСУ ТП / Б.Н. Парсункин, С.М. Андреев, О.С. Логунова. – Магнитогорск.: КТ «Буки-Веди», 2012. 406 с.

8. Ишметьев, Е.Н. Автоматизация процесса вычисления объема металлолома для кислородно-конвертерного процесса с использованием 3D-камеры / Е.Н. Ишметьев, Д.В. Чистяков, А.Н. Панов, Е.Э. Бодров // Автоматизированные технологии и производства. 2017. №2(16). С.4-9.

## THE REVIEW OF METHODS AND MEASURING INSTRUMENTS OF LEVEL OF METAL IN MACHINE CONTINUOUS-CASTING MACHINES CRYSTALLIZER

V.A. Gazizova, Yu.S. Tolstova, E.Yu. Mukhina

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

**Abstract.** In article the main methods and means of regulation of level of metal in a crystallizer of the machine of continuous-casting of preparations are considered. For quality providing steel it is necessary to support the constant level of metal in CCMs crystallizer during the whole time of pouring. For achievement of this purpose it is very important to achieve exact control of this parameter that is possible at a right choice of a method and means of regulation. Radiometric, infrared and vortex-current methods of regulation are in more detail considered, their advantages and shortcomings are specified.

**Keywords:** crystallizer, CCMs, level, radiometric method, infrared method, vortex-current method, electromagnetic method.

### REFERENCES

1. D. Myorman, Schmid J., Spagnol S. Fast and precise measurement of level of metal on installations of continuous pouring there were [Bystroye i tochnoye izmereniye urovnya metalla na ustanovkakh nepreryvnoy razlivki stali], *Novosti chernoy metallurgii za rubezhom [News of ferrous metallurgy behind a boundary]*, 2012, No. 4, pp. 52-58.

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

3. Radio isotope devices, [Electronic resource]. Available at: <http://www.rip74.ru> (accessed 1 May 2019)

4. Myorman. Fast and precise measurement of level of metal in crystallizers of machines of continuous casting [Text] / D. Myorman, Schmid J., Spagnol With // *Black metals* – М.: Prod. the house "Ore and metals" - 2012. - No. 3. – pp. 53-61.

5. N.N. Chernyshev. The combined system of automatic control by metal level in a crystallizer [Kombinirovannaya sistema avtomaticheskogo regulirovaniya urovnem metalla v kristallizatore], *Chernyye metally [Ferrous metals]*, 2013, pp. 5.

6. E.Yu. Mukhina, M.V. Fedorova. The choice of a method of measurement of level of liquid metal in a crystallizer of CCMs [Vybor urovnya izmereniya urovnya zhidkogo metalla v kristallizatore MNLZ], *Rol' nauki v razvitii obshchestva [A science Role in development of society]*, 2015, pp. 23-24.

7. Parsunkin B.N., Andreev S.M., Logunova O.S. *Lokal'nye stabiliziruyushhie kontura avtomaticheskogo upravleniya v ASU TP* [Local stabilizing circuits of automatic control in the automated process control system], Magnitogorsk, 2012, 406 p.

8. Ishmetyev E.N., Chistyakov D.V., Panov A.N., Bodrov e.e. automated calculation of scrap-metal's volume in oxygen converter process using 3d-camera. *Avtomatizirovannye tekhnologii proizvodstva [Automation of Technologies and Production]*, 2017, no.2(16), pp. 4-9.

Газизова, В.А. Обзор методов и средств измерения уровня металла в кристаллизаторе МНЛЗ / В.А. Газизова, Ю.С. Толстова, Е.Ю. Мухина // Автоматизированные технологии и производства. 2019. №1(19). С.21-24.

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

## ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОННОГО ДАТЧИКА ТЕМПЕРАТУРЫ КТУ84/130

А.С. Кириллов, К.А. Кунурбаев, Е.А. Бичурин

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

e-mail sasha1999sk@yandex.ru

**Аннотация.** В электронных датчиках температуры в качестве чувствительного элемента используются полупроводниковые приборы, которые имеют нелинейные характеристики. Линеаризация такой характеристики производится электронной схемой, производящий обработку сигнала и вывод значений на цифровой индикатор. В работе проведено исследование метрологических характеристик датчика температуры КТУ 84/130, определена нелинейность показаний, и получены коэффициенты линейного регрессионного уравнения. Значимость полученных коэффициентов составила 104,8, что соответствует уровню значимости 0,95 по критерию Фишера.

**Ключевые слова:** датчик температуры, метрологические характеристики, обработка экспериментальных данных, линия регрессии.

### ВВЕДЕНИЕ

Электронный датчик температуры КТУ 84/130 представляет собой электронный блок к которому подключен чувствительный элемент, расположенный в защитном чехле из нержавеющей стали. В качестве чувствительного элемента используется полупроводниковый диод. Диапазон измерения составляет от  $-50$  до  $+250$  °С. Внешний вид измерительного прибора показан на рис. 1. На цифровом индикаторе отображается измеренное значение температуры в градусах Цельсия или Фаренгейта. Основная цель исследования определить метрологические характеристики датчика температуры для оценки возможности применения измерительного прибора для проведения экспериментов по измерению температуры жидких и газообразных сред.



Рис. 1. Внешний вид измерительного прибора КТУ 84/130

### МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ

Для получения метрологических характеристик измерительного прибора был собран поверочный стенд (рис.2), включающей емкость с измеряемой средой, нагрев которой производился с помощью нагревателя.

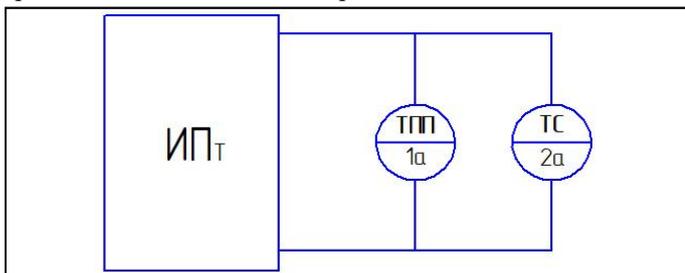


Рис. 2 Схема установки

В качестве среды использовалась вода, что ограничило диапазон измерений от  $0$  °С до  $100$  °С. Для обеспечения нулевой температуры использовался тающий лед. В качестве образцового датчика температуры использовалось платиновое термосопротивление ТПП100 [1], а в качестве измерительного прибора использовался измеритель КИСС-03 [2] имеющий сертификат средства измерения.

Инструментальная погрешность измерения температуры с использованием образцового датчика составила  $0,001$  °С. Для равномерного распределения температуры по всему объему среды производилось постоянное перемешивание.

Измерения проводились несколько раз в период нагрева и охлаждения среды. Полученные результаты фиксировались в журнал наблюдений. Всего было проведено 6 этапов нагрева и охлаждения измеряемой среды.

Проведение поверки приборов с помощью калибратора-измерителя стандартных сигналов КИСС-03.

Калибратор-измеритель стандартных сигналов КИСС-03 предназначен для проверки, настройки и поверки показывающих и регистрирующих приборов, различных измерительных комплексов, а также может применяться при выполнении пуско-наладочных работ в различных отраслях промышленности [2].

Внешний вид прибора приведен на рис. 3.

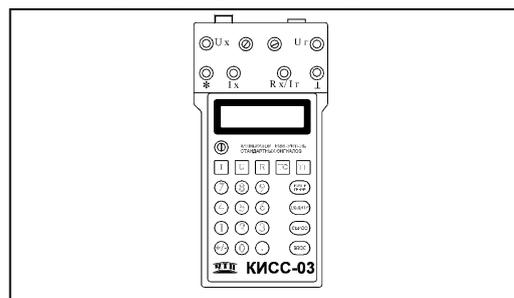


Рис. 3. Внешний вид прибора

Основными функциями прибора КИСС-03 являются [3]:

- измерение значений постоянного тока или напряжения;
- измерение сопротивления;
- измерение температуры с помощью термопреобразователей сопротивлений (ТС) с номинальной статической характеристикой преобразования 50М, 100М, 50П, 100П (в дальнейшем – ТСМ50, ТСМ100, ТСП50, ТСП100 соответственно), Pt100, подключенных по 4-х проводной линии связи;
- измерение температуры с помощью термопар (ТП) типов S, K, L, В, А-1, N, J (ГОСТ Р 8.585-2001) с компенсацией температуры «холодных» спаев;
- генерация постоянного тока или напряжения с возможностью плавной регулировки и задания от одного до шести значений генерируемого параметра; вывод значений осуществляется циклически, с помощью нажатия одной клавиши; имеется возможность изменять направление вывода значений;
- генерация ЭДС ТП типов S, K, L, В, А-1, N, J с возможностью компенсации ЭДС «холодных» спаев и плавной регулировки;
- генерация и измерение постоянного тока и/или напряжения одновременно, с возможностью установки одного значения генерируемого параметра.

Результаты исследований и расчетные данные представлены в табл. 1.

Таблица 1  
Полученные экспериментальные данные

Температура по образцовому термометру	Значение температуры по исследуемому термометру						
	Сопротивление образцового термометра	Нагрев	Охлаждение	Нагрев	Охлаждение	Нагрев	Охлаждение
0	100	-0,9	-0,8	-0,9	-0,9	-0,9	-0,9
10	103,91	8,5	8,2	7,9	7,9	8,1	8,6
20	107,82	18,5	18,4	18,1	18,3	18,2	18
30	111,73	28,6	28,4	28,5	28,7	28,6	28,5
40	115,64	38,5	38,3	38,4	38,3	38	38,4
50	119,55	48,5	48,3	48,3	48,4	48,2	48,2
60	123,46	58,2	58,1	58,3	58,3	58,2	58,4
70	127,37	68,2	68,3	68,1	68,2	68	67,9
80	131,28	78,2	78,4	78,1	78,2	78,3	78,2
90	135,19	88,4	87,5	87,9	88	88,2	88
98	138,318	97,3	97,3	96,8	96,8	97,1	97,1

#### ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДАТЧИКА И ПРОВЕРКА ЕЁ АДЕКВАТНОСТИ

Для построения математической модели исследуемого датчика была проведена формализация полученных результатов, которые представлены в табл. 2. Независимым параметром является температура, измеренная образцовым термометром. В качестве зависимой переменной принято среднеарифметическое значение температуры [3,4] в результате проведения нескольких экспериментов при одном и том же значении независимой переменной определенной по формуле

$$M_{yi} = \frac{1}{6} \sum_{k=1}^6 t_{ИЗМ_k} \quad (1)$$

где  $M_{yi}$  - среднеарифметическое значение температуры измеренной исследуемым датчиков при постоянной значении температуры среды, измеряемой образцовым датчиком, °С;  $t_{ИЗМ_k}$  - значение температуры, измеренное исследуемым датчиком при постоянной значении температуры среды, °С.

Таблица 2  
Формализованные результаты эксперимента

N	Значения независимых переменных x	Среднеарифметические значения наблюдений зависимой переменной $M_y$	Значения по регрессионному уравнению (5) $\hat{y}$
1	0	-0,88	-1,5
2	10	8,20	8,5
3	20	18,25	18,5
4	30	28,55	28,5
5	40	38,32	38,5
6	50	48,32	48,5
7	60	58,25	58,5
8	70	68,12	68,5
9	80	78,23	78,5
10	90	88,00	88,5
11	98	97,07	96,5

В качестве гипотезы было принято, что математическая модель может быть представлена линейным уравнением.

Коэффициенты регрессионного уравнения получены с использованием метода наименьших квадратов, который можно представить как сведения критерия квадрата разности к минимуму, т.е.

$$I = \sum_{i=1}^n (M_{yi} - \hat{y}_i)^2 \rightarrow \min, \quad (4)$$

где  $\hat{y}_i$  - решение регрессионного уравнения вида

$$\hat{y}_i = b_1 x_i + b_0 \quad (5)$$

где  $b_0, b_1$  – искомые коэффициенты регрессионного уравнения.

Для нахождения коэффициентов линейного уравнения используем матричный способ реализации метода наименьших квадратов. Для этого данные наблюдений представим в матричной форме

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 \\ 1 & x_2 \\ \dots & \dots \\ 1 & x_n \end{bmatrix}, \mathbf{Y} = \begin{bmatrix} My_1 \\ My_2 \\ \dots \\ My_n \end{bmatrix}, \mathbf{B} = \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где  $\mathbf{X}$  – матрица размерности  $n \times 2$ , в которой второй столбец представляет наблюдение вектора независимой переменной  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , а первый столбец заполнен единицами для получения свободного члена  $b_0$  регрессионного уравнения;  $\mathbf{Y}$  – вектор столбец наблюдений зависимой переменной.

Для определения коэффициентов регрессионного уравнения матрицы  $\mathbf{B}$  использовалось выражение в матричном виде

$$\mathbf{B} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{Y}.$$

После подстановки получим

$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 10 \\ 1 & 20 \\ 1 & 30 \\ 1 & 40 \\ 1 & 50 \\ 1 & 60 \\ 1 & 70 \\ 1 & 80 \\ 1 & 90 \\ 1 & 98 \end{pmatrix}^T \times \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 10 \\ 1 & 20 \\ 1 & 30 \\ 1 & 40 \\ 1 & 50 \\ 1 & 60 \\ 1 & 70 \\ 1 & 80 \\ 1 & 90 \\ 1 & 98 \end{pmatrix}^{-1} \times \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 10 \\ 1 & 20 \\ 1 & 30 \\ 1 & 40 \\ 1 & 50 \\ 1 & 60 \\ 1 & 70 \\ 1 & 80 \\ 1 & 90 \\ 1 & 98 \end{pmatrix}^T \times \begin{pmatrix} -0,88 \\ 8,20 \\ 18,25 \\ 28,55 \\ 38,32 \\ 48,32 \\ 58,25 \\ 68,12 \\ 78,23 \\ 88,00 \\ 97,07 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} -1,49705 \\ 0,99799 \end{bmatrix}$$

Таким образом, линейное уравнение математической модели запишется как

$$\hat{y} = 0,99799x - 1,49705. \quad (4)$$

Так как погрешность измерений датчиков используемых в системах автоматизации составляет 0,1%, то коэффициенты полученного регрессионного уравнения были округлены до первого знака после запятой и регрессионное уравнение приняло вид

$$\hat{y} = x - 1,5. \quad (5)$$

Результат рассчитанный по уравнению (5) представлен в табл.2. График зависимости показаний исследуемого датчика от температуры среды приведен на рис.4. Как видно из полученного уравнения исследуемый датчик имеет систематическую погрешность 1,5°C.

Для проверки применимости полученной эмпирической модели для последующего её применения проведена проверка по двум показателям. Для проверки надежности полученного уравнения регрессии использовалась F-статистика (статистика Фишера).

Общая дисперсия определится как

$$D_{\text{Общ}} = \frac{S_{\text{Общ}}}{n-1},$$

где  $n$  – число измерений;  $S_{\text{Общ}}$  – сумма квадратов, вычисленная по формуле

$$S_{\text{Общ}} = \sum_{i=1}^n (M_{yi} - \bar{y})^2,$$

где  $M_{yi}$  – математические ожидания измерений в каждом опыте;  $\bar{y}$  – среднее значение математических ожиданий, рассчитанное по формуле

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n M_{yi}.$$

Остаточная дисперсия определится как

$$D_{\text{Ост}} = \frac{S_{\text{Ост}}}{n-p-1},$$

где  $p$  – количество коэффициентов регрессионного уравнения;  $S_{\text{Ост}}$  – сумма квадратов, вычисленная по формуле

$$S_{\text{Ост}} = \sum_{i=1}^n (M_{yi} - \hat{y}_i)^2.$$

Величина  $F$  определяется по формуле []

$$F = \frac{D_{\text{Общ}}}{D_{\text{Ост}}}.$$

Вычисленные значения параметров приведены в табл.3.

Таблица 3  
Вычисленные значения для проверки критерия по  $F$ -статистике

Показатель	Значение показателя
$\bar{y}$	48,22
$S_{\text{Общ}}$	10761,52
$n$	11
$p$	2
$D_{\text{Общ}}$	1076,15
$S_{\text{Ост}}$	1,459
$D_{\text{Ост}}$	0,182
$F$	5901,2
$F(0,05;10;8)$	3,34

Полученный критерий  $F$  значительно больше, чем табличное значение для 5% уровня значимости ( $\alpha=0,05$ ). Это означает, что полученное регрессионное уравнение применимо.

Зависимость температуры от математического ожидания представлена на рисунке 4.

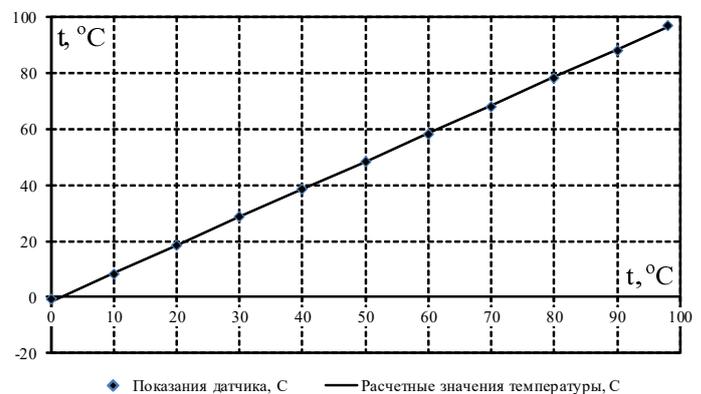


Рис. 4. Зависимость показаний исследуемого датчика температуры от температуры нагрева

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Измерительный прибор КТУ 84/130 имеет достаточную линейность для обеспечения погрешности измерений не хуже 0,1%, однако имеет аддитивную погрешность, составляющую 1,5°C. При использовании данного измерительного преобразователя необходимо учитывать это обстоятельство, выполнив необходимую коррекцию показаний. В этом случае его можно использовать в системах управления параметрами процесса [5].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Андреев, С.М. Принципы построения и организации комплексов технических средств в системах автоматического управления. Курс лекций: учеб. пособие. – Магнитогорск: изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2008. -132 с.
2. Калибратор-измеритель стандартных сигналов КИСС-03 [Электронный ресурс]. – Электрон. дан. [Б. м.]: ГК Теплоприбор, 2014 – Режим доступа: <https://teplopribor.nt.ru/images/manuals/39file.pdf>, свободный. – Загл. с экрана (дата обращения 24.06.2019)

3. Логунова, О.С. Обработка экспериментальных данных на ЭВМ: учебник / О.С. Логунова, П.Ю. Романов, Е.А. Ильина и др. –М.: ИНФРА-М, 2018. -326 с.

4. Парсункин, Б.Н. Статистическое исследование и моделирование экономических и технологических процессов металлургического производства / Б.Н.Парсункин С.М. Андреев , М.В. Бушманова и др. –

Магнитогорск: изд-во Магнитогорск. гос. техн ун-та им. Г.И. Носова, 2007. -315 с.

5. Парсункин, Б.Н. Локальные стабилизирующие контура автоматического управления в АСУ ТП: монография / Б.Н. Парсункин, С.М. Андреев, О.С. Логунова. – Магнитогорск: изд-во Магнитогорск. гос. техн ун-та им. Г.И. Носова, 2012. -406 с.

## INVESTIGATION OF THE METROLOGICAL CHARACTERISTICS OF THE ELECTRONIC TEMPERATURE SENSOR KTY84/130

Kirillov A. S., Kunurbaev K. A., Bichurin E. A.

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

**Abstract.** In electronic sensors of temperature as a sensitive element semiconductor devices which have nonlinear characteristics are used. Linearization of such characteristic is made by the electronic scheme, making processing of a signal and a conclusion of values to the digital indicator. In work the research of metrological characteristics of the sensor of temperature of KTY 84/130 is conducted, nonlinearity of indications is defined, and coefficients of the linear regression equation are received. The importance of the received coefficients was 104.8 that corresponds to significance value 0.95 by Fischer's criterion.

**Keywords:** temperature sensor, metrological characteristics, experimental data processing, regression line

### REFERENCES

1. Andreev S.M. *Principy postroeniya i organizacii kompleksov tekhnicheskikh sredstv v sistemah avtomaticheskogo upravleniya* [Principles of construction and organization of technical equipment complexes in automatic control systems], , 2008. 132 p.

2. *Kalibrator-izmeritel' standarnykh signalov KISS-03* [Calibrator measuring instrument of standard signals KISS-03] Available at: <https://teplopribor.nt-rt.ru/images/manuals/39file.pdf> (accessed 24 June 2019)

3. Logunova O.S., Romanov P.Yu., Il'ina E.A. *Obrabotka eksperimental'nykh dannykh na EVM* [Processing of experimental data on a computer], Moscow, 2018, 326 p.

4. Parsunkin, B.N. *Statisticheskoye issledovaniye i modelirovaniye ekonomicheskikh i tekhnologicheskikh protsessov metallurgicheskogo proizvodstva* [Statistical research and modeling of economic and technological processes of metallurgical production]/ B.N. Parsunkin, M.V. Bushmanova, S.M. Andreyev. – Magnitogorsk: Public Educational Institution of Higher Professional Training MSTU. 2007.- pp. 315.

5. Parsunkin B.N., Andreev S.M., Logunova O.S. *Lokal'nye stabiliziruyushhie kontura avtomaticheskogo upravleniya v ASU TP* [Local stabilizing circuits of automatic control in the automated process control system], Magnitogorsk, 2012, 406 p.

Кириллов, А.С. Исследование метрологических характеристик электронного датчика температуры КТУ84/130 / А.С. Кириллов, К.А. Кунурбаев, Е.А. Бичурин // Автоматизированные технологии и производства. 2019. №1(19). С.25-28.

Kirillov A. S., Kunurbaev K. A., Bichurin E. A. Investigation of the metrological characteristics of the electronic temperature sensor KTY84/130. *Avtomatizirovannye tehnologii i proizvodstva* [Automation of technologies and production], 2019, no.1(19), pp.25-28. (In Russian)

УДК 65.011.56

## ОБЗОР СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРОЙ В МЕТОДИЧЕСКИХ ПЕЧАХ

Ю.С. Толстова, В.А. Газизова, Е.Ю. Мухина

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

jt\_tolstova@mail.ru

**Аннотация.** В статье рассматриваются системы управления температурой в методических печах в разных странах. Очень важно добиться точного контроля данного параметра, так как от температуры в методической печи зависит весь дальнейший процесс прокатного передела, в том числе качество выпускаемой продукции, именно поэтому данная тема является актуальной.

**Ключевые слова:** температура, печь, расход, система управления.

### ВВЕДЕНИЕ<sup>©</sup>

Системы автоматического управления (САУ) методическими печами обеспечивают качественный процесс нагрева металла, позволяют экономично вести расход топлива, а также обеспечивают безопасность работы и предотвращение аварий [1].

От температуры напрямую зависит качество металла, поэтому данный параметр является одним из основных контролируемых и регулируемых параметров в печи.

Температурный режим в зонах горения методической печи зависит от толщины заготовок, марки стали, температуры металла на выходе из печи. При изменении этих параметров система управления должна менять температуру в зонах печи для поддержания заданного значения.

На данный момент времени существуют различные САУ температурой в методических печах. Помимо поддержания заданных температур каждая из них направлена на улучшение качества нагрева металла.

Рассмотрим несколько систем управления температурой в нагревательных печах в разных странах.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Принцип автоматизации, применяемый в нагревательных печах SACILOR чугунолитейного завода в Хаянге (Лотарингия, Франция).

Разработанная на данном заводе модель рассчитывает необходимый тепловой поток и оптимизирует его распределение между зонами нагрева. Прямые измерения в каждой из зон позволяют с точностью оценить изменения температуры и рассчитать тепловой баланс. При этом существует возможность введения поправок, компенсирующих небольшие изменения температуры и рассчитывая при этом погрешности измерения. При значительных нежелательных изменениях температуры система подает сигнал тревоги.

Можно выделить следующие преимущества данной системы:

1. Оптимизация расхода топлива, следовательно, улучшение тепловой производительности печи.

2. Экспериментальная оценка передаточной функции позволяет достичь быстрого ввода в эксплуатацию оборудования с оптимальными характеристиками

3. Система может в любой момент включить в качестве дополнительных исправлений экспериментальные или расчетные данные. Конструкция этой системы управления не нуждается в вычислениях в реальном времени, что позволяет заметно уменьшить размер расчетов [2].

На Череповецком металлургическом комбинате (Россия) была выработана такая система управления температурой в нагревательной печи, при которой изменения размеров слябов, поступающих в печь, не влияют на точность измерения температуры.

В данной системе температуру измеряют с помощью оптических пирометров излучения, при этом положение сляба в печи может не соответствовать положению датчика измерения температуры. В некоторых случаях измерения были сделаны вне диапазона плиты, то есть пирометры измеряли температуру балок, очага или других элементов. Для того, чтобы избежать данных погрешностей была выработана система определения фактического положения сляба в печи. В результате среднеквадратичная ошибка измерения температуры сляба снизилась с 7 до 3 °С.

Первоначально точка контроля температуры для зоны нагрева была рассчитана с учетом номинальной производительности печи. Однако, когда ширина сляба изменялась (особенно при отклонениях на 30 мм и более), соответствующее изменение производительности печи не было определено достаточно точно, поэтому операторы должны были переходить с автоматического на ручное управление нагревом печи [3].

В новой системе управления была разработана формула для расчета температурного контроля, которая включала в зависимость средневзвешенную толщину слябов, поступающих в предварительную зону нагрева. Включение этого параметра позволило использовать автоматический режим нагрева печи, даже когда разница в толщине слябов в последовательных партиях достигает 100 мм.

Использование данной САУ обеспечило непрерывный нагрев слябов до указанных температур с минимальной погрешностью.

Система управления, выработанная в нагревательных печах Белорусского металлургического завода, позволяет уменьшить количество газа, расходуемого на нагрев заготовки и потери тепла в металле из-за его окисления в высокотемпературной атмосфере печей.

В данной САУ температура нагревательной печи управляется в соответствии с распределением дымовых газов над зонами печи. Система определяет температуру каждой зоны печи в соответствии с ее мощностью и расходом рабочего газа и поддерживает заданное значение. Если температура в зоне повышается, то происходит перераспределение расхода сгоревшего газа по зонам печи. Таким образом, система обеспечивает не только экономию ресурсов, но и качественный нагрев заготовок, т.к. слябы нагреваются равномерно во всех зонах печи.

Важно отметить, что печь может работать в этих режимах только с использованием горелок, мощность которых может варьироваться в широких пределах, поскольку расход газа в методической зоне печи, работающей в указанных режимах, значительно меньше, чем в другие зоны.

В качестве достоинства отметим, что в рассматриваемой системе управления учитывается значительное увеличение расстояния между заготовками (более 100 мм). Этот фактор важно учитывать, т.к. увеличение расстояния между заготовками приводит к увеличению разности температур в поперечном сечении заготовки, что увеличивает вероятность его термической деформации. В созданной САУ эта разница меньше на 20–30 °С [4].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Каждая из рассмотренных САУ позволяет обеспечить эффективный нагрев металла в методических печах, учитывая различные факторы, влияющие на сложный технологический процесс нагрева заготовок. Эти системы направлены на уменьшение погрешностей при управлении температурой, тем самым увеличивая качество выпускаемых из печи слябов, а также уменьшение расхода топлива в печи в целях экономии.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Парсункин Б.Н. Оптимизация управления процессом сжигания топлива в промышленных печах с использованием принципа нечеткой логики / Б.Н. Парсункин, С.М. Андреев, Е.Ю. Мухина, Т.У. Ахметов // Научное обозрение. 2014. №1. С.97-102
2. Graas, A. Automation of control for steel re-heating furnaces in variable production rates / A. Graas, J. P. Schmit, Bensoussan A., Lions J.L. // Analysis and Optimization of Systems. Lecture Notes in Control and Information Sciences. – 2006. – Vol. 44.
3. Самарина, И.Г. Разработка структуры нейросетевой математической модели процесса отжига полосы в протяжной печи / И.Г. Самарина, Е.Ю. Мухина, С.М. Андреев // Автоматизированные технологии и производства. 2015. № 2 (8). С. 9-13.
4. German, M. L. Optimization of temperature regimes of walking-beam heating furnaces / M. L. German // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2006. Vol. 79, №4. P. 736-740.
5. Андреев, С.М. Оптимизация режимов управления нагревом заготовок в печах проходного типа: монография. / С.М. Андреев, Б.Н. Парсункин. -Магнитогорск: изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова. 2013. 376 с.
6. Андреев, С.М. Система оптимального управления тепловым режимом промышленных печей / С.М. Андреев, Б.Н. Парсункин // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2013. №2. С.18-29.

## THE REVIEW OF CONTROL SYSTEMS OF TEMPERATURE IN METHODOLOGICAL FURNACES

Yu.S. Tolstova, V.A. Gazizova, E.Yu. Mukhina

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

**Abstract.** In article control systems of temperature in methodical furnaces in the different countries are considered. It is very important to achieve exact control of this parameter as in the methodical furnace all further process of rolling repartition, including quality of products for this reason this subject is relevant depends on temperature.

**Keywords:** temperature, furnace, expense, control system.

## REFERENCES

1. Parsunkin B.N., S.M. Andreyev S.M., Mukhina. E.Yu., Akhmetov. T.U. Optimization of fuel combustion control in industrial furnaces using the fuzzy logic principle [Optimizatsiya upravleniya protsessom szhiganiya topliva v promyshlennykh

pechakh s ispolzovaniyem printsipa nechetkoy logiki], *Nauchnoye obozreniye [Scientific Review]*, 2014, no.1, pp. 97-102.

2. Graas, A. Schmit J. P., Bensoussan A., Lions J.L. Automation of control for steel re-heating furnaces in variable production rates, Analysis and Optimization of Systems. Lecture Notes in Control and Information Sciences, 2006, 44 p.

---

3. Samarina I.G., Mukhina E.Yu., Andreev S.M. The development of structural neural network mathematical model of the process of annealing strip in lingering furnace [*Razrabotka struktury neyrosetevoy matematicheskoy modeli protsessa otzhiga polosy v protyazhnoy pechi*], *Avtomatizirovannye tehnologii i proizvodstva* [The automated technologies and productions], 2015, no. 2, pp. 9-13.

4. German, M. L. Optimization of temperature regimes of walking-beam heating furnaces, *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2006, no.4, pp. 736-740.

5. Andreev S.M., Parsunkin B.N. *Optimizaciya rezhimov upravleniya nagrevom zagotovok v pechah prohodnogo tipa* [Optimization of control modes for heating billets in continuous type furnaces], Magnitogorsk, 2013, 376 p.

6. Andreev S.M., Parsunkin B.N. Optimal control system of industrial furnace thermal rate, *Mashinostroenie: setevoy elektronnyj nauchnyj zhurnal* [Russian Internet Journal of Industrial Engineering], 2013, no. 2, pp.18-29.

---

Толстова, Ю.С. Обзор систем управления температурой в методических печах / Ю.С. Толстова, В.А. Газизова, Е.Ю. Мухина // *Автоматизированные технологии и производства*. 2019. №1(19). С.29-31.

Tolstova Yu.S., Gazizova V.A., Mukhina E.Yu. The review of control systems of temperature in methodical furnaces. *Avtomatizirovannye tehnologii i proizvodstva* [Automation of technologies and production], 2019, no.1(19), pp.29-31. (In Russian)

