



ISSN 1991-8542 (Print)

ISSN 2712-8938 (Online)

ВЕСТНИК
САМАРСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО
УНИВЕРСИТЕТА

Серия
«ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ»

Т. 31, № 1 – 2023

ISSN 1991-8542 (Print)

ISSN 2712-8938 (Online)

Вестник Самарского Государственного Технического Университета

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

Издается с августа 1993 г.

Выходит 4 раза в год

Серия

«ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ»

2023. Том 31. № 1

Учредитель – ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»

Главный редактор Ю.Э. Плешивцева (д.т.н., проф.)

Отв. секретарь серии О.С. Афанасьева (к.т.н.)

Редакционная коллегия:

А.М. Абакумов (д.т.н., проф.)

В.И. Батищев (д.т.н., проф.)

С.Ю. Боровик (д.т.н., проф.)

Ю.В. Зубков (д.т.н., проф.)

Л.С. Казаринов (д.т.н., проф.)

Ю.Б. Казаков (д.т.н., проф.)

О.С. Колосов (д.т.н., проф.)

П.К. Кузнецов (д.т.н., проф.)

В.И. Лачин (д.т.н., проф.)

М.Ю. Лившиц (д.т.н., проф.)

С.П. Орлов (д.т.н., проф.)

Л.Д. Певзнер (д.т.н., проф.)

Э.Я. Рапопорт (д.т.н., проф.)

А.В. Стариков (д.т.н., проф.)

Е. Вааке (проф., Германия)

S. Luri (проф., Италия)

В. Nаске (проф., Германия)

М. Forzan (проф., Италия)

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

Вестник Самарского государственного технического университета
Серия «Технические науки» (2023. Том 31. № 1)

Учредитель – ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»
443100, Самарская область, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Редактор Г.В. Загребина
Компьютерная верстка О.С. Афанасьева

Свидетельство о регистрации
ПИ №ФС 77-64449 от 31.12.2015.
Федеральная служба по надзору
в сфере связи информационных
технологий и массовых
коммуникаций

Адрес редакции и издателя:
ФГБОУ ВО «Самарский
государственный
технический университет»
443100, Самарская область,
г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Телефон: (846) 337 04 43
E-mail: vest_teh@samgtu.ru
Факс: (846) 278 44 40

Подписано в печать 15.05.23
Выход в свет 30.05.23

Формат 70 × 108 ¹/₁₆.
Усл. печ. л. 20,20 п.л.
Уч.-изд. л. 19,73 п.л.
Тираж 500 экз. Рег. № 8/23
Заказ № 204

Отпечатано в типографии Самарского
государственного технического университета
Адрес типографии:
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244.
Корпус 8

Журнал включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ).

Журнал включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук по следующим группам научных специальностей: 2.3 – Информационные технологии и коммуникации; 2.2 – Электроника, фотоника, приборостроение и связь; 2.4 – Энергетика и электротехника. Полнотекстовый доступ к статьям журнала осуществляется на сайте научной электронной библиотеки eLIBRARY.RU (<http://elibrary.ru>) и на сайте <https://journals.eco-vector.com/1991-8542/>

Подписной индекс в каталоге «Роспечать» 18106
ISSN 1991-8542

© Авторы, 2023
© Самарский государственный
технический университет, 2023

Цена свободная

ISSN 1991-8542 (Print)

ISSN 2712-8938 (Online)

Vestnik of
Samara
State
Technical
University

SCIENTIFIC JOURNAL

Published since August 1993

Four Issues a Year

Technical Sciences Series

2023. Vol. 31. Issue 1

Founder – Samara State Technical University

Editor-in-Chief Y.E. Pleshivtseva (Dr. Techn. Sci., Prof.)

Execute Secretary O.S. Afanaseva (PhD Techn.)

Editorial board

A.M. Abakumov (Dr. Techn. Sci., Prof.)

E. Baake (Prof. Leibniz University of Hannover, Germany)

V.I. Batishchev (Dr. Techn. Sci., Prof.)

S.Y. Borovik (Dr. Techn. Sci., Prof.)

M. Forzan (Prof., University of Padua, Italy)

L.S. Kazarinov (Dr. Techn. Sci.)

Yu.B. Kazakov (Dr. Techn. Sci., Prof.)

O.S. Kolosov (Dr. Techn. Sci., Prof.)

P.K. Kuznetsov P. K. (Dr. Techn. Sci., Prof.)

V.I. Lachin (Dr. Techn. Sci., Prof.)

M.Y. Livshits (Dr. Techn. Sci., Prof.)

S. Lupi (Prof., University of Padua, Italy)

B. Nacke (Prof., Leibniz University of Hannover, Germany)

S.P. Orlov (Dr. Techn. Sci., Prof.)

L.D. Pevzner (Dr. Techn. Sci., Prof.)

E.Y. Rapoport (Dr. Techn. Sci., Prof.)

A.V. Starikov (Dr. Techn. Sci., Prof.)

Yu.V. Zubkov (Dr. Techn. Sci., Prof.)

Edited by G. V. Zagrebina
Compiled and typeset by O. S. Afanaseva

The Editorial Board Address:

Samara State Technical University

244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

Phone: +7(846) 337 04 43

E-mail: vest_teh@samgtu.ru

Printed at the Samara State Technical University Press

The journal is included in the Russian Science Citation Index.

The journal is included in VINITI (<http://www.viniti.ru>) abstracts databases.

The full-text electronic version of journal is hosted by the web-site of scientific electronic library eLIBRARY.RU
and by the site SamGTU (<http://vestnik-teh.samgtu.ru>)
and by the site <https://journals.eco-vector.com/1991-8542/>

The subscription index in Rospechat catalogue 18106

ISSN 1991-8542

СОДЕРЖАНИЕ

Информационные технологии и коммуникации

<i>Бочкарева И.С., Тычинина Ю.А., Тычинин А.В.</i> Синтез системы управления по возмущению объектом с распределенными параметрами	6
<i>Данилушкин И.А., Колпацников С.А., Левин И.С.</i> Численно-аналитическая модель температуры металла барабана парового котла	21
<i>Лысов В.Е., Поляков В.А.</i> Анализ влияния периода дискретности экстраполятора нулевого порядка цифровой системы автоматического управления на динамические показатели качества управления	34
<i>Пешкин К.С.</i> Назначение и перспективы развития киберфизических систем управления технологическими процессами	47

Энергетика и электротехника

<i>Абакумов А.М., Горячкин А.А., Овсянников В.Н.</i> Математические модели и структуры системы стабилизации поперечной устойчивости автомобиля	60
<i>Данилушкин А.И., Колпаков Д.В., Штукатуров Н.Р.</i> Индукционная система для подогрева крупногабаритных колец перед раскаткой	76
<i>Кочкин В.Д., Алиферов А.И., Золотарев В.В.</i> Методы и установки утилизации мелкодисперсных отсевов ферросплавов	91
<i>Стариков А.В., Костюков В.Д.</i> Анализ работы электромагнитных подшипников при смещении центра магнитной системы относительно оси вращения и вариации напряжения питания	103

Информационные технологии и коммуникации

УДК 681.5

СИНТЕЗ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПО ВОЗМУЩЕНИЮ ОБЪЕКТОМ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

И.С. Бочкарева¹, Ю.А. Тычинина¹, А.В. Тычинин²

¹ Самарский государственный технический университет

Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

² ЗАО «ТМ-Сервис»

Россия, 443029, г. Самара, 6-я просека, 157

E-mail: ytychinina@list.ru

Аннотация. Рассматривается синтез автоматической системы управления для поддержания температуры нефтепродуктов при хранении в резервуарах. Предложен подход к построению системы, исключающий недостатки существующих методов обогрева емкостей. Система управления строится на основе принципа управления по возмущению. Объектом управления является слой утеплителя резервуара, рассматриваемый как объект с распределенными параметрами, что позволяет учитывать высокую инерционность объекта. Неравномерность распределения температуры учитывается только по толщине слоя теплоизоляции; таким образом, при моделировании объекта управления использовалось линейное одномерное уравнение теплопроводности, дополненное начальными и граничными условиями третьего рода.

Для обеспечения инвариантности к возмущающему воздействию в виде отрицательной температуры окружающей среды строится компенсационный элемент с применением метода периодических структур. С помощью компенсационного элемента в зависимости от текущей температуры окружающей среды вычисляется требуемая динамика мощности нагрева греющего кабеля для компенсации теплопотерь. В результате получена быстродействующая система, позволяющая поддерживать температуру среды в резервуаре с высокой точностью. В работе также приводится исследование влияния параметров периодической структуры на качество работы алгоритма управления.

Ключевые слова: электрообогрев резервуаров, резистивный греющий кабель постоянного нагрева, система поддержания температуры резервуара, объект с распределенными параметрами, граничные условия 3-го рода, система управления по возмущению, компенсационный элемент, обратная передаточная функция объекта управления, периодические структуры.

¹ Ирина Сергеевна Бочкарева, аспирант кафедры автоматики и управления в технических системах.

¹ Юлия Александровна Тычинина, кандидат технических наук, доцент кафедры автоматики и управления в технических системах

² Александр Викторович Тычинин, кандидат технических наук, начальник отдела разработки АСУ ТП.

Введение

На объектах подготовки нефти зачастую требуется поддержание температуры продукта в требуемых технологических пределах. Основной проблемой в этой задаче являются тепловые потери сквозь стенки трубопроводов и резервуаров. Данная проблема усугубляется при минусовых значениях температуры окружающей среды, когда даже применение утеплителей не способно существенно повлиять на процесс охлаждения нефти. Как показывает практика, падение температуры окружающей среды до $-2 - -5$ °С приводит к быстрому охлаждению стенки резервуара, несмотря на наличие слоя теплоизоляции толщиной 100 мм, в течение достаточно короткого времени. Для решения проблемы в современных производствах прибегают к использованию систем электрического обогрева.

Самый бюджетный вариант системы электрообогрева реализуется с применением релейной системы управления резистивным греющим кабелем с обратной связью по датчику температуры, установленному на поверхности стенки резервуара. Такой кабель выбирается с учетом минимально возможной температуры окружающей среды. Таким образом, в случае, когда температура воздуха держится около нуля или принимает небольшое отрицательное значение, резистивный греющий кабель с релейным управлением будет работать на полную мощность, рассчитанную, например, на температуру окружающей среды -40 °С, что потребует высокого уровня энергопотребления и частого срабатывания пусковой аппаратуры.

Другой вариант реализации системы электрообогрева подразумевает применение вместо резистивных греющих кабелей саморегулирующихся, которые способны изменять мощность тепловыделения в зависимости от температуры своей поверхности. Изменение мощности возможно в ограниченных пределах с учетом характеристик конкретного греющего кабеля. Применение саморегулирующегося кабеля частично решает проблему излишней мощности, но его применение намного дороже. Например, как показывают расчеты, для горизонтального резервуара объемом 100 м^3 потребуется саморегулирующийся кабель типа 45BTC2-ВР общей стоимостью порядка 1 млн рублей, что существенно дороже резистивного кабеля.

Недостатком описанных выше подходов является также включение нагрева по значению датчика температуры на поверхности резервуара (или трубопровода) в момент времени, когда уже остыл утеплитель и начала остывать стенка резервуара.

В работе предполагается построить систему управления, лишенную указанных недостатков, используя в качестве нагревательного устройства дешевый резистивный кабель.

Так как самая существенная помеха в подобных системах – изменение температуры окружающей среды, то основная идея работы состоит в построении системы управления по данному виду возмущения.

Обеспечить инвариантность к возмущающему воздействию, которым является температура окружающего воздуха, возможно путем синтеза системы управления по возмущению. Применение принципа управления по возмущению для объектов с существенной инерционностью обеспечивает хорошие качественные показатели системы управления. Однако при реализации такой системы воз-

никает проблема синтеза идеального компенсационного элемента, который представляется в виде обратной передаточной функции объекта управления.

Задача нахождения обратной передаточной функции относится к классу «некорректных» и не имеет точного решения. Это связано с тем, что все реальные объекты управления обладают динамикой и возникает проблема ее компенсации и выполнения операций точного дифференцирования.

Впервые понятие некорректной задачи было сформулировано французским математиком Ж. Адамаром. Вопрос решения некорректных задач получил особенно интенсивное развитие во второй половине прошлого века. Стоит отметить существенный вклад в развитие методов решения отечественных математиков А.Н. Тихонова, М.М. Лаврентьева, В.К. Иванова и других [1–3].

Так как задача построения обратной передаточной функции объекта не имеет точного решения, то возникает принципиально важный вопрос: что понимается под «приближенным решением» такой задачи? В таком случае возникает задача поиска алгоритмов нахождения приближенных решений, обладающих свойством устойчивости.

В работах А.В. Тычина и В.К. Тяна для построения инвариантных к возмущающему воздействию систем управления предлагается применять быстродействующий контур, позволяющий «самокомпенсировать» помеху в заданное число раз. Такой контур реализуется в виде периодической структуры [4–7].

Другой важной проблемой, с которой можно столкнуться при синтезе системы управления, является моделирование объекта с распределенными параметрами (ОРП). На практике большинство объектов управления являются объектами с распределенными параметрами, и пренебрежение этим свойством может привести к существенному отличию модели от реального объекта, что неприемлемо. Принципиальной особенностью объектов с распределенными параметрами является неравномерность пространственного распределения управляемых величин.

В работах А.Г. Бутковского и Э.Я. Рапопорта изложены принципиально важные методы и результаты математического описания объектов с распределенными параметрами. Таким образом, при реализации алгоритма управления реальным технологическим процессом возникает еще одна важная проблема – получение корректного и точного математического представления объекта управления [8–10].

Постановка задачи

В работе рассмотрен процесс теплопередачи от утепленной стенки резервуара во внешнюю среду (рис. 1).

На рис. 1: $t_{\text{ср}}$ – температура окружающей среды; Г.Л. – греющая лента; Р – резервуар; УТ – утеплитель; $t_{\text{н}}$ – температура нефти; $t_{\text{ст.р.}}$ – температура стенки резервуара; $t_{\text{пов.ут.}}$ – температура поверхности утеплителя; $t_{\text{г.л.}}$ – температура греющей ленты.

Слой теплоизоляции рассматривается как объект с распределенными параметрами. В начальных условиях тепловой поток отсутствует и система находится в статичном состоянии, так как температура поверхности резервуара, температура окружающего воздуха и температура теплоизоляции равны. Далее температура воздуха начинает падать, появляется разница с температурой поверхности теплоизоляции и возникает отток тепла в окружающую среду.

Можно определить следующую последовательность решения задачи:

- моделирование объекта управления как объекта с распределенными параметрами;
- реализация компенсатора для нахождения требуемой динамики мощности нагрева греющей ленты путем получения обратной передаточной функции объекта управления методом периодических структур;
- синтез системы управления объектом с распределенными параметрами по возмущению.

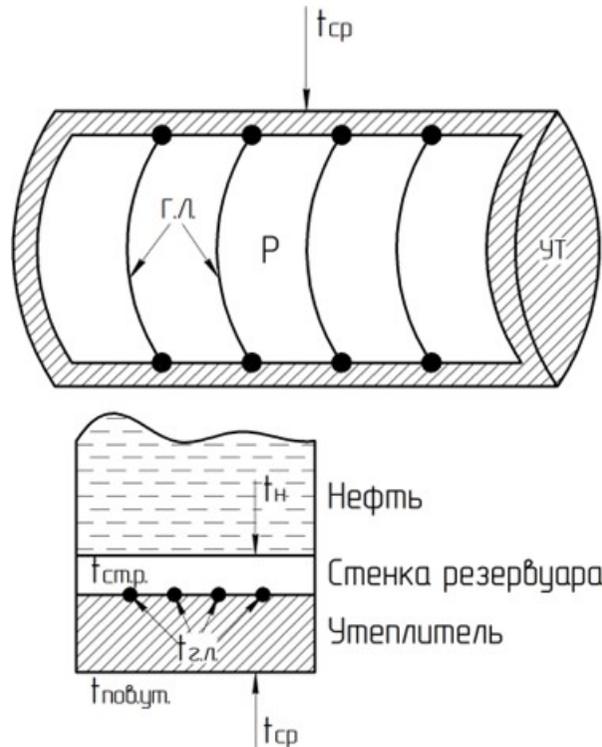


Рис. 1. Распределение тепловых потоков на объекте управления

Моделирование объекта управления

Рассматривается одномерная задача теплопередачи равномерным тепловым потоком через утеплитель, который представляется в виде бесконечной пластины; неравномерность распределения температуры учитывается только по толщине слоя теплоизоляции.

Была получена краевая задача с начальными условиями и граничными условиями третьего рода [11]:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial Q(x,t)}{\partial t} &= a \frac{\partial^2 Q(x,t)}{\partial x^2}, \quad 0 < x < R, \quad t > 0; \\
 Q(x,0) &= Q_0(x), \quad 0 \leq x \leq R, \quad t = 0; \\
 \frac{\partial Q(0,t)}{\partial t} &= 0, \quad t > 0; \\
 \lambda \frac{\partial Q(R,t)}{\partial t} + a * Q(R,t) &= a * Q_c(t), \quad t > 0,
 \end{aligned} \tag{1}$$

где $\alpha = \frac{\lambda}{cy}$ – коэффициент температуропроводности; R – толщина пластины; λ – коэффициент теплопроводности; α – коэффициент теплопередачи; $Q_c(t)$ – внешнее сосредоточенное воздействие.

Фундаментальной характеристикой краевой задачи является функция Грина, представленная в форме разложения в бесконечный ряд Фурье [11]:

$$G(\chi, \zeta, t - \tau) = \frac{1}{R} \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\eta_n}{\eta_n + \sin(\eta_n) \cos(\eta_n)} \cos\left(\frac{\chi\eta_n}{R}\right) \cos\left(\frac{\zeta\eta_n}{R}\right) \exp\left(-\frac{a\eta_n^2}{R^2}(t - \tau)\right) \right\}, \quad (2)$$

$$\eta \cdot \operatorname{tg}(\eta) - Bi = 0, \quad (3)$$

где η_n – пронумерованные в порядке возрастания корни трансцендентного уравнения (3); $Bi = \frac{\alpha R}{\lambda}$ – широко применяемый в теплофизике безразмерный критерий Био.

Переход к изображениям по Лапласу в уравнениях (1) приводит к следующему выражению для передаточной функции объекта управления:

$$W_x(\chi, p) = \frac{\tilde{Q}(\chi, p)}{\tilde{Q}_c(p)} = \frac{\alpha}{cyR} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\eta_n \cos(\eta_n)}{\eta_n + \sin(\eta_n) \cos(\eta_n)} \cos\left(\frac{\chi\eta_n}{R}\right) \frac{\frac{R^2}{a\eta_n^2}}{\frac{R^2}{a\eta_n^2} p + 1}. \quad (4)$$

Согласно (4) рассматриваемый объект управления представляется параллельным соединением бесконечного числа элементарных звеньев с независимыми от пространственных координат постоянными времени

$$T_n = \frac{R^2}{a\eta_n^2}, \quad n = 1, 2, \dots \quad (5)$$

и коэффициентами передачи, меняющимися по периодическому закону

$$K_n(x) = \frac{2R^2}{\alpha} \frac{\cos(\eta_n)}{\eta_n (\eta_n + \sin(\eta_n) \cos(\eta_n))}, \quad n = 1, 2, \dots \quad (6)$$

Так как постоянная времени и коэффициент передачи обратно пропорциональны корням трансцендентного уравнения (3), которые являются членами бесконечно возрастающего ряда, то

$$\lim_{n \rightarrow \infty} T_n = 0,$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} K_n(x) = 0.$$

Таким образом, можно ограничиться укороченной структурой, отбросив последние элементы, так как они не будут существенно влиять на точность модели объекта. При моделировании рассматриваемого объекта достаточным оказалось использование пяти аperiodических звеньев в структуре.

Расчет параметров элементарных аperiodических звеньев проводился в среде *MATLAB*. Моделирование слоя теплоизоляции проводилось в графической среде программирования *Simulink*.

Полученная структурная модель объекта с распределенными параметрами приведена на рис. 2. Такой подход позволяет структурно промоделировать объект и получить функцию изменения температуры от времени в любой точке по толщине утеплителя.

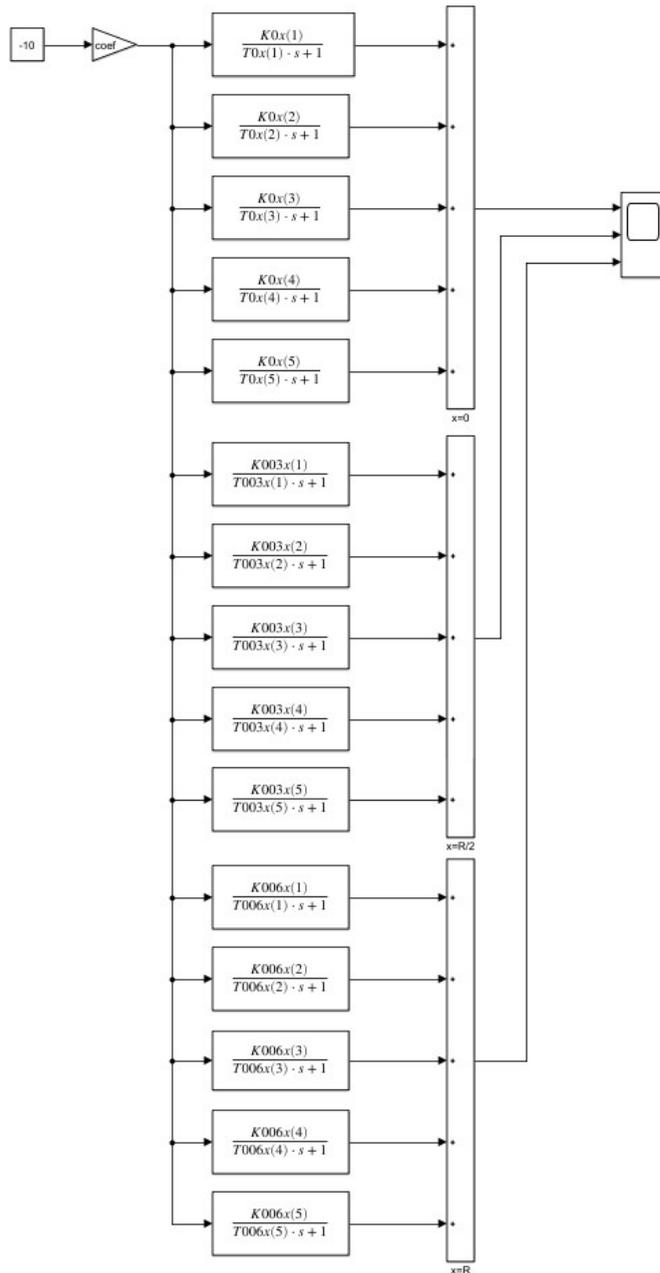


Рис. 2. Структурное представление слоя утеплителя как объекта с распределенными параметрами

Выходной величиной приведенной модели являются функции изменения температуры от времени в трех точках: поверхность теплоизоляции со стороны

окружающей среды (R); середина слоя теплоизоляции ($R/2$); поверхность утеплителя, прилегающая к стенке резервуара (0). Управляющим воздействием для представленной модели на данном этапе работы является температура воздуха, воздействующая со стороны R .

На рис. 3 приведены результаты работы синтезированной модели.

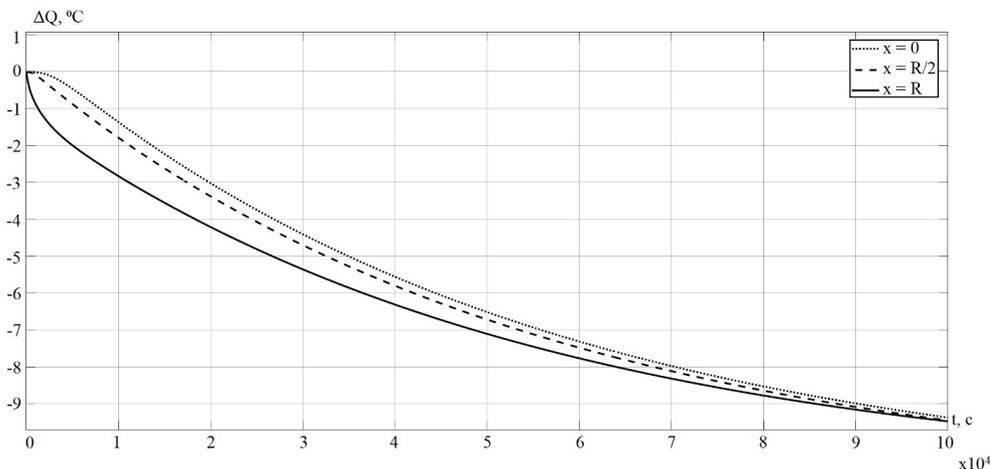


Рис. 3. Переходная характеристика объекта управления в трех точках по толщине теплоизоляции

Из рис. 3 видно, что при воздействии температуры, равной минус $10\text{ }^\circ\text{C}$, температура во всех точках по толщине объекта падает, асимптотически приближаясь к температуре окружающего воздуха.

Реализация компенсационного элемента в системе управления по возмущению

Управление по возмущению обеспечивает компенсацию влияющего на систему возмущающего воздействия, тем самым не допуская отклонения управляемой величины от требуемого значения. Реализация данного метода заключается в преобразовании помехи, приложенной к объекту управления, в компенсирующее управляющее воздействие, которое воздействует на объект с противоположным знаком по сравнению с отклонением, вызванным помехой.

При синтезе систем управления по возмущению возникает проблема реализации компенсационного элемента, который представляется в виде обратной передаточной функции объекта управления. Условие абсолютной инвариантности к возмущающему воздействию имеет вид

$$W_{\text{комп}}(p) = (W_{\text{об}}(p))^{-1}.$$

Существует практический подход получения обратной передаточной функции объекта управления для реализации компенсационного элемента, заключающийся во включении его передаточной функции в обратную связь, как показано на рис. 4.

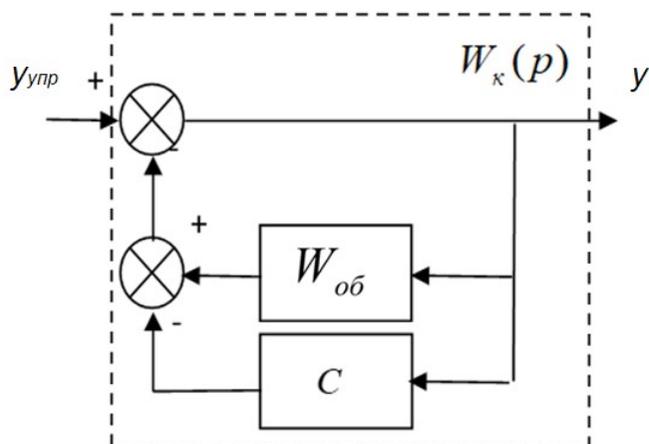


Рис. 4. Реализация компенсационного элемента методом варьирования коэффициента

При применении такого метода можно добиться реализации обратной передаточной функции с некоторой точностью путем варьирования коэффициента C в диапазоне $[0, 1)$. При увеличении коэффициента увеличивается точность реализации, но уменьшается запас устойчивости. Например, если принять C равным единице, то обратная передаточная функция реализуется с абсолютной точностью, но система будет находиться на границе устойчивости.

Требуемой точности возможно добиться путем наращивания количества последовательно включенных ячеек $W_k(p)$. Таким образом реализуется периодическая структура, в которой путем варьирования коэффициента C обеспечивается устойчивость, а при изменении количества ячеек возможно добиться высокой точности [4, 7, 12–14].

Система поддержания температуры резервуара

В работе строится система управления по возмущению, структурная схема которой изображена на рис. 5.

В приведенной на рис. 5 системе объект управления W_{oy} рассматривается как объект с распределенными параметрами (см. рис. 2). Так как слой утеплителя имеет существенную толщину и низкий коэффициент теплопроводности, следовательно, необходимо учитывать процесс теплопередачи от внешнего слоя утеплителя к внутреннему. $W_{комп}$ – периодическая структура, в которой в обратную связь включена передаточная функция утеплителя W_{oy} (см. рис. 4).

Экспериментальным путем были найдены оптимальные параметры компенсационного элемента для рассматриваемого технологического процесса. При моделировании применялась периодическая структура с тремя ячейками и коэффициентом C , равным 0,8.

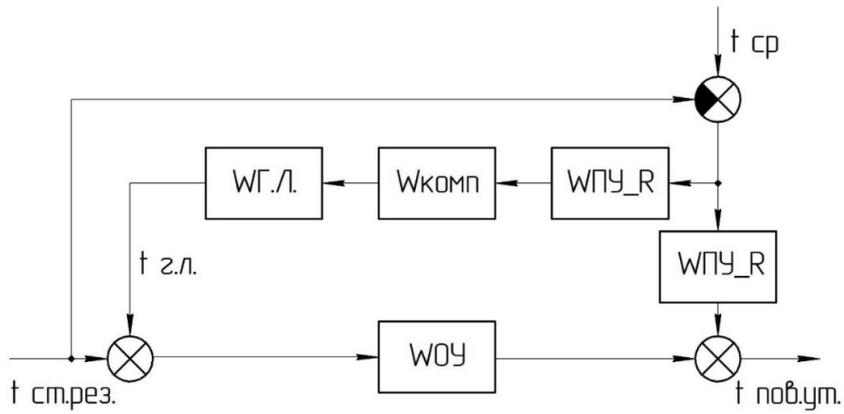


Рис. 5. Структурная схема системы компенсации тепловых потерь с поверхности резервуара: W_{OY} – передаточная функция объекта управления (слой утеплителя); $W_{ПВ_Р}$ – передаточная функция поверхности утеплителя при воздействии окружающей среды; $W_{Г.Л.}$ – передаточная функция греющей ленты; $W_{комп}$ – передаточная функция компенсационного элемента

Результаты работы модели системы представлены на рис. 6.

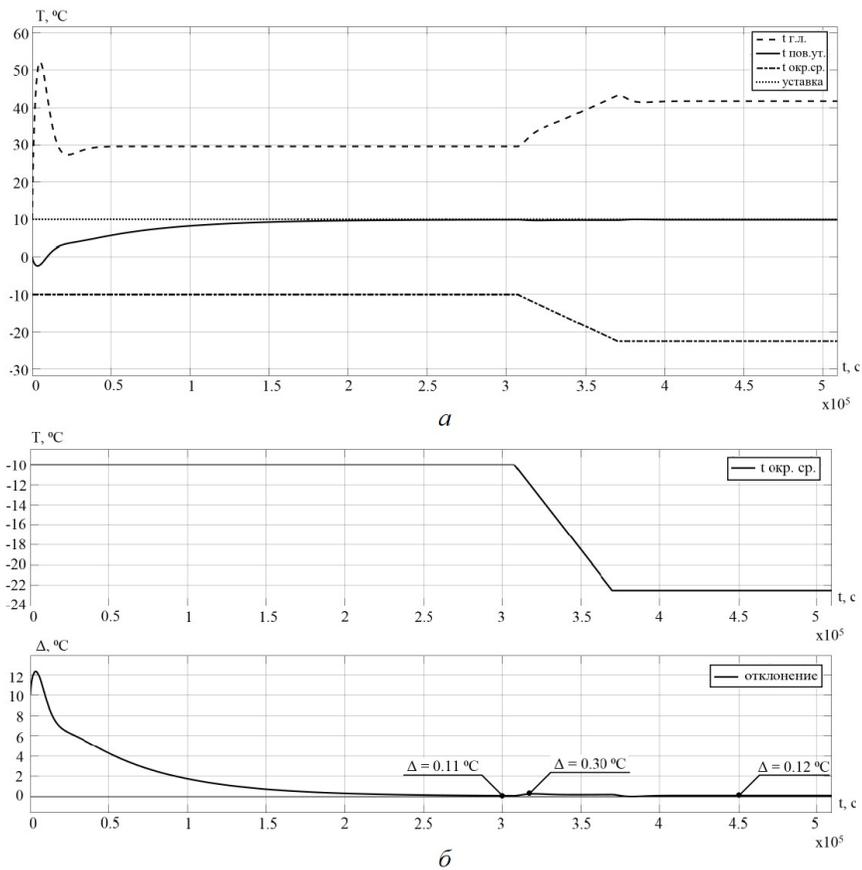


Рис. 6. Переходные характеристики системы поддержания температуры (а), график отклонения температуры поверхности утеплителя от требуемой (б)

Из рис. 6, а можно увидеть, что система незамедлительно реагирует на возмущающее воздействие: при изменении температуры воздуха в тот же момент вырабатывается управляющее воздействие, увеличивая нагрев греющего кабеля и тем самым не допуская значительных колебаний температуры поверхности утеплителя (максимальное отклонение температуры поверхности утеплителя от требуемой не превышает $0,30\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Из приведенных исследований можно сделать вывод, что поддержание температуры поверхности утеплителя в системе со структурной схемой, представленной на рис. 5, осуществляется с очень высокой точностью.

Далее приводится исследование влияния параметров периодической структуры на качество работы алгоритма управления. На рис. 7 приведены переходные характеристики и графики отклонения для систем с различными периодическими структурами.

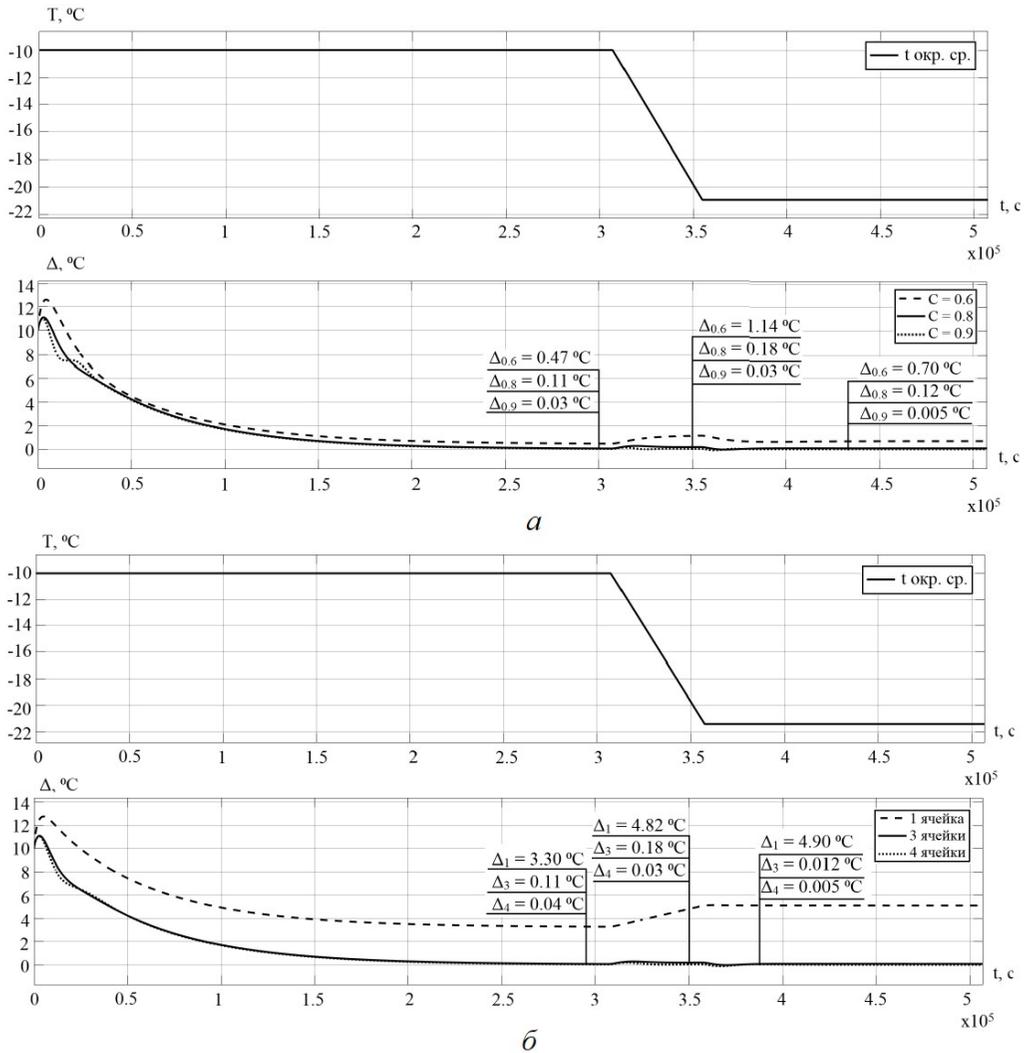


Рис. 7. График отклонения температуры поверхности утеплителя при варьировании коэффициента C в периодической структуре (а), график отклонения температуры поверхности утеплителя при варьировании количества ячеек в периодической структуре (б)

Как видно из графика отклонения, приведенного на рис. 7, а, наибольшая точность достигается при коэффициенте $C = 0,9$. Но в таком случае система приближается к границе устойчивости, а для рассматриваемого технологического процесса достаточная точность обеспечивается и при коэффициенте $C = 0,8$, поэтому дальнейшее увеличение коэффициента не имеет смысла.

Увеличение количества ячеек в структуре (рис. 7, б) также приводит к увеличению точности управления. Однако для рассматриваемого процесса применение периодической структуры с большим количеством ячеек также является избыточным, так как это приведет к нерациональной трате вычислительной мощности управляющего устройства. Для рассматриваемого технологического процесса достаточную точность обеспечивает периодическая структура с тремя ячейками.

Практическая реализация системы поддержания температуры резервуара

На рис. 8 приведена структурная схема комплекса технических средств для реализации рассмотренного метода управления.

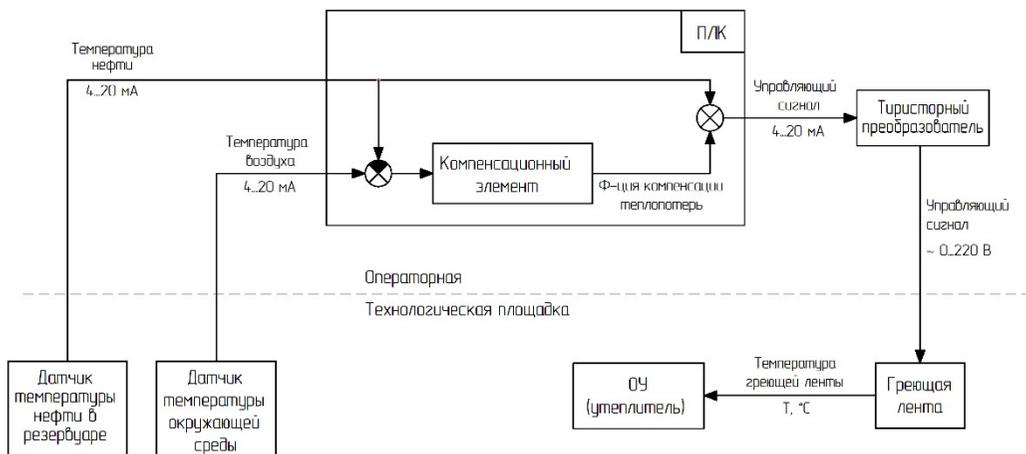


Рис. 8. Структурная схема комплекса технических средств

Для реализации системы управления применяются типовые технические средства, такие как датчики температуры, резистивный греющий кабель и тиристорный преобразователь; управляющим устройством является программируемый логический контроллер.

В начале работы программы на контроллер поступает информация с установленного в резервуаре датчика температуры о текущей температуре среды, которую в дальнейшем необходимо поддерживать. В программе ПЛК реализуется компенсационный элемент, который на основе начальной температуры среды и текущей температуры окружающего воздуха рассчитывает требуемую функцию динамики мощности нагрева греющего кабеля и вырабатывает управляющее воздействие, меняющее мощность нагрева греющего кабеля.

Далее управляющий сигнал поступает с ПЛК на тиристорный преобразователь. При помощи преобразователя изменяется питающее напряжение греющего кабеля, тем самым меняется его тепловыделение. Таким образом, при использо-

вании аналогового управления мощностью кабеля возможно поддерживать температуру резервуара с высокой точностью.

Выводы

В работе построена структурная модель объекта управления, представленного в виде слоя теплоизоляции как объекта с распределенными параметрами, что позволяет учитывать динамику объекта управления. По полученной переходной характеристике в точке у стенки резервуара при применении метода периодических структур определена функция компенсации теплотерьер, которая является требуемой динамикой мощности нагрева ленты. Применение такого метода обеспечивает высокую точность и быстродействие работы системы. Таким образом, была реализована система, инвариантная к возмущающему воздействию в виде изменения температуры воздуха.

Применение предлагаемого метода на практике исключает недостатки классических методов, применяемых для обогрева резервуаров, такие как низкая точность при использовании резистивного греющего кабеля и высокая стоимость при применении саморегулирующего греющего кабеля, так как для обогрева применяется дешевый греющий кабель постоянного нагрева, а аналоговый алгоритм управления позволяет реализовать поддержание температуры с высокой точностью.

Основным недостатком рассматриваемого метода является необходимость определения передаточной функции ОРП и ее применения в построении компенсационного регулятора.

Предлагаемый подход является экономически эффективным в задачах поддержания температуры стенки резервуара.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Крутько П.Д.* Обратные задачи динамики в теории автоматического управления. М.: Машиностроение, 2004. 576 с.
2. *Тихонов А.Н., Арсенин В.Я.* Методы решения некорректных задач. Изд. 2-е. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1979.
3. *Тихонов А.Н., Гончаровский А.В.* Некорректные задачи естествознания. МГУ, 1987.
4. *Тычинин А.В.* Структурно-параметрический синтез системы граничного управления объектом с распределенными параметрами методами обратной динамики: Дис. ... канд. техн. наук. Самарский государственный технический университет, 2008.
5. *Тычинин А.В.* Применение периодических структур при синтезе систем автоматического управления с заданной передаточной функцией // Наука. Технологии. Инновации: Материалы докладов Всероссийской научной конференции молодых ученых в 6 частях. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. Ч. 2. С. 37–38.
6. *Тян В.К.* Синтез систем управления с заданной инвариантностью к возмущающим воздействиям // Алгоритмическое и техническое обеспечение в системах управления технологическими процессами: сб. научн. трудов. Самара, 1991.
7. *Тян В.К.* Теория и методы синтеза многомерных систем автоматического управления с динамическим компенсатором в форме периодических структур обратных операторов: дис. ... д-ра техн. наук. Самарский государственный технический университет, 2008.
8. *Бутковский А.Г.* Структурная теория распределенных систем. М.: Наука, 1977.
9. *Бутковский А.Г.* Характеристики систем с распределенными параметрами. М., 1979.
10. *Рапопорт Э.Я.* Оптимальное управление системами с распределенными параметрами. М.: Высшая школа, 2009. 676 с.
11. *Рапопорт Э.Я.* Структурное моделирование объектов и систем управления с распределенными параметрами. М.: Высшая школа, 2003.

12. *Бочкарева И.С.* Структурное моделирование в задачах построения регулятора для управления процессами подготовки нефти // Дни науки – 2021: 76-я научно-техническая конференция обучающихся СамГТУ: сб. тезисов докл. Самара: СамГТУ, 2021. С. 5–7.
13. *Бочкарева И.С.* Решение задачи компенсации тепловых потерь с поверхности резервуара методом периодических структур // Дни науки – 2022: 77-я научно-техническая конференция обучающихся СамГТУ: сб. тезисов докл. Самара: СамГТУ, 2022. С. 5–6.
14. *Бочкарева И.С., Тычинина Ю.А.* Решение задачи компенсации тепловых потерь с поверхности резервуара перевалочной железнодорожной нефтебазы // Естественные и технические науки: Тезисы докладов XLVIII Самарской областной студенческой научной конференции. Самара, 2022. С. 400–401.

Статья поступила в редакцию 07 сентября 2022 г.

SYNTHESIS OF A FEEDFORWARD CONTROL SYSTEM FOR OBJECT WITH DISTRIBUTED PARAMETERS

I.S. Bochkareva¹, Yu.A. Tychinina¹, A.V. Tychinin²

¹Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya str., Samara, 443100, Russian Federation
2«TM-service»
157, 6th proseka, Samara, 443029, Russian Federation

E-mail: ytychinina@list.ru

Abstract. *This study is researching a synthesis of an automatic control system for maintaining the temperature of petroleum products during storage in tanks. A new approach for the system construction has been developed during this research. It helps to get rid of disadvantages of existing methods of heating tanks. Developed control system is built on the basis of the feedforward control principle. The object of control is the tank insulation layer, considered as an object with distributed parameters, which provides opportunity to take into account the high inertia of the object. The uneven distribution of temperature is taken into account only over the thickness of the thermal insulation layer, thus, when modeling the control object, a linear one-dimensional heat conduction equation was used, supplemented by initial and boundary conditions of the third kind.*

To ensure invariance to a disturbing effect in the form of a negative ambient temperature, a compensation element is built using the method of periodic structures. The required heating power dynamics of the heating cable is calculated to compensate for heat losses by the compensation element, depending on the current ambient temperature. Result of this study is a high-performance system that allows maintaining the high precision temperature of the oil in the tank. The article also provides research of the periodic structure parameters impact on the quality of the control algorithm.

Keywords: *electrical heat tracing of tanks, resistance heating cable with constant heating, tank temperature maintenance system, object with distributed parameter, boundary conditions 3 type, feedforward control system, compensation element, object inverse transfer function, periodic structures*

REFERENCES

1. *Krut'ko P.D.* Inverse problems of dynamics in the theory of automatic control [Obratnye zadachi dinamiki v teorii upravleniya] // M.: Mashinostroenie, 2004. T. 576. (In Russian).
2. *Tikhonov A.N., Arsenin V.Ya.* Methods for Solving Ill-Posed Problems [Metody recheniya nekorrektnykh zadach]. M.: Nauka, 1979. (In Russian).
3. *Tikhonov A.N., Goncharovskiy A.V.* Ill-posed problems of natural science [Nekorrektnye zadachi estestvoznaniya]. MSU, 1987. (In Russian).
4. *Tychinin A.V.* Strukturno-parametricheskii sintez sistemy granichnogo upravleniya ob'ektom s raspredelennymi parametrami metodami obratnoy dinamiki: diss. Samara, Samara State Technical University, 2008. (In Russian).
5. *Tychinin A.V.* Application of periodic structures in the synthesis of automatic control systems with a given transfer function. *Nauka, Technologii. Innovatsii* // materials of reports of the All-Russian scientific conference of young scientists in 6 parts. Novosibirsk, NSTU, 2003. Vol. 2. Pp. 37–38. (In Russian).

¹ *Irina S. Bochkareva, Postgraduate Student.*

¹ *Yuliya A. Tychinina (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.*

² *Aleksandr V. Tychinin (Ph.D. (Techn.)), Head of Department.*

6. *Tyan V.K.* Synthesis of control systems with a given invariance to disturbing influences // In the collection of scientific papers «Algoritmicheskoe i tekhnicheskoe obespechenie v sistemakh upravleniya tekhnologicheskimi protsessami», Samara, 1991. (In Russian).
7. *Tyan V.K.* Teoriya i metody sinteza mnogomernykh sistem avtomaticheskogo upravleniya s dinamicheskim kompensatorom v forme periodicheskikh struktur obratnykh operatorov: diss. Samara, Samara State Technical University, 2008. (In Russian).
8. *Butkovskiy A.G.* Structural theory of distributed systems [Strukturnaya teoriya raspredelennykh sistem]. M.: Nauka, 1977. (In Russian).
9. *Butkovskiy A.G.* Characteristics of systems with distributed parameters [Kharakteristiki sistem s raspredelennymi parametrami]. M.: Nauka, 1979. 224 pp. (In Russian).
10. *Rapoport E.Ya.* Optimal control of systems with distributed parameters [Optimal'noe upravlenie sistemami s raspredelennymi parametrami]. M.: Vysh. shk., 2009. 676 pp. (In Russian).
11. *Rapoport E.Ya.* Structural modeling of objects and control systems with distributed parameters [Strukturnoe modelirovanie ob"ektov i sistem upravleniya s raspredelennymi parametrami]. M.: Vysh. shk., 2003. 299 p. (In Russian).
12. *Bochkareva I.S.* Structural Modeling in the Problems of Building a Regulator for Controlling Oil Treatment Processes // Dni nauki – 2021. 76-ya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya obuchayushchikhsya SamGTU: collection of abstracts of reports. Samara: Samara State Technical University, 2021. Pp. 5–7. (In Russian).
13. *Bochkareva I.S.* Solving the problem of compensation for heat losses from the surface of the tank by the method of periodic structures // Dni nauki – 2022. 77-ya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya obuchayushchikhsya SamGTU: collection of abstracts of reports. Samara: Samara State Technical University, 2022. Pp 5–6. (In Russian).
14. *Bochkareva I.S., Tychinina Yu.A.* Solving the problem of compensating heat losses from the surface of the tank of a transshipment railway tank farm // Tezisy dokladov XLVIII Samarskoy oblastnoy studencheskoy nauchnoy konferentsii: collection of abstracts of reports. Samara, 2022. Pp. 400–401. (In Russian).

УДК 517.958

**ЧИСЛЕННО-АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕМПЕРАТУРЫ
МЕТАЛЛА БАРАБАНА ПАРОВОГО КОТЛА*****И.А. Данилушкин, С.А. Колпащиков, И.С. Левин****Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: idanilushkin@mail.ru, skolpaschikov@mail.ru, Levin.is@samgtu.ru

Аннотация. Решена задача разработки и идентификации модели температурного распределения стенки барабана парового котла. Численная модель базируется на аналитическом решении одномерного уравнения теплопроводности с теплообменом на границах при постоянных коэффициентах теплопередачи. Модель реализована в пакете моделирования динамических систем. С помощью ограниченного ряда собственных функций аналитического решения получено представление объекта в пространстве состояний. Предложен универсальный алгоритм расчёта собственных чисел аналитического решения. Исследованы зависимости собственных чисел аналитического решения от значений коэффициентов теплопередачи и теплопроводности. По результатам исследования получены таблицы данных для аппроксимации зависимостей собственных чисел от коэффициентов теплопередачи в ограниченном диапазоне изменений. Опробована методика реализации динамической модели температурного распределения, учитывающей изменения коэффициентов теплопередачи в процессе моделирования. Момент изменения коэффициентов воспринимается как начало нового переходного процесса из текущего состояния модели. Представлены структурные схемы реализации модели в пакетах моделирования динамических систем. Предложенные структуры позволяют реализовать внесение параметрических возмущений в момент их возникновения при моделировании. По экспериментальным данным растопки парового котла проведена идентификация зависимости коэффициента теплопередачи от температуры металла стенки барабана котла. Полученные результаты показали, что на коэффициенты теплопередачи влияет не только температура металла, но и дополнительные параметры эксплуатации парового котла. В результате экспериментов обнаружено, что точность модели может быть повышена, если учесть зависимость коэффициента теплопередачи на внутренней поверхности барабана от расхода питательной воды в барабан котла. Приведены результаты численного эксперимента.

* Иван Александрович Данилушкин, кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизации и управления в технических системах.

Сергей Александрович Колпащиков, кандидат технических наук, заведующий кафедрой автоматизации и управления в технических системах.

Илья Сергеевич Левин, кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизации и управления в технических системах.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00521, <https://rscf.ru/project/23-29-00521/>, ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет».

***Ключевые слова:** уравнение теплопроводности, переменные коэффициенты, коэффициент теплопередачи, температурное распределение, объект с распределенными параметрами, численно-аналитическое решение, пространство состояний.*

Введение

Барабаны паровых котлов высокого давления с рабочим давлением более 10 МПа представляют собой горизонтально расположенный цилиндр диаметром до 1800 мм, изготовленный из листовой легированной стали толщиной 90 мм и более. Регламент растопки котлов ограничивает перепад температур верхней образующей и нижней образующей барабана, перепад температур насыщения пара и стенки барабана, а также максимальную скорость роста температуры стенки [1]. Перепад и скорость роста температур в контрольных точках стенок барабана входят в список параметров, определяющих действия машиниста котла при растопке. Поэтому при разработке компьютерного тренажера машиниста парового котла возникла задача получения модели, с достаточной точностью описывающей поведение температурного распределения стенки барабана.

В процессе функционирования парового котла в нижней части барабана располагается пароводяная смесь, в верхней – насыщенный пар. Нагрев стенки барабана осуществляется с внутренней стороны от конвективного теплообмена с паром/пароводяной смесью. С наружной стороны барабан теплоизолирован. В процессе растопки котла характеристики теплоносителя существенно изменяются: температура повышается от 30 до 340 °С, давление возрастает от 0,1 до 14,5 МПа. Это приводит к изменению параметров теплообмена с внутренней стороны стенки барабана и должно быть учтено при моделировании процесса.

Большое отношение диаметра барабана к толщине стенки позволяет ограничиться моделью температурного распределения в бесконечной пластине с граничными условиями третьего рода [2]. Решение краевой задачи в такой постановке может быть выполнено как аналитическими, так и численными методами [3]. Классические методы математической физики не позволяют получить решение для случая, когда коэффициенты теплообмена изменяются с течением времени [4]. В работе [4] предложен подход, который позволяет найти аналитическое решение для небольшого числа частных зависимостей коэффициента теплообмена от времени. В большинстве практических случаев применяются численные методы решения, разнообразие которых позволяет решить задачу с необходимой точностью.

Известные программные пакеты компьютерного моделирования, такие как COMSOL Multiphysics[®], ANSYS, Altair Flux[™], реализуют решение задач математической физики методом конечных элементов. Все они обладают высокой вычислительной ресурсоемкостью; кроме того, зачастую требуются дополнительные решения по интеграции полученной модели с программными продуктами сторонних производителей [5].

Если численные модели разрабатываются для решения задач идентификации процессов технологической теплофизики, синтеза систем автоматического управления, систем имитационного моделирования, то необходимо снизить вычислительную ресурсоемкость алгоритмов моделирования, а также иметь возможность простой реализации моделей в пакетах моделирования динамических систем, таких как MATLAB[®] SIMULINK[®], SimInTech, VisSim. В этом случае авторы чаще всего прибегают к методу конечных разностей. Например, в работах [6, 7], посвященных моделированию температурного распределения стенки барабана

котла, авторы используют сетку по пространственной координате, на базе которой переходят к системе линейных дифференциальных уравнений для температур в узловых точках. Такой же подход применен в [8], при решении подобной задачи с переменным коэффициентом теплопередачи.

В современной литературе встречаются и другие подходы к реализации численных моделей процессов теплообмена. В работах [9–12] исследуется эффективность применения искусственных нейронных сетей для решения уравнений математической физики. В статье [13] автор использует метод неопределенных функций для решения задачи уравнения теплопроводности с переменными коэффициентами. В работах [14, 15] используются методы спектральной теории, позволяющие получить представление распределенного объекта в форме пространства состояний за счет разложения дифференциального уравнения в частных производных в ряд по ортонормированному базису функций.

В настоящей работе решается задача построения и идентификации модели температурного распределения стенки барабана котла. Предлагаемый подход ориентирован на реализацию решения в пакетах моделирования динамических систем.

Постановка задачи

Температурное распределение по толщине бесконечной пластины с конвективным теплообменом на поверхностях описывается одномерным параболическим уравнением с граничными условиями третьего рода [2]:

$$\frac{\partial Q(x,t)}{\partial t} = a(t) \frac{\partial^2 Q(x,t)}{\partial x^2}, \quad 0 < x < L, \quad t > 0; \quad (1)$$

$$Q(x,0) = Q_0(x); \quad (2)$$

$$\begin{cases} \lambda(t) \frac{\partial Q(0,t)}{\partial x} = \alpha_1(t)(Q_1(t) - Q(0,t)), \\ -\lambda(t) \frac{\partial Q(L,t)}{\partial x} = \alpha_2(t)(Q_2(t) - Q(L,t)), \end{cases} \quad (3)$$

где $Q(x,t)$ – температурное поле пластины; $Q_1(t)$, $Q_2(t)$ – температуры сред на границах пластины при $x=0$ и $x=L$; $a(t) = \lambda(t)/(c(t)\gamma(t))$ – коэффициент температуропроводности; $\lambda(t)$ – коэффициент теплопроводности; $c(t)$ – удельная теплоемкость; $\gamma(t)$ – плотность материала пластины; $\alpha_1(t)$, $\alpha_2(t)$ – коэффициенты теплопередачи на границах пластины; L – толщина.

При постоянных значениях всех коэффициентов задачи $\alpha_1(t) = \alpha_{1C}$, $\alpha_2(t) = \alpha_{2C}$, $\lambda(t) = \lambda_C$, $c(t) = c_C$, $\gamma(t) = \gamma_C$ решение краевой задачи (1)–(3) может быть найдено в терминах структурной теории распределенных систем [16, 17] с помощью передаточной функции объекта с распределенными параметрами [18]. Стандартизирующая функция для (1)–(3) имеет вид [18]

$$\omega(x,t) = Q_0(x)\delta(t) + a_C g_2(t)\delta(x-L) - a_C g_1(t)\delta(x), \quad (4)$$

где

$$\begin{aligned} g_1(t) &= b_1(Q_1(t) - Q(0,t)), \\ g_2(t) &= b_2(Q_2(t) - Q(L,t)), \\ b_1 &= \alpha_{1C}/\lambda_C, \end{aligned}$$

$$b_2 = \alpha_{2C} / \lambda_C .$$

Передаточная функция определяется выражением

$$W(x, \xi, p) = \sum_k \frac{\phi^*(\mu_k, x)\phi^*(\mu_k, \xi)}{\|\phi^*(\mu_k, x)\|^2 (p + a\mu_k^2)}, \quad k = 1, 2, \dots, \quad (5)$$

где p – оператор преобразования Лапласа,

$$\phi^*(\mu_k, x) = \cos \mu_k x + b_1 \frac{\sin \mu_k x}{\mu_k},$$

$$\|\phi^*(\mu_k)\|^2 = \frac{b_2 \mu_k^2 + b_1^2}{2\mu_k^2 \mu_k^2 + b_2^2} + \frac{b_1}{2\mu_k^2} + \frac{L}{2} \left(1 + \frac{b_1^2}{\mu_k^2} \right),$$

μ_k – положительные корни трансцендентного уравнения

$$\frac{\operatorname{tg} \mu L}{\mu} = \frac{b_1 + b_2}{\mu^2 - b_1 b_2}. \quad (6)$$

Тепловое поле пластины в изображении по Лапласу по временной координате определяется следующим образом:

$$Q(x, p) = \int_0^L W(x, \xi, p) \omega(\xi, p) d\xi =$$

$$= a_C [b_2 Q_2(p) W(x, L, p) - b_1 Q_1(p) W(x, 0, p)] + \int_0^L W(x, \xi, p) Q_0(\xi) d\xi. \quad (7)$$

Выражение (7) позволяет осуществить расчет температуры в произвольной точке x пластины в зависимости от поведения температур сред на границах. В случае переменных коэффициентов аналитического решения задачи (1)–(3) не существует. Далее предлагается подход к использованию аналитического решения (7) для реализации численного расчета температуры пластины при изменяющихся во времени коэффициентах теплопередачи.

Решение задачи при переменных коэффициентах

Выражение (5) может быть представлено в виде

$$W(x, \xi, p) = \sum_k \frac{K_k(x, \xi)}{p + a_C \mu_k^2}, \quad k = 1, 2, \dots, \quad (8)$$

где

$$K_k(x, \xi) = \frac{\phi^*(\mu_k, x)\phi^*(\mu_k, \xi)}{\|\phi^*(\mu_k, x)\|^2}.$$

С учетом (8) решение (7) при $Q_0(x) = 0$ может быть представлено в виде бесконечной суммы параллельных аperiодических звеньев первого порядка:

$$Q(x, p) = \sum_k Q_k(x, p) = \sum_k [b_2 K_k(x, L) Q_2(p) - b_1 K_k(x, 0) Q_1(p)] \frac{1}{p + a_C \mu_k^2}. \quad (9)$$

Каждое слагаемое $Q_k(x, p)$ может быть представлено в виде структурной схемы (рис. 1).

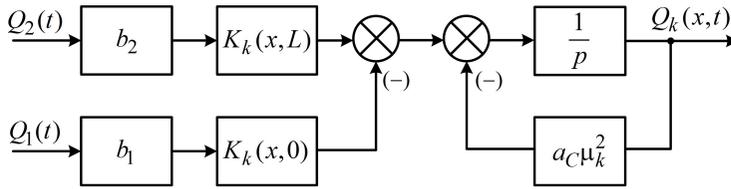


Рис. 1. Структурная схема k -го слагаемого решения с постоянными коэффициентами

Изменение параметров задачи (1)–(3) в произвольный момент времени t может рассматриваться как начало нового динамического процесса, с новыми параметрами и начальным температурным распределением, существовавшим в момент изменения [19]. Структура, представленная на рис. 1, иллюстрирует, что температура в точке x в произвольный момент времени будет определяться суммой температур на выходах интеграторов. Таким образом, при реализации расчета в пакетах моделирования динамических систем текущее состояние будет использоваться как начальное при новых значениях коэффициентов. Необходимо только реализовать вычисление коэффициентов модели в зависимости от изменившихся параметров краевой задачи.

Изменение коэффициентов теплопередачи влияет на значения корней трансцендентного уравнения (6). После ввода обозначений

$$f_{1K}(\mu, x) = \frac{\phi^*(\mu, x)\phi^*(\mu, 0)}{\|\phi^*(\mu)\|^2},$$

$$f_{2K}(\mu, x) = \frac{\phi^*(\mu, x)\phi^*(\mu, L)}{\|\phi^*(\mu)\|^2}$$

структурная схема для слагаемого $Q_k(x, t)$ преобразована следующим образом (рис. 2). Сигналы $b_1(t)$, $b_2(t)$ определяются так:

$$b_1(t) = \alpha_1(t)/\lambda(t),$$

$$b_2(t) = \alpha_2(t)/\lambda(t).$$

Семейство функций $\mu_k(b_1, b_2)$, $k=1, 2, \dots$ реализует вычисление корней трансцендентного уравнения (6).

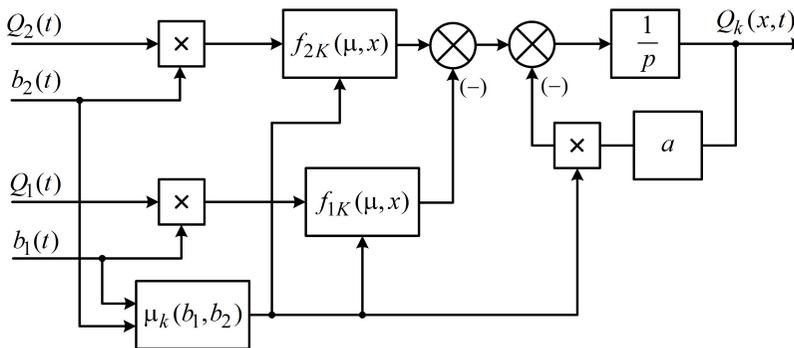


Рис. 2. Структурная схема k -го слагаемого решения с переменными коэффициентами

Для реализации в компьютерных пакетах моделирования динамических систем более удобным может быть представление модели в пространстве состояний вектора $\theta = [\theta_i]_{N \times 1}$:

$$\begin{cases} \frac{d\theta(t)}{dt} = \mathbf{A}(b_1(t), b_2(t), t)\theta(t) + \mathbf{B}(b_1(t), b_2(t), x)\mathbf{u}(t); \\ Q(x, t) = \mathbf{C}\theta(t). \end{cases} \quad (10)$$

Здесь

$$\mathbf{A}(b_1, b_2, t) = -\text{diag}\left(\left[a(t)\mu_1^2(b_1, b_2) \quad a(t)\mu_2^2(b_1, b_2) \quad \dots \quad a(t)\mu_N^2(b_1, b_2) \right]\right),$$

$$\mathbf{B}(b_1, b_2, x) = \begin{bmatrix} \frac{f_{1K}(\mu_1(b_1, b_2), x)}{f_T(\mu_1(b_1, b_2))} & -\frac{f_{2K}(\mu_1(b_1, b_2), x)}{f_T(\mu_1(b_1, b_2))} \\ \frac{f_{1K}(\mu_2(b_1, b_2), x)}{f_T(\mu_2(b_1, b_2))} & -\frac{f_{2K}(\mu_2(b_1, b_2), x)}{f_T(\mu_2(b_1, b_2))} \\ \dots & \dots \\ \frac{f_{1K}(\mu_N(b_1, b_2), x)}{f_T(\mu_N(b_1, b_2))} & -\frac{f_{2K}(\mu_N(b_1, b_2), x)}{f_T(\mu_N(b_1, b_2))} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{C} = [1 \quad 1 \quad \dots \quad 1]_{1 \times N},$$

$$\mathbf{u}(t) = [Q_1(t) \quad Q_2(t)]^T,$$

N – количество слагаемых бесконечного ряда (9), учитываемых в численной реализации модели.

Реализация модели в MATLAB® SIMULINK®

Описанный подход применен при реализации модели температуры стенки барабана парового котла ТГМ-84 (Е420/140ГМ ТКЗ). Ранее [20] была проведена идентификация коэффициентов теплообмена, принятых постоянными в течение всего времени нагрева. При этом получены удовлетворительные результаты поведения модели на этапе растопки, однако при выходе на рабочий режим наблюдается существенное отклонение модельной температуры от реальной.

Поиск корней трансцендентного уравнения (6) реализован в пакете MATLAB® с помощью функции `fminbnd`, которая осуществляет поиск минимума функции одной переменной на заданном интервале. Исходя из результатов идентификации [20] предположено, что коэффициент $\alpha_1 \in [0.01; 100]$ Вт/(м²К), $\alpha_2 \in [10; 200]$ Вт/(м²К), $\lambda = 48$ Вт/(м·К), $L = 0.09$ м. На каждом отрезке взято по 20 опорных точек, для α_1 – равноотстоящих логарифмически, для α_2 – линейно.

Уравнение (6) имеет особое решение в случае, когда $\mu^2 = b_1 b_2$, что должно быть учтено в алгоритме формирования интервала отыскания корня. Условия для определения интервалов могут быть сформулированы следующим образом:

1) если $b_1 b_2 \leq \pi/(2L)$, то первый корень μ_1 располагается на отрезке $[b_1 b_2; \pi/(2L)]$, последующие корни располагаются на интервалах $(\pi(2i-1)/(2L); \pi(2i+1)/(2L))$, $i = 2, 3, \dots$;

2) если $b_1 b_2 > \pi/(2L)$, то на интервале $(0; \pi/(2L)]$ корня нет, расположение корней подчиняется следующему закону: на интервалах, для которых выполняется условие

$$C_1 = b_1 b_2 \notin (\pi(2i-1)/(2L); \pi(2i+1)/(2L)], \quad i = 2, 3, \dots,$$

располагается один корень; на интервале j , для которого условие C_1 не выполняется, располагаются два корня, первый из которых лежит в интервале $(\pi(2j-1)/(2L); b_1 b_2)$, а второй – на отрезке $[b_1 b_2; \pi(2j+1)/(2L)]$.

На рис. 3 представлены поверхности, отражающие зависимость $\mu_k(b_1, b_2)$ для первых трех корней уравнения.

По результатам анализа вида зависимостей $\mu_k(b_1, b_2)$ было принято решение при реализации модели для первого корня применить линейную интерполяцию по рассчитанным данным, для остальных – использовать билинейную аппроксимацию.

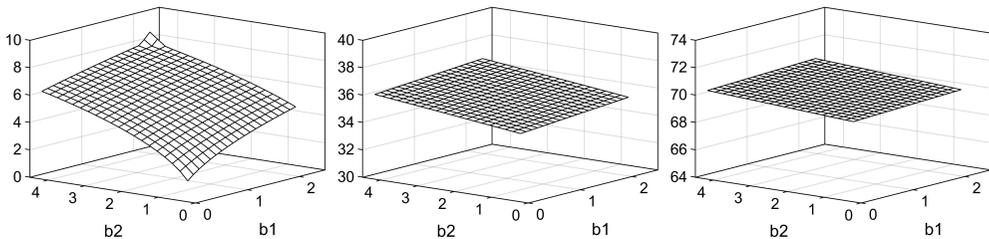


Рис. 3. Зависимости первых трех корней уравнения (6) от b_1, b_2

Модель (10) была реализована в пакете MATLAB[®] SIMULINK[®] с помощью S-функции (S-Function) – специального механизма пакета, позволяющего описать произвольный алгоритм расчета модели объекта, представленного в пространстве состояний. В алгоритме S-функции реализован расчет зависимостей $\alpha_1(T_{wall}^M)$, $\alpha_2(T_{wall}^M)$, $\lambda(T_{wall}^M)$, $c(T_{wall}^M)$, где T_{wall}^M – рассчитанная (модельная) температура стенки в точке контроля $x=0$, $T_{wall}^M = Q(0, t)$. Зависимости теплоемкости и теплопроводности аппроксимировались кусочно-линейной зависимостью по табличным данным для низколегированной стали 22К [21]. Зависимости коэффициентов теплопередачи определены в процессе идентификации модели. Координаты точки $x=0$ соответствуют внешней теплоизолированной границе стенки барабана котла, $x=L$ – внутренней границе стенки, контактирующей с пароводяной смесью.

Идентификация модели

Идентификация модели проводилась по реальным данным, полученным в процессе растопки котла ТГМ-84. В качестве исходных данных использовались: температура воды в барабане котла $T_B(t)$, температура стенки барабана котла $T_{wall}(t)$. На первом этапе коэффициенты теплопередачи были определены в виде линейной зависимости от температуры стенки:

$$\alpha_1(T_{wall}^M) = \alpha_{11}T_{wall}^M + \alpha_{10},$$

$$\alpha_2(T_{wall}^M) = \alpha_{21}T_{wall}^M + \alpha_{20}.$$

Подбор коэффициентов осуществлялся путем минимизации функционала

$$J(\Delta) = \int_0^{t_1} |T_{wall}^M(\Delta, t) - T_{wall}(t)| dt \rightarrow \min_{\Delta},$$

где $\Delta = [\alpha_{10}, \alpha_{11}, \alpha_{20}, \alpha_{21}]$ – вектор варьируемых параметров. Область определения для каждого параметра определялась таким образом, чтобы значения $\alpha_1(T_{wall}^M)/\lambda(T_{wall}^M)$, $\alpha_2(T_{wall}^M)/\lambda(T_{wall}^M)$ не выходили за пределы областей определения для b_1 и b_2 , диапазон изменения температуры стенки взят из экспериментальных данных, $T_{wall}^M \in [20, 320]$ °С.

В результате решения задачи получены следующие результаты:

1) коэффициент теплопередачи на внешней стороне стенки может быть принят постоянным $\alpha_1(T_{wall}^M) = 10.5$ Вт/(м²К);

2) линейная зависимость для коэффициента теплопередачи на внутренней стороне стенки не обеспечивает требуемого качества поведения модели: на первом временном интервале процесса растопки, до достижения температуры металла 150 °С, модельная температура превышает фактическую, на втором интервале – отстает;

3) при выходе на установившийся режим модельная температура становится существенно выше фактической.

На втором этапе идентификации было принято решение аппроксимировать $\alpha_2(T_{wall}^M)$ кусочно-линейной зависимостью, заданной опорными точками. Для повышения скорости расчета идентификация проводилась в два этапа: на первом и на втором временных интервалах. В результате идентификации были найдены оптимальные по критерию минимума интеграла модуля ошибки значения коэффициентов теплопередачи в узловых точках (рис. 4). Сшивка интервалов производилась по значению вектора состояний в конце первого интервала.

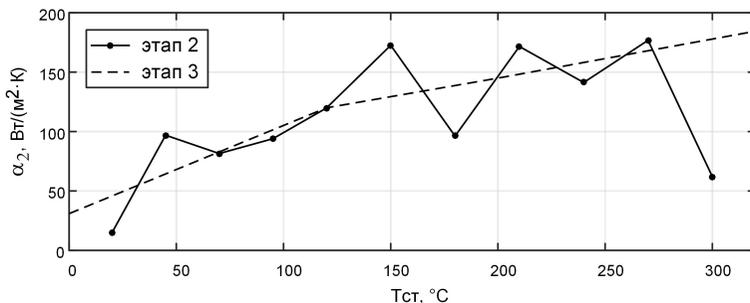


Рис. 4. Зависимость коэффициента теплопередачи от температуры стенки барабана

Полученная зависимость коэффициента теплопередачи от температуры обеспечивает высокую точность модели, но совершенно нефизична: модель пе-

реобучена. Этому есть несколько объяснений: 1) нелинейное поведение датчиков температуры воды в барабане котла, а также температуры стенки барабана; 2) влияние на коэффициент теплопередачи дополнительных факторов. Действительно, в процессе растопки машинист имеет возможность воздействовать на температуру стенки барабана с помощью продувки котла, подачи пара в линию обогрева. Кроме того, очевидно, что коэффициент теплопередачи существенно уменьшается при выходе котла на рабочий режим. Было сделано предположение, что коэффициент α_2 зависит не только от температуры пароводяной смеси в барабане, но и от F_{SW} – расхода питательной воды в барабан котла. Поэтому на третьем этапе идентификации было принято решение уменьшить число опорных точек (см. рис. 4) для зависимости коэффициента теплопередачи от температуры $\alpha_2(T_{wall}^M)$ и добавить влияние расхода питательной воды в виде:

$$\alpha_2(T_{wall}^M, F_{SW}) = \alpha_2(T_{wall}^M) - K_F \max(0, F_{SW} - F_0).$$

Это позволило учесть пропорциональное уменьшение коэффициента теплообмена при увеличении расхода питательной воды выше $F_0 = 100$ т/час, $K_F = 0.58$. Результаты моделирования приведены на рис. 5–7. Точность модели по интегральному критерию модуля ошибки возросла в 2,8 раза по сравнению с моделью с постоянным коэффициентом [20].

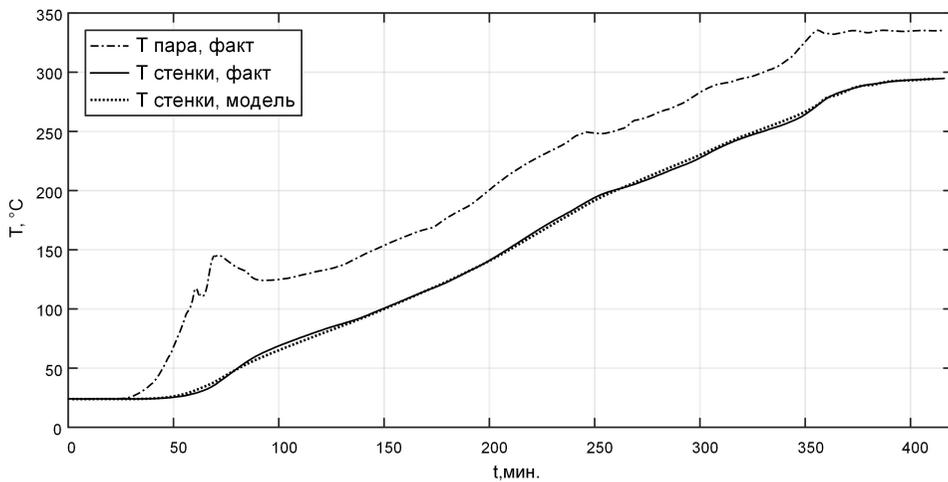


Рис. 5. Результаты моделирования температуры стенки барабана

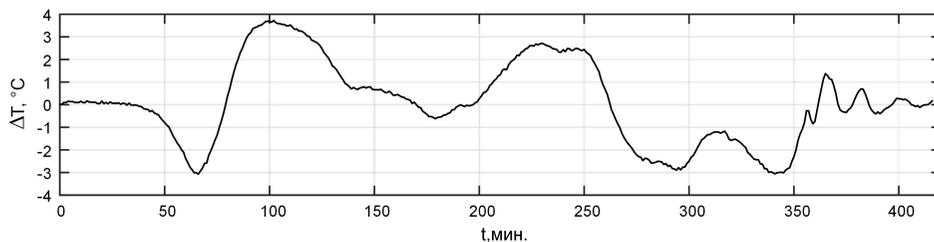


Рис. 6. Рассогласование фактической и модельной температур

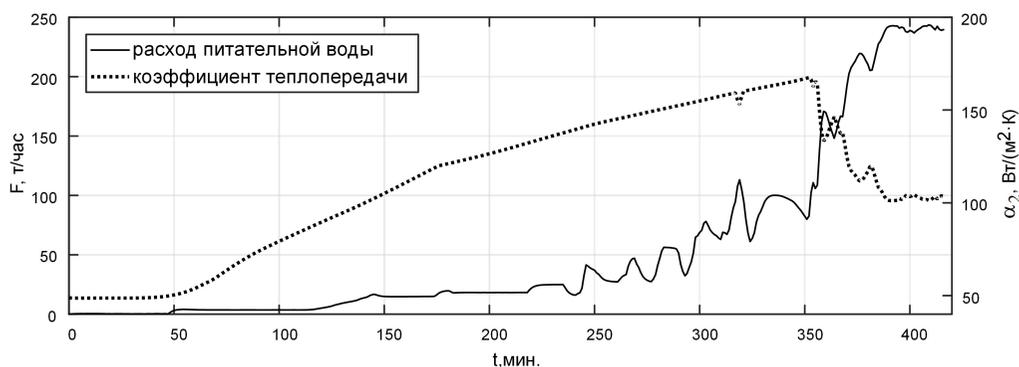


Рис. 7. Изменение расхода питательной воды и коэффициента теплопередачи в процессе моделирования

Заключение

Предложенный подход может быть распространен на другие модели, описываемые уравнениями теплопроводности, которые имеют аналитическое решение, представимое в виде разложения по ортонормированному базису функций, в том числе и на двух- и трёхмерные задачи.

Главным достоинством подхода является простота его реализации в современных пакетах компьютерного моделирования динамических систем, что позволяет исследовать в них системы управления объектами с распределенными параметрами. Недостатком подхода выступает невозможность определения коэффициентов уравнения как функций пространственной координаты, однако для большинства задач синтеза систем автоматического управления вполне достаточно точности моделирования, достигаемой при коэффициентах, зависящих только от времени.

Подход имеет существенное преимущество по сравнению с сеточными методами: точность модели не зависит от шага сетки по пространственной координате, расчет может быть выполнен для любой точки области определения задачи. Возможно распространение подхода на представление объектов с распределенными параметрами с помощью спектральной теории распределенных систем.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сборник директивных материалов по эксплуатации энергосистем (Теплотехническая часть). Минэнерго СССР. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоиздат, 1981. 320 с.
2. Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967. 599 с.
3. Ковалов В.И., Пахомов А.Н., Гатапова Н.Ц., Колух А.Н. Методы решения задач теплопереноса. Теплопроводность и диффузия в неподвижной среде: Учеб. пособие. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2005, 80 с.
4. Карташов Э.М. Теплопроводность при переменном коэффициенте теплообмена // Теплофизика высоких температур. Т. 57, № 5. С. 694–701.
5. Pleshivtseva Yu., Rogachev G., Popov A. MATLAB-FLUX Coupling for numerical modeling in education // SHS Web of Conferences 29, 02033 (2016).
6. Bracco S. Simulation models of steam drums based on the heat transfer equations // Applied Mathematical Sciences, 2010. V. 4, № 74. Pp. 3687–3712.
7. Said W.K., Oleiwi B.K. Simulation of Boiler Drum Wall Temperature Differential and its Estimation // IJCCCE, 2011. V. 11, № 1. Pp. 62–73.
8. Тонкошкур А.Г. Моделирование процесса кондуктивного теплопереноса в грунтовом воздухоохладителе // Математическое моделирование. 2018. Т. 30, № 1. С. 103–116.
9. Васильев А.Н. Математическое моделирование распределенных систем с помощью нейронных сетей // Математическое моделирование, 2007. Т. 19, № 12. С. 32–42.

10. *Васильев А.Н., Тархов Д.А.* Построение приближенных нейросетевых моделей по разнородным данным // Математическое моделирование. 2007. Т. 19, № 12. С. 43–51.
11. *Васильев А.Н., Тархов Д.А., Шемякина Т.А.* Нейросетевой подход к задачам математической физики. СПб.: Нестор-История, 2015. 260 с.
12. *Корсунов Н.И., Ломакин А.В.* Моделирование процессов, описываемых волновым дифференциальным уравнением, с использованием ячеистых нейронных сетей // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Экономика, информатика. 2014. Вып. 31/1, № 15(186). С. 103–107.
13. *Рожкова А.С.* Решение одномерного нестационарного уравнения теплопроводности с переменными коэффициентами // Приложение математики в экономических и технических исследованиях. 2018. № 1(8). С. 144–148.
14. *Коваль В.А.* Спектральный метод анализа и синтеза распределенных систем. Саратов: Изд-во Саратов. гос. техн. ун-та, 2010. 148 с.
15. *Коваль В.А., Торгашова О.Ю.* Решение задач анализа и синтеза для пространственно-двумерного распределенного объекта, представленного бесконечной системой дифференциальных уравнений // Автоматика и телемеханика. 2014. № 2. С. 54–71.
16. *Бутковский А.Г.* Структурная теория распределенных систем. М.: Наука, 1977. 320 с.
17. *Рапопорт Э.Я.* Структурное моделирование объектов и систем управления с распределенными параметрами. М.: Высшая школа, 2003. 299 с.
18. *Бутковский А.Г.* Характеристики систем с распределенными параметрами. М.: Наука, 1979. 224 с.
19. *Данилушкин И.А.* Численно-аналитическая модель объекта с распределенными параметрами с переменной структурой // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2013. № 4(40). С. 197–201.
20. *Данилушкин И.А., Сыров И.М.* Моделирование температурного распределения стенки барабана котла // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2018. № 2(58). С. 16–20.
21. *Марочник сталей и сплавов.* 4-е изд., переработ. и доп. / Под общ. ред. Ю.Г. Драгунова, А.С. Зубченко. М.: Машиностроение, 2014. 1216 с.

Статья поступила в редакцию 03 октября 2022 г.

NUMERICAL ANALYTICAL MODEL OF METAL TEMPERATURE OF STEAM BOILER DRUM¹

I.A. Danilushkin, S.A. Kolpashchikov, I.S. Levin

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya str., Samara, 443100, Russian Federation

E-mail: idanilushkin@mail.ru, skolpaschikov@mail.ru, Levin.is@samgtu.ru

Abstract. *The problem of developing and identifying a temperature distribution model in the wall of the boiler drum was solved. The numerical model is based on the analytical solution of the one-dimensional heat conduction equation with heat exchange at the boundaries at constant heat transfer coefficients. The model is implemented in a dynamic systems simulation package. Using the bounded series of eigenfunctions of the analytic solution, a representation of the plant in the state space was obtained. A universal algorithm for calculating the eigennumbers of the analytic solution was proposed. The eigenvalues dependences of the analytical solution on the values of heat transfer coefficients and thermal conductivity was investigated. Based on the results of the study, data tables were obtained to approximate the dependences of eigennumbers on heat transfer coefficients in a limited range of variation. The methodology for implementing a dynamic temperature distribution model, which takes into account changes in heat transfer coefficients during simulation, was tested. The time of change of coefficients is perceived as the beginning of a new transient from the current state of the model. Presented structural diagrams of the implementation of the model in dynamic systems simulation packages. The proposed structures allow the introduction of parametric disturbances at the time of their occurrence in the simulation. According to the experimental data of steam boiler firing, identification of the dependence of the heat transfer coefficient on the temperature of the metal wall of the boiler drum was carried out. The results showed that the heat transfer coefficients are influenced not only by the metal temperature, but also by additional parameters of the steam boiler operation. As a result of experiments, it was found that the accuracy of the model can be improved by taking into account the dependence of the heat transfer coefficient on the internal surface of the drum on the flow rate of feed water into the boiler drum. The results of the numerical experiment are presented.*

Keywords: *heat transfer equation, variable coefficients, heat transfer coefficient, temperature distribution, object with distributed parameters, numerical-analytic solution, state space.*

REFERENCES

1. Sbornik direktivnykh materialov po ekspluatatsii energosistem (Teplotekhnicheskaya chast) [Collection of directive materials for the operation of power systems: (Heat engineering part)]. Minenergo SSSR. 2-e izd., pererab. i dop. M.: Energoizdat, 1981. 320 p. (In Russian).
2. Lykov A.V. Teoriya teploprovodnosti [Theory of thermal conductivity]. M.: Vysshaya shkola, 1967. 599 p. (In Russian).
3. Kononov V.I., Pakhomov A.N., Gatapova N.Ts., Koliukh A.N. Metody resheniya zadach teplomassoperenosa. Teploprovodnost i diffuziya v nepodvizhnoi srede: Ucheb. posobie [Methods for solving problems of heat and mass transfer. Thermal conduction and diffusion in a stationary environment: Study guide]. Tambov: Izd-vo Tamb. gos. tekhn. un-ta, 2005. 80 p. (In Russian).

¹ *Ivan A. Danilushkin (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.
Sergey A. Kolpashchikov (Ph.D. (Techn.)), Head of Department.
Ilya S. Levin (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.*

4. *Kartashov E.M.* Heat Conduction at a Variable Heat-Transfer Coefficient // High Temperature, 2019. Vol. 57, no. 5. P. 663–670.
5. *Pleshivtseva Yu., Rogachev G., Popov A.* MATLAB-FLUX Coupling for numerical modeling in education // SHS Web of Conferences 29, 02033 (2016).
6. *Bracco S.* Simulation models of steam drums based on the heat transfer equations // Applied Mathematical Sciences, 2010. Vol. 4, no. 74. Pp. 3687–3712.
7. *Said W.K., Oleiwi B.K.* Simulation of Boiler Drum Wall Temperature Differential and its Estimation // IJCCCE, 2011. Vol. 11, no. 1. Pp. 62–73.
8. *Tonkoshkur A.G.* Modeling Conductive Heat Transfer in Ground Air Coolers // Mathematical Models and Computer Simulations, 2018. Vol. 10, no. 4. Pp. 519–528.
9. *Vasil'yev A.N.* Matematicheskoe modelirovanie raspredelennykh sistem s pomoshchiu neironnykh setei [Mathematical modeling of distributed systems using neural networks] // Matematicheskoe modelirovanie, 2007. Vol. 19, no. 12. Pp. 32–42. (In Russian).
10. *Vasil'yev A.N., Tarkhov D.A.* Postroenie priblizhennykh neirosetevykh modelei po raznorodnym dannym [Building approximate neural network models based on heterogeneous data] // Matematicheskoe modelirovanie, 2007. Vol. 19, no. 12. Pp. 43–51. (In Russian).
11. *Vasil'yev A.N., Tarkhov D.A., Shemiakina T.A.* Neurosetevoy podkhod k zadacham matematicheskoy fiziki [Neural network approach to problems of mathematical physics]. SPb.: Nestor-Istoriya, 2015. 260 p. (In Russian).
12. *Korsunov N.I., Lomakin A.V.* Modelirovanie protsessov, opisyvaemykh volnovym differentsialnym uravneniem, s ispolzovaniem iacheistykh neironnykh setei [Modeling of processes described by a wave differential equation using cellular neural networks] // Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Ekonomika, informatika. 2014. Vol. 31/1, no. 15 (186). Pp. 103–107. (In Russian).
13. *Rozhkova A.S.* Reshenie odnomernogo nestatsionarnogo uravneniya teploprovodnosti s peremennymi koeffitsientami [Solution of a one-dimensional non-stationary heat equation with variable coefficients] // Prilozhenie matematiki v ekonomicheskikh i tekhnicheskikh issledovaniyakh, 2018. no. 1 (8). Pp. 144–148. (In Russian).
14. *Koval V.A.* Spektralnyi metod analiza i sinteza raspredelennykh sistem [Spectral method for analysis and synthesis of distributed systems]. Saratov: Izd-vo Sarat. gos. tekhn. un-ta, 2010. 148 p. (In Russian).
15. *Koval V.A., Torgashova O.Yu.* Solving analysis and synthesis problems for a spatially two-dimensional distributed object represented with an infinite system of differential equations // Automation and Remote Control, 2014. Vol. 75, no. 2. Pp. 219–233.
16. *Butkovskiy A.G.* Strukturnaya teoriya raspredelennykh sistem [Structural theory of distributed systems]. M.: Nauka, 1977. 320 p. (In Russian).
17. *Rapoport E.Ya.* Strukturnoe modelirovanie obiektov i sistem upravleniya s raspredelennymi parametrami [Structural modeling of objects and control systems with distributed parameters]. M.: Vysshaya shkola, 2003. 299 p. (In Russian).
18. *Butkovskiy A.G.* Kharakteristiki sistem s raspredelennymi parametrami [Characteristics of systems with distributed parameters]. M.: Nauka, 1979. 224 p. (In Russian).
19. *Danilushkin I.A.* Chislenno-analiticheskaya model obieкта s raspredelennymi parametrami s peremennoy strukturoy [Numerical-analytical model of an object with distributed parameters with a variable structure] // Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskije nauki. 2013. no. 4 (40). Pp. 197–201. (In Russian).
20. *Danilushkin I.A., Syrov I.M.* Modelirovanie temperaturnogo raspredeleniya stenki barabana kotla [Modeling the temperature distribution of the boiler drum wall] // Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskije nauki. 2018. no. 2 (58). Pp. 16–20.
21. *Marochnik staley i splavov. 4-e izd., pererabot. i dop.* [Marker of steels and alloys. th ed., revised] / Pod obshchei red. Yu.G. Dragunova, A.S. Zubchenko. M.: Mashinostroenie, 2014. 1216 p. (In Russian).

УДК 621.3.07

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПЕРИОДА ДИСКРЕТНОСТИ ЭКСТРАПОЛЯТОРА НУЛЕВОГО ПОРЯДКА ЦИФРОВОЙ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ НА ДИНАМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА УПРАВЛЕНИЯ

*В.Е. Лысов, В.А. Поляков**

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: 67lysov@mail.ru

Аннотация. Рассматривается вопрос повышения точности воспроизведения задающего сигнала в цифровой системе автоматического управления электроприводом при наличии в структурной схеме экстраполятора нулевого порядка. Рассмотрено формирование дискретности в системе управления с экстраполятором нулевого порядка. Проведен анализ влияния дискретности экстраполятора на динамические показатели качества управления системы. В качестве показателей качества управления – прямые показатели: перерегулирование и время переходного процесса. Показано необходимое соотношение между частотой квантования экстраполятора нулевого порядка и частотой полосы пропускания линейной части системы, обеспечивающее приближение выше приведенных показателей качества управления дискретной системы к аналогичным показателям аналогового прототипа. Полоса пропускания аналоговой части системы определяется из логарифмических амплитудно-частотных характеристик. В статье приводится рекомендация по выбору частоты квантования цифровых регуляторов с экстраполяторами нулевого порядка для многоконтурных систем управления, например построенных по принципу систем подчиненного регулирования.

Ключевые слова: частота квантования, экстраполятор нулевого порядка, передаточная функция, параметры системы.

В теории автоматического управления для оценки переходного процесса используются как прямые, так и косвенные показатели качества. В статье применяем прямые показатели, которые вычисляются непосредственно из кривой переходного процесса. Анализ проводим по изменениям особо важных показателей качества в зависимости от дискретности экстраполятора: времени переходного процесса t_p и величины перерегулирования σ % [1, 2].

Функциональная схема электропривода с экстраполятором нулевого порядка показана на рис. 1 и состоит из цифрового регулятора и аналоговой части.

* Владимир Ефимович Лысов, доктор технических наук, профессор кафедры электропривода и промышленной автоматизации.

Василий Александрович Поляков, аспирант кафедры теоретических основ электротехники.

На вход системы подается аналоговый сигнал задания $x_{zd}(t)$. Структурная схема строится по принципу систем подчиненного регулирования (СПР) [3, 4]. Непрерывная часть включает силовой преобразователь, питающий исполнительный электродвигатель (ИЭД) и усилительные устройства, которые обеспечивают статическую точность системы. Дискретность системы автоматического управления (САУ) определяется регулятором, который включает в себя аналого-цифровой преобразователь (АЦП), преобразующий непрерывный сигнал $\delta(t)$ в дискретный $\delta^*(t)$. Полученный код подается на центральный процессор (ЦП), где выполняется программа регулятора. Он имеет определенную дискретность в выборе кода с АЦП. В эти же дискретные моменты времени код, полученный в результате вычислений в ЦП, подается в цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП), который генерирует сигналы управления для аналоговой части электропривода – усилительно-преобразовательного устройства и усилителя мощности. ЦАП включает в себя кодово-аналоговый преобразователь и экстраполятор нулевого порядка, который удерживает полученный сигнал на период дискретности T [5, 6]. Эта величина и определяет дискретность САУ. При преобразовании непрерывного сигнала в дискретный с выхода экстраполятора на период T происходит некоторая потеря информации. Этот процесс определен теоремой Котельникова – Шеннона [1, 7], но для ограниченного спектра сигнала.

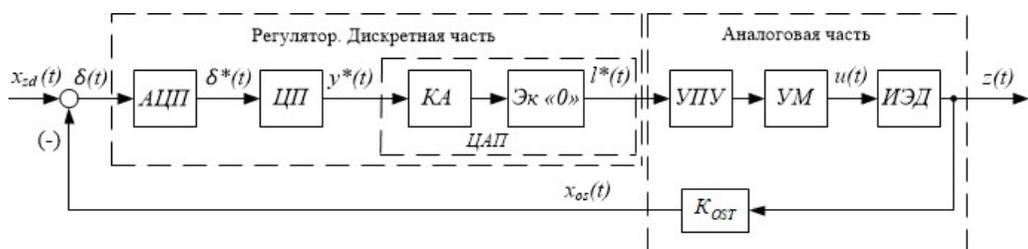


Рис. 1. Функциональная схема цифровой САУ: АЦП – аналого-цифровой преобразователь; ЦП – центральный процессор; ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь; КА – кодово-аналоговый преобразователь; Эк «0» – экстраполятор нулевого порядка; УПУ – усилительно-преобразовательное устройство; УМ – усилитель мощности; ИЭД – исполнительный электродвигатель; $K_{осг}$ – датчик обратной связи; $x_{zd}(t)$ – аналоговый сигнал задания; $\delta(t)$ – аналоговый сигнал ошибки; $\delta^*(t)$ – дискретный сигнал; $y^*(t)$ – дискретный сигнал; $l^*(t)$ – дискретный сигнал; $u(t)$ – аналоговый сигнал; $z(t)$ – аналоговый сигнал на выходе системы; $x_{ос}(t)$ – аналоговый сигнал обратной связи

В практических примерах сигналы, заданные на конечном интервале времени, всегда имеют спектр бесконечной величины, поэтому проявляется эффект алиасинга, который приводит к взаимовлиянию высокочастотных составляющих смещенных спектров сигнала. В этой связи динамические показатели качества цифровых САУ отличаются от получаемых в аналоговых системах. За эталон принимаются показатели качества аналогового прототипа, с ними будем сравнивать аналогичные для дискретной системы.

Рассмотрим изменения динамических показателей качества управления общепромышленного электропривода, построенного по принципу СПР и обеспечи-

вающего технический оптимум системе. Анализ проводится на основании исследования первого внутреннего контура – контура тока с последующим обобщением выводов на другие контуры системы. Схема исследования показана на рис. 2.

Исследование проводится методом компьютерного моделирования в среде Matlab [8–10]. В этой связи целесообразно отметить, что схема на рис. 2, б, в которой дискретность определяется параметрами экстраполятора нулевого порядка (блок Zero-Order), схема на рис. 2, в, в которой желаемая разомкнутая система представлена в форме Z-преобразования, и схема на рис. 2, з, в которой регулятор и аналоговая часть системы представлены в форме Z-преобразования, дают одинаковый отклик системы на единичное скачкообразное входное воздействие.

Для сравнения динамических показателей качества дискретной САУ с аналогичными показателями аналогового прототипа (рис. 2, а) используем схему на рис. 2, б, в которой наиболее просто менять период дискретности экстраполятора нулевого порядка.

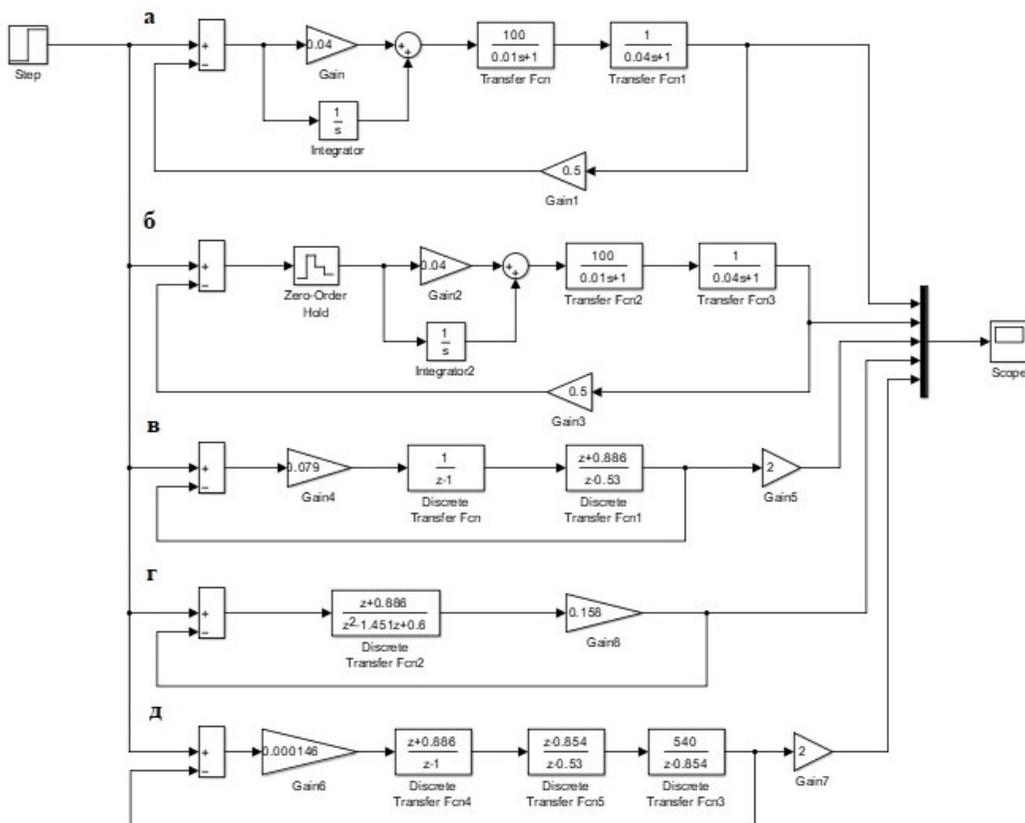


Рис. 2. Схема модели САУ: а – аналоговая САУ; б – САУ с дискретным звеном Zero-order; в – САУ, представленная в форме Z-преобразования; г – замкнутая САУ в форме Z-преобразования; д – САУ, представленная в форме Z-преобразования с выделенным регулятором тока

Анализ аналитических зависимостей, определяющих динамические показатели качества управления, в общем виде в форме Z-преобразования затруднен.

В этой связи дальнейшие исследования проводим с использованием численного способа по структуре, показанной на рис. 3.

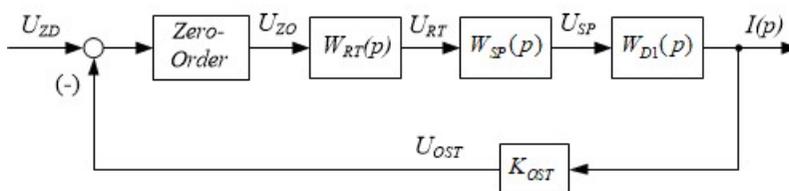


Рис. 3. Структурная схема цифровой САУ

В расчетах принято:

– передаточная функция электродвигателя

$$W_{DI}(p) = \frac{I_D(p)}{U_D(p)} = \frac{1}{R_S(T_E p + 1)} = \frac{1}{0,04p + 1},$$

где $R_S = 1$ Ом – сопротивление обмотки статора; $T_E = 0,04$ с – электромагнитная постоянная времени;

– передаточная функция силового преобразователя

$$W_{SP}(p) = \frac{U_D(p)}{U_Z(p)} = \frac{K_{SP}}{T_{SP}p + 1} = \frac{100}{0,01p + 1},$$

где $K_{SP} = 100$, $T_{SP} = 0,01$ с – постоянная времени силового преобразователя;

– коэффициент датчика обратной связи по току $K_{OST} = 0,5$ В/А.

Исходя из методики расчета регуляторов для СПР находим передаточную функцию регулятора тока:

$$W_{RT}(p) = \frac{U_{RT}(p)}{U_{ZO}(p)} = \frac{R_S(T_S p + 1)}{2T_{SP}p \cdot K_{SP} \cdot K_{OST}}.$$

Таким образом, в аналоговом прототипе применен ПИ-регулятор. Подставив принятые параметры звеньев, получим:

$$W_{RT}(p) = 0,04 + \frac{1}{p}.$$

При формировании схемы принят период дискретности экстраполятора нулевого порядка $T_{0I} = 0,00628$ с. Это же значение дискретности использовалось при формировании схем в форме Z-преобразования.

Расчет по рис. 2, в желаемой разомкнутой САУ при упомянутых выше параметрах:

$$W_{ZH1}(p) = \frac{1}{2T_{SP}p(T_{SP}p + 1)} = \frac{1}{2 \cdot 0,01p \cdot (0,01p + 1)} = \frac{50}{(0,01p + 1)p}.$$

С учетом экстраполятора нулевого порядка:

$$Z[W_{ZH1}(p)] = K \frac{z-1}{z} \cdot z \left[\frac{W_{ZH1}(p)}{p} \right] = K \frac{z-1}{z} \left[\frac{T_0 z}{(z-1)^2} - \frac{T_{SP}(1-d)z}{(z-1)(z-d)} \right],$$

численное значение с учетом $d_1 = e^{-\frac{T_0}{T_{SP}}} = e^{-\frac{0,00628}{0,01}} = e^{-0,628} = 0,53$:

$$Z[W_{ZH1}(p)] = 50 \left[\frac{0,00628z}{(z-1)^2} - \frac{0,01(1-0,53)z}{(z-1)(z-0,53)} \right] \frac{z-1}{z},$$

отсюда

$$Z[W_{ZH I}(p)] = \frac{0,079(z + 0,886)}{(z - 1)(z - 0,53)}.$$

Выражение для передаточной функции регулятора тока в форме Z-преобразования определяется согласно методике синтеза систем СПР по зависимости

$$Z[W_{ZH I}(p)] = W_{RT}(z)W_{SP}(z)W_{D1}(z)K_{OST}(z),$$

откуда выразим передаточную функцию регулятора тока

$$W_{RT}(z) = \frac{Z[W_{ZH I}(p)]}{W_{SP}(z) \cdot W_{D1}(z) \cdot K_{OST}(z)}. \quad (1)$$

В зависимости (1) принято:

$$\begin{aligned} W_{SP}(z) \cdot W_{D1}(z) \cdot K_{OST}(z) &= Z \left[\frac{K_{SP} \cdot K_{D1} \cdot K_{OST}}{(T_{SP}p + 1)(T_{D1}p + 1)} \right] = \\ &= K \left[\frac{e^{-\frac{T_0}{T_{SP}}} - e^{-\frac{T_0}{T_{D1}}}}{T_{SP} - T_{D1}} \cdot \frac{z}{(z - d_1)(z - d_2)} \right]. \end{aligned}$$

С учетом $d_2 = e^{-\frac{T_0}{T_E}} = e^{-\frac{0,00628}{0,04}} = e^{-0,157} = 0,85$ и принятых параметров получим:

$$Z[W_{SP}(p) \cdot W_{D1}(p) \cdot K_{OST}(p)] = \frac{540z}{(z - 0,53)(z - 0,854)}.$$

Отсюда регулятор тока определяется зависимостью

$$W_{RT}(z) = \frac{0,079(z + 0,886)(z - 0,53)(z - 0,854)}{(z - 1)(z - 0,53) \cdot 540z} = \frac{0,000146(z + 0,886)(z - 0,854)}{(z - 1)z}.$$

Расчетные значения для моделей при принятых параметрах показали:

- аналоговый прототип $\sigma = 4,43 \%$; $t_p = 0,04$ с;
- дискретные модели $\sigma = 10 \%$; $t_p = 0,08$ с при $T_{0I} = 0,00628$ с.

Расчет с использованием Z-преобразования для каждого значения z достаточно трудоемкий, поэтому в дальнейшем будем сравнивать результат схемы рис. 2, а с результатами схемы рис. 2, б при различных значениях T_0 .

Оценивать степень приближения перерегулирования $\sigma \%$ и времени переходного процесса t_p будем путем сравнения полосы пропускания аналогового прототипа ω_c с частотой квантования экстраполятора нулевого порядка ω_0 . Результаты моделирования и полученные значения динамических показателей качества управления сведены в таблицу. Частота полосы пропускания аналоговой САУ выявляется из построения логарифмической амплитудно-частотной характеристики (ЛАЧХ) для данных параметров для контура тока и составляет $\omega_{cI} = 50 \text{ с}^{-1}$ (рис. 6). Частоту квантования экстраполятора ω_{0I} ставим в несколько раз больше частоты ω_{cI} посредством коэффициента усиления K . Период дискретности контура тока T_{0I} вычисляется отношением $T_{0I} = \frac{2\pi}{\omega_{0I}}$. Перерегулирование

$\sigma\%$ определяет максимальное отклонение управляемой координаты от ее установившегося значения [1] и вычисляется по зависимости

$$\sigma\% = \frac{z_{\max}(t) - z_{\text{уст}}(t)}{z_{\text{уст}}(t)} \cdot 100\% .$$

Результаты моделирования и полученные значения динамических показателей качества управления

Коэффициент K усиления частоты	Частота квантования экстраполятора $\omega_{0l}, \text{с}^{-1}$	Период дискретности экстраполятора $T_{0l}, \text{с}$	Максимальное значение z_{\max}	Установившееся значение $z_{\text{уст}}$	Перерегулирование $\sigma\%$	Время переходного процесса $t_p, \text{с}$
3	150	0,042	3,61	2	80	0,335
5	250	0,025	2,81	2	40,5	0,18
10	500	0,01256	2,38	2	19	0,08
15	750	0,00837	2,25	2	12,5	0,08
20	1000	0,00628	2,2	2	10	0,08
25	1250	0,005	2,17	2	8,5	0,074
30	1500	0,0042	2,157	2	7,8	0,077

По результатам моделирования в таблице построены графики изменения перерегулирования и времени переходного процесса дискретной системы от частоты квантования экстраполятора нулевого порядка.

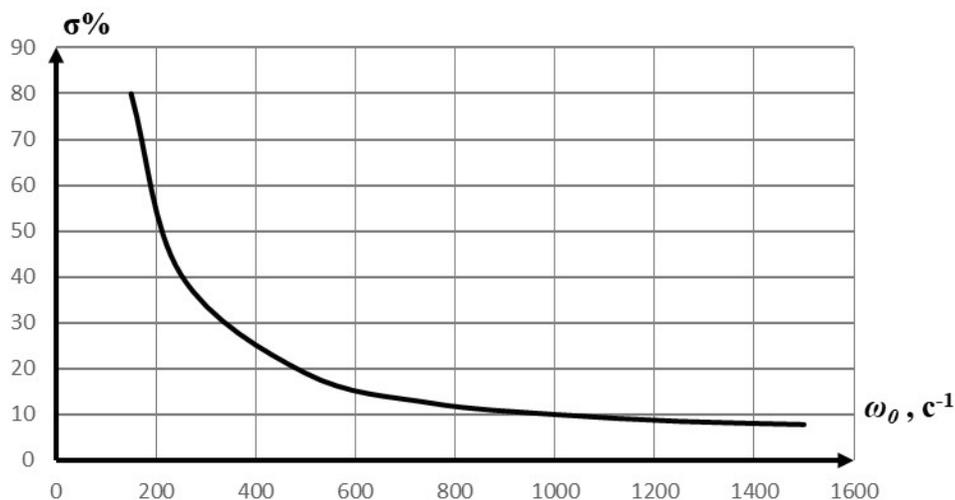


Рис. 4. Зависимость величины перерегулирования от частоты квантования экстраполятора

Для построения желаемой ЛАЧХ были рассчитаны:

$$20\lg K_{pI} = 20\lg 50 = 34 \text{ дБ} ;$$

$$\omega_{1I} = \frac{1}{2T_{SP}} = \frac{1}{0,02} = 50 \text{ с}^{-1};$$

$$\lg \omega_{1I} = \lg 50 = 1,7 \text{ дек};$$

$$\omega_{2I} = \frac{1}{T_{SP}} = \frac{1}{0,01} = 100 \text{ с}^{-1};$$

$$\lg \omega_{2I} = \lg 100 = 2 \text{ дек}.$$

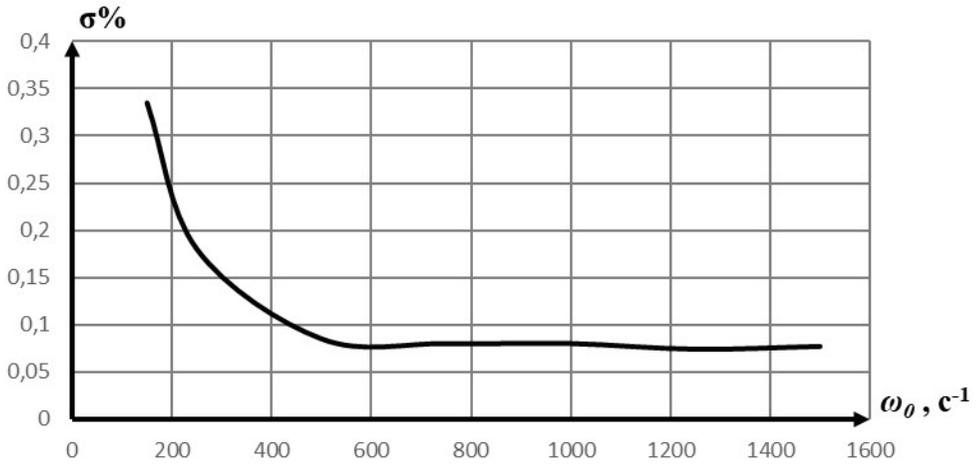


Рис. 5. Зависимость времени переходного процесса от частоты квантования экстраполятора

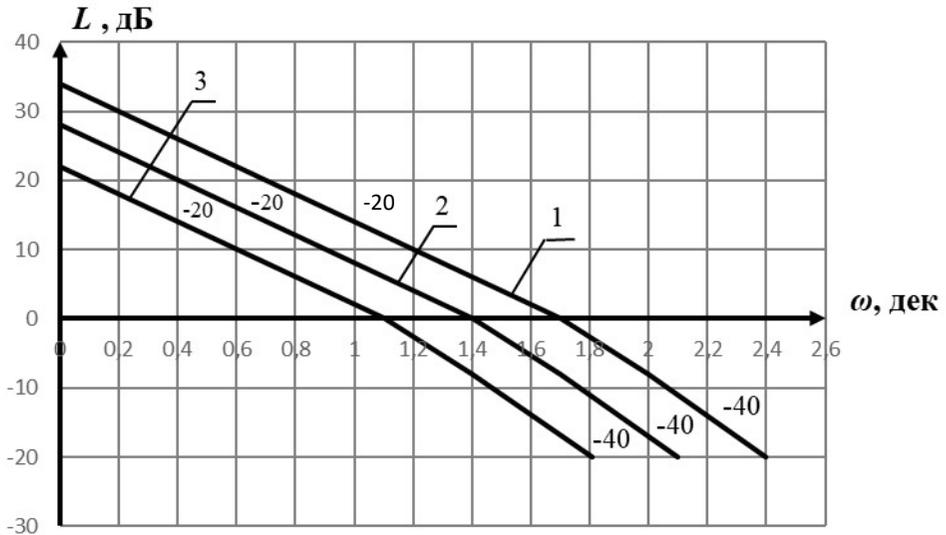


Рис. 6. Желаемая ЛАЧХ разомкнутой САУ, настроенной на технический оптимум: 1 – ЛАЧХ контура тока; 2 – ЛАЧХ контура скорости; 3 – ЛАЧХ контура положения

Анализ результата моделирования САУ, настроенной на технический оптимум, показывает, что для приближения динамических показателей качества дискретной САУ с экстраполятором нулевого порядка (рис. 4, 5) необходимо обеспечить условие определения частоты квантования ω_0 относительно полосы пропускания линейной части системы ω_c соотношением $\frac{\omega_0}{\omega_c} = 20 \div 25$.

Последнее выражение позволяет получить период дискретизации экстраполятора, обеспечивающий требуемую точность воспроизведения сигнала задания [11].

При расчете регуляторов в многоконтурных САУ, например при наличии контура скорости и контура положения, целесообразно принимать частоту квантования экстраполятора с минимальным периодом. В силу того, что полоса пропускания контура тока выше, чем полосы пропускания контура скорости и контура положения, период дискретности контура тока еще в большей степени эквивалентно уменьшится в упомянутых выше контурах. Для рассмотренного примера желаемая передаточная функция контура скорости аналоговой части имеет вид

$$W_{ZHV}(p) = \frac{1}{4T_{SP}p(2T_{SP}p+1)} = \frac{25}{(0,02p+1)p};$$

$$20\lg K_{pV} = 20\lg 25 = 28 \text{ дБ};$$

$$\omega_{1V} = \frac{1}{4T_{SP}} = \frac{1}{0,04} = 25 \text{ с}^{-1}; \lg \omega_{1V} = \lg 25 = 1,4 \text{ дек},$$

а для контура положения

$$W_{ZHP}(p) = \frac{1}{8T_{SP}p(4T_{SP}p+1)} = \frac{12,5}{(0,04p+1)p};$$

$$20\lg K_{pP} = 20\lg 12,5 = 22 \text{ дБ};$$

$$\omega_{1P} = \frac{1}{8T_{SP}} = \frac{1}{0,08} = 12,5 \text{ с}^{-1}; \lg \omega_{1P} = \lg 12,5 = 1,1 \text{ дек}.$$

Логарифмические амплитудно-частотные характеристики приведены на рис. 6.

Полоса пропускания контура скорости $\omega_{cV} = 25 \text{ с}^{-1}$. Требуемое минимальное значение дискретности экстраполятора $T_{0V} = \frac{2\pi}{\omega_{0V}}$, где

$\omega_{0V} = 25\omega_{cV} = 25 \cdot 25 = 625 \text{ с}^{-1}$, откуда $T_{0V} = \frac{6,28}{625} = 0,01 \text{ с}$, а для контура положе-

ния $\omega_{cP} = 12,5 \text{ с}^{-1}$, $\omega_{0V} = 25 \cdot 12,5 = 312,5 \text{ с}^{-1}$, откуда $T_{0V} = \frac{6,28}{312,5} = 0,02 \text{ с}$.

Полученные значения периодов дискретности превышают аналогичные для контура тока ($T_{0I} = 0,005 \text{ с}$, см. таблицу), а следовательно, устанавливая в них значение $T_0 = 0,005 \text{ с}$, существенно приближаем динамические показатели качества управления к аналоговому прототипу. В качестве примера на рис. 7 приведена трехконтурная САУ, включающая выше рассмотренный токовый контур,

контур скорости с регулятором скорости $K_{pv} = 50$ и передаточной функцией электродвигателя, связывающей частоту вращения $\omega(p)$ с напряжением $U(p)$

$$W_{D2}(p) = \frac{\omega(p)}{U(p)} = \frac{1}{T_M p} = \frac{1}{0.4p} = \frac{2.5}{p}. \text{ Здесь } T_M - \text{ электромеханическая постоянная времени.}$$

Контур положения имеет коэффициент $K_{RP} = 12,5$ и передаточную функцию редуктора, связывающего частоту вращения $\omega(p)$ с углом поворота

$$\varphi(p) \text{ якоря двигателя } W_R(p) = \frac{\varphi(p)}{\omega(p)} = \frac{K_R}{p} = \frac{0.1}{p}.$$

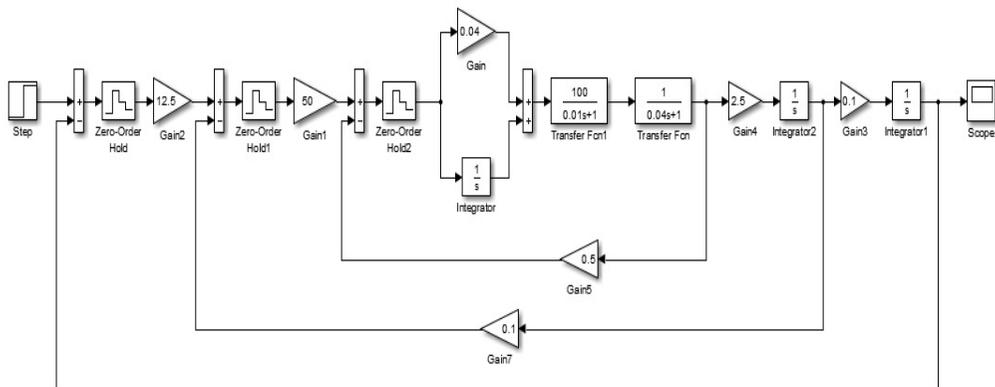


Рис. 7. Схема модели трехконтурной САУ

Переходный процесс для случая, когда все три регулятора имели дискретность экстраполяторов $T_0 = 0.00628$ с, показан на рис. 8. На рис. 9 показан переходный процесс, когда в контуре тока дискретность экстраполятора $T_{0i}=0.00628$ с, в контуре скорости $T_{0v}=0.014$ с, в контуре положения $T_{0p}=0.014$ с.

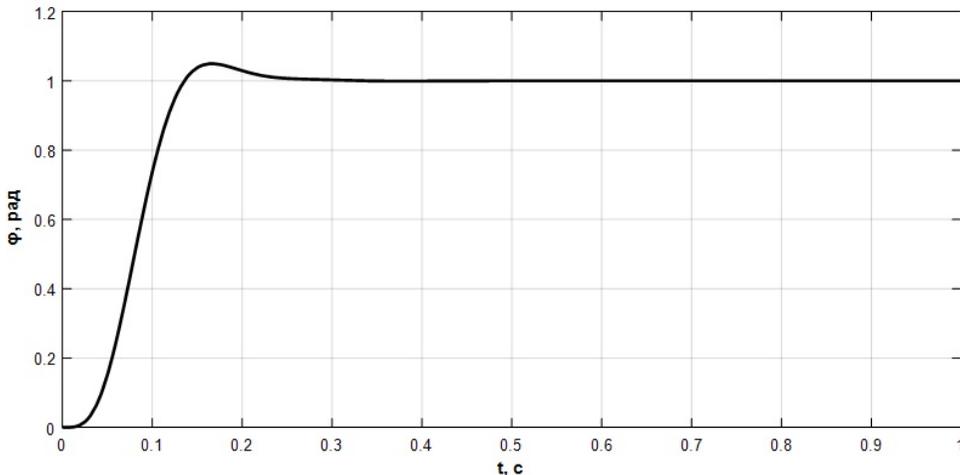


Рис. 8. Переходный процесс цифровой САУ для значений периодов дискретности контуров тока, скорости и положения $T_{0i} = T_{0v} = T_{0p} = 0,00628$ с

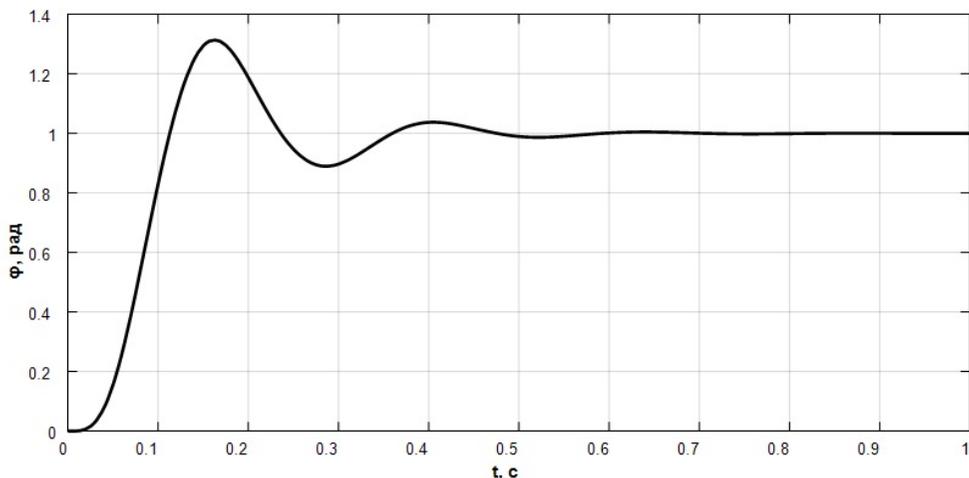


Рис. 9. Переходный процесс цифровой САУ для значений периодов дискретности контуров тока, скорости и положения $T_{0I} = 0,025$ с, $T_{0V} = 0,014$ с, $T_{0P} = 0,00628$ с

Значение дискретности экстраполятора для каждого контура рассчитывалось из условия $\frac{\omega_0}{\omega_c} = 20 \div 25$. Анализ динамических показателей качества управления

[12] показывает на то, что для переходного процесса на рис. 8 значения перерегулирования $\sigma\% = 5\%$ и время переходного процесса $t_{pp} = 0.13$ с. Эти показатели близки к показателям аналогового прототипа.

Динамическим показателям качества управления для переходного процесса, показанного на рис. 9, соответствуют $\sigma\% = 29\%$ и $t_{pp} = 0.35$ с и повышенная колебательность, что существенно отличается от аналогового прототипа.

Приведенный пример подтверждает выводы, полученные в результате анализа влияния дискретности экстраполятора нулевого порядка на динамические показатели качества управления систем автоматического управления

Заключение

Рассмотрен вопрос расчета периода дискретности экстраполятора нулевого порядка в многоконтурной САУ. Доказано, что для обеспечения динамических показателей качества САУ, приближающихся к аналогичным, необходимо, чтобы соотношение между частотой квантования экстраполятора ω_0 и частотой полосы пропускания линейной части САУ ω_c находилось в пределах $\frac{\omega_0}{\omega_c} = 20 \div 25$

в первом контуре. Приведен численный пример и результаты моделирования, подтверждающие сделанный вывод.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лысов В.Е. *Теория автоматического управления*. М.: Машиностроение, 2010. 500 с.
2. Никитин К.В. *Теория автоматического управления. Дискретные системы управления*. СПб, 2017.

3. *Лысов В.Е., Пешев Я.И.* Теоретические основы дискретных систем автоматического управления. Самара: АСИ СамГТУ, 2018. 160 с.
4. *Рапопорт Э.Я.* Системы подчиненного регулирования электроприводов постоянного тока. Куйбышев, 1985. 55 с.
5. *Лысов В.Е., Сидоров И.С.* Анализ влияния частоты квантования цифрового регулятора положения позиционно-слеящего электропривода на динамические показатели качества управления // Мехатроника. Автоматизация. Управление. 2016. Т. 17. № 10. С. 685–689.
6. *Ягодкина Т.В., Беседин В.М.* Теория автоматического управления. М.: Юрайт, 2018. 470 с.
7. *Иванов В.А., Ющенко А.С.* Теория дискретных систем автоматического управления. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. 348 с.
8. *Кудинов Ю.И., Пащенко Ф.Ф.* Теория автоматического управления (с использованием Matlab – Simulink). СПб: Лань, 2017. 208 с.
9. *Анучнов А.С.* Системы управления электроприводов. М.: Дом МЭИ, 2015. 373 с.
10. *Гайдук А.Р., Беляев В.Е.* Теория автоматического управления в примерах и задачах с решениями в Matlab. СПб: Лань, 2016. 416 с.
11. *Комбаров В.В., Сорокин В.Ф.* Ограничение погрешности аппроксимации криволинейных траекторий при выборе частоты цикла управления систем ЧПУ с учетом технологических параметров оборудования // Открытые информационные и компьютерные технологии. 2013. № 59. С. 132–139.
12. *Свердлов Р.В.* Линейные системы автоматического управления. Основы анализа, начала синтеза. Нижний Новгород: НГТУ им. Р.В. Алексеева, 2021. 159 с.

Статья поступила в редакцию 01 октября 2022 г.

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF THE DISCRETE PERIOD OF THE ZERO-ORDER HOLD OF THE DIGITAL AUTOMATIC CONTROL SYSTEM ON DYNAMIC INDICATORS OF CONTROL QUALITY

*V.E. Lysov, V.A. Polyakov**

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

E-mail: 67lysov@mail.ru

Abstract. The issue of increasing the accuracy of reproduction of the master signal in a digital system for automatic control of an electric drive in the presence of a zero-order extrapolator in the block diagram is considered. The formation of discreteness in a control system with a zero-order extrapolator is considered. The analysis of the influence of the extrapolator discreteness on the dynamic indicators of the system control quality is carried out. As indicators of the quality of control direct indicators: overshoot and time of the transition process. The necessary relationship between the zero-order extrapolator quantization frequency and the bandwidth frequency of the linear part of the system is shown, which ensures the approximation of the above indicators of the quality of control of a discrete system to those of an analog prototype. The bandwidth of the analog part of the system is determined from the logarithmic frequency response. The article provides a recommendation for choosing the quantization frequency of digital controllers with zero-order extrapolators for multi-loop control systems, for example, built on the principle of slave control systems.

Keywords: quantization frequency, zero-order hold, transfer function, system parameters.

REFERENCES

1. *Lysov V.Ye.* Theory of automatic control [Teoriya avtomaticheskogo upravleniya]. M.: Mashinostroyeniye, 2010. 500 p. (In Russian).
2. *Nikitin K.V.* Theory of automatic control. Discrete control systems [Teoriya avtomaticheskogo upravleniya. Diskretnye sistemy upravleniya]. Sankt-Peterburg, 2010. 251 p. (In Russian).
3. *Lysov V.Ye., Peshev Ya.I.* Theoretical foundations of discrete automatic control systems [Teoreticheskie osnovy diskretnykh sistem avtomaticheskogo upravleniya]. Samara: ASI SamGTU, 2018. 160 p. (In Russian).
4. *Rapoport E.Ya.* Systems of subordinate control of DC electric drives [Sistemy podchinennogo regulirovaniya elektroprivodov postoyannogo toka]. Kuybyshev, 1985. 55 p. (In Russian).
5. *Lysov V.Ye., Sidorov I.S.* Analysis of the influence of the quantization frequency of a digital position controller of a position-servo electric drive on the dynamic indicators of control quality [Analiz vliyaniya chastoty kvantovaniya tsifrovogo regulyatora polozheniya pozitsionno-sledyashchego elektroprivoda na dinamicheskiye pokazateli kachestva upravleniya] // Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravleniye. 2016. 17 (10). Pp. 685–689. (In Russian).
6. *Yagodkina T.V., Besedin V.M.* Theory of automatic control [Teoriya avtomaticheskogo upravleniya: uchebnik i praktikum dlya bakalavriata i spetsialiteta]. M.: Yurayt, 2018. 470 pp. (In Russian).
7. *Ivanov V.A., Usenko A.S.* Theory of discrete automatic control systems [Teoriya diskretnye sistemy avtomaticheskogo upravleniya]. M.: MGTU N. E. Baumana, 2015. 348 pp. (In Russian).
8. *Kudinov Yu.I., Pashchenko F.F.* Automatic control theory (using Matlab – Simulink) [Teoriya avtomaticheskogo upravleniya (s ispol'zovaniem Matlab Simulink)]. SPb: Lan', 2017. 208 p. (In Russian).

* *Vladimir E. Lysov (Dr. (Techn.)), Professor.*
Vasilij A. Polyakov, Postgraduate Student.

9. *Anuchin A.S.* Electric drive control systems [Sistemy upravleniya elektroprivodov]. M.: MEI, 2015. 373 p. (In Russian).
10. *Gayduk A.R., Belyaev V.E.* Theory of automatic control in examples and problems with solutions in Matlab [Teoriya avtomaticheskogo upravleniya v primerakh i zadachakh s resheniyami v Matlab]. SPb: Lan', 2016. 416 p. (In Russian).
11. *Kombarov V.V., Sorokin V.F.* Limiting the approximation error of curved trajectories when choosing the frequency of the control cycle of CNC systems, taking into account the technological parameters of the equipment [Ogranicheniye pogreshnosti approksimatsii krivolinykh trayektoriy pri vybore chastoty tsikla upravleniya system CHPU s uchotom tekhnologicheskikh parametrov oborudovaniya] // Otkrytyye informatsionnyye i komp'yuternyye tekhnologii, 2013. 59. Pp. 132–139. (In Russian).
12. *Sverdlov R.V.* Linear automatic control systems. Fundamentals of analysis, the beginning of synthesis [Lineinaya sistema avtomaticheskogo upravleniya. Osnovye analiza, nachalo sintesa]. Nizhny-Novgorod: NGTU, 2021. 159 pp. (In Russian).

УДК 681.518

НАЗНАЧЕНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ КИБЕРФИЗИЧЕСКИХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

К.С. Пешкин*

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: kir.peschkin@yandex.ru

Аннотация. *Статья посвящена активно развивающемуся в условиях информационной трансформации промышленности новому способу организации производства, связанному с внедрением киберфизических систем. Анализ рынка показывает положительную динамику в росте капитализации данного направления, что свидетельствует о широком распространении инструментов цифровой трансформации экономики в целом и росте инвестиций в развитие информационных технологий и технологий искусственного интеллекта в промышленном производстве, включая создание и внедрение киберфизических систем управления технологическими процессами в различных отраслях промышленности. В статье проведен анализ существующих определений «киберфизические системы» и «киберфизические комплексы». Раскрывается понятие киберфизической системы управления технологическими процессами, описывается ее основная структура. Киберфизическая система управления рассматривается как ряд взаимосвязанных подсистем, выполняющих строго определенные функции, направленные на реализации общих системных задач. Представлено описание каждой из подсистем, обобщенная схема их иерархических связей и взаимодействий. Рассматривается роль киберфизических систем управления в информационной трансформации промышленности и перспективы их развития в будущем.*

Ключевые слова: *Индустрия 4.0, киберфизические системы, киберфизические комплексы, интеллектуальная система управления, цифровой двойник, технологический процесс.*

Введение

Начало нового столетия многие эксперты по всему миру ассоциируют с происходящей информатизацией промышленного производства или началом промышленной революции Индустрии 4.0. Этот этап требует от современного общества переосмысления принципов организации экономики и производства, повышения степени интеграции многоуровневых информационных технологий, которые оказываются необходимыми предпосылками конкурентоспособности в условиях современного рынка. Основными признаками происходящей промышленной революции становится распространение блокчейна, интернета вещей, иску-

* Кирилл Сергеевич Пешкин, аспирант кафедры управления и системного анализа теплоэнергетических и социотехнических комплексов.

ственного интеллекта, аддитивных технологий и многомерной печати, биотехнологий, нейротехнологий, виртуальной и дополненной реальности [1].

Спутником четвертой промышленной революции является цифровая трансформация промышленности, связанная с развитием «умного производства», которое подразумевает автоматизированное цифровое производство, управляемое интеллектуальными системами в режиме реального времени. Основу «умного производства» составляет сложная многоуровневая интегрированная информационная структура, преобразующая большинство «горизонтальных» и «вертикальных» производственных и бизнес-процессов, что приводит к оптимизации технологий, операционной деятельности и моделей взаимодействия между участниками технологической цепочки.

В статье раскрывается понятие киберфизической системы управления технологическими процессами, описывается ее основная структура, элементы и связи между ними, а также рассматривается роль и перспективы развития киберфизических систем управления в информационной трансформации промышленности в будущем.

Актуальность и перспективы информационной трансформации промышленности

Актуальность цифровой модернизации промышленности подтверждается анализом рынка «умного производства», проведенным одной из крупнейших исследовательских аналитических компаний MarketsandMarkets [2]. Согласно данным проведенного исследования, рыночная капитализация цифровой промышленности достигнет к 2025 г. около 384,8 млрд долл., при этом среднегодовой прирост составит 12,4 %. Динамика изменения объемов рыночной капитализации «умного производства» на глобальных мировых рынках представлена на рис. 1.

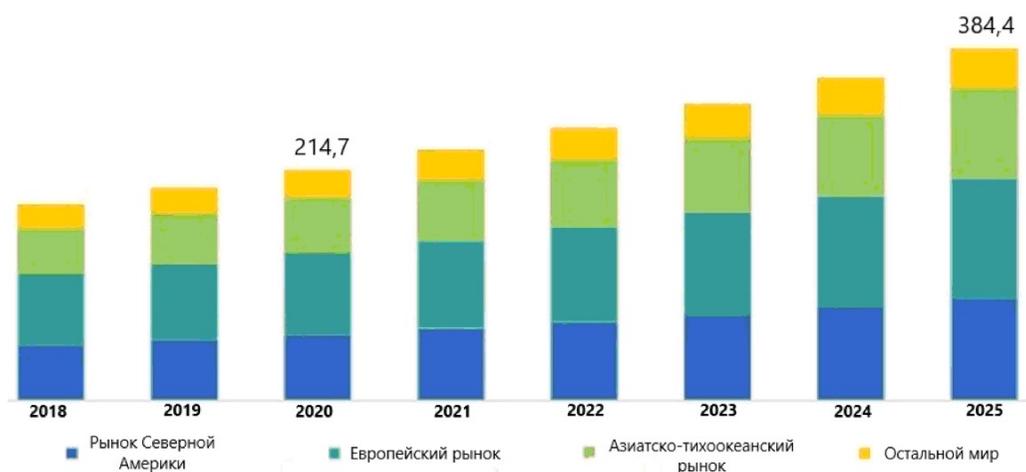


Рис. 1. Динамика рыночной капитализации умного производства в мире, млрд долл.

Среди основных факторов, напрямую влияющих на рост капитализации цифровой промышленности, можно выделить развитие и внедрение информационных технологий и растущую тенденцию промышленной автоматизации и оптимизации производственных и бизнес-процессов, что подтверждается включением правительствами государств Северной Америки, Азиатско-Тихоокеанского

региона и Европы, в том числе и России, промышленной информационной автоматизации в перечень приоритетных направлений развития науки, технологии и техники. К этим факторам также относятся подверженная динамике и постоянно усложняющаяся логистика и постоянное стремление компаний к интеллектуализации производства.

Большинство современных производственных цепочек проектируются с применением концепции Индустрии 4.0. Это позволяет предприятиям быстрее выходить на конкурентоспособный уровень производства и внедрять автоматизированные системы более высокого уровня. В настоящий момент в России уже наметился ряд лидеров, стимулирующих остальных к развитию промышленной цифровизации, среди которых можно отметить «Инфосистемы Джет», «Русавто», «Северсталь», «СУЭК», «Роснефть» [3] и многие другие компании.

Повышение уровня конкурентоспособности России в области цифровой трансформации производства возможно только при внедрении и использовании технологий Индустрии 4.0 [4]. Для этого необходимо решить ряд проблем в существующей модели промышленного производства, связанных с внедрением технологий Индустрии 3.0. Первостепенным решением этих проблем является срочная реализация задач автоматизации и оцифровывания промышленности, включенных в перечень государственной стратегии развития [5].

Государственная стратегия по внедрению технологий Индустрии 4.0 в промышленность России изложена в утвержденной правительством РФ в 2017 г. дорожной карте по развитию инициативы «Передовые производственные технологии». Основной стратегической целью является увеличение доли России на рынке глобальных услуг, соответствующих требованиям Индустрии 4.0, как минимум до 1,5 % (на данный момент доля России составляет примерно 0,28 %) [6].

Помимо государственной инициативы в решении задач цифровой трансформации промышленности необходимо учитывать высокую конкуренцию на рынке данного направления. Как отмечает автор в [7], появление новых высокотехнологичных инструментов трансформации заставляют производителей и операторов совершенствоваться с целью сохранения своего места на рынке. Для сохранения своего положения им критически необходимо формировать новые компетенции, стратегии, бизнес-модели и модели производства, инвестировать в НИОКР, чтобы как минимум остаться на рынке, как максимум – стать ключевыми игроками на новом рынке ИТ-промышленности.

Таким образом, вышеприведенные факты позволяют сделать вывод о том, что в ближайшее время можно ожидать стремительной информационной трансформации промышленности в условиях жесткой конкуренции.

Возникновение понятия «киберфизические системы»

Несомненно, переход к цифровой промышленности, равно как и совершение четвертой промышленной революции, – достаточно длительный процесс. Наряду с промышленной революцией выделяют научную, информационную и культурную революции, которые происходят относительно редко, раз в 50–200 лет. Изобретение парового двигателя ознаменовало первую промышленную революцию, что положительно сказалось на производительности труда в XIX веке. Вторая промышленная революция, произошедшая в начале XX века, характеризуется внедрением массового производства за счет применения конвейерной линии и электричества. Начало 1970-х гг. ознаменовало внедрение и распространение промышленных роботов и повсеместную автоматизацию производства, что при-

вело к третьей промышленной революции. Таким образом, четвертая промышленная революция характеризуется полной цифровизацией промышленности, основана на синтезе новых информационных и промышленных технологий.

Необходимо отметить, что все промышленные революции характеризует появление принципиально новых способов организации промышленного производства и связанных с этим существенных изменений социальных отношений. При этом часто упускают из вида инструментальную революцию, которая представляет собой процесс, происходящий значительно чаще, примерно каждые 10–20 лет [8]. Такого рода революции характеризуются изобретением и распространением до этого неизвестных или известных не в полной мере новых инструментов, программных продуктов, оборудования, технологических подходов и т. д. Таким образом, можно считать, что инструментальные революции являются предпосылками к наступлению более глобальных промышленных революций.

Исследователи феномена киберфизических систем (КФС, CPS, Cyber Physical System) как части инструментальной революции, связанной с Индустрией 4.0, отмечают их возникновение как естественное развитие встраиваемых вычислительных систем (BcC, Embedded Systems, ES), сетевых или распределительных систем (PBcC, Networked Embedded Systems, NES) и беспроводных сенсорных сетей (Wireless Sensor Network, WSN) [9, 10]. Указанные тенденции связаны со стремлением к удешевлению элементной базы вычислительных устройств, увеличению степени их интеграции и надежности, объединению всех элементов в единый производственный комплекс. Таким образом, по мере нарастающей минимизации размеров вычислительных и вспомогательных устройств, а также их тесной интеграции с объектом управления образовался новый вид систем – киберфизические системы.

Термин «киберфизическая система» был введен в 2006 г. на конференции National Science Foundation (NSF) в США [11]. Он был предложен для описания систем, объединяющих в себе физические процессы и информационные технологии и в то же время являющихся распределенными, гетерогенными и масштабируемыми. С тех пор термин получил широкое распространение и стал использоваться в различных областях, включая автоматизацию производства, транспорт, энергетику, медицину и другие.

Литературный анализ показал отсутствие единого, принятого научным сообществом точного определения термина «киберфизические системы». При этом существуют достаточно распространенные определения, которые с определенной степенью полноты описывают данное понятие.

Коллектив экспертов в материалах исследования по будущему науки и техники (STOA) дает следующее определение киберфизических систем (КФС): «КФС – это система взаимодействующих вычислительных элементов, управляющих физическими объектами, включая гуманоидных роботов, искусственный интеллект (AI), Интернет вещей (IoT) и любое устройство или машину, которые подключены к сети информации» [12].

Группа исследователей по направлению «Этические аспекты киберфизических систем» предлагают сразу два определения КФС: «КФС – это интеллектуальные робототехнические системы, связанные с Интернетом вещей, или технические системы сетевых компьютеров, роботов и искусственного интеллекта, которые взаимодействуют с физическим миром» и «КФС – это технические системы, в которых сетевые компьютеры и роботы взаимодействуют с физическим миром. Эти системы могут взаимодействовать с нами во многих областях, дви-

гаться по нашим дорогам, двигаться вместе с нами в нашей повседневной жизни и работать в наших отраслях» [13].

В грантовой программе Cyber-Physical Systems (CPS) NSF 18-538 термину «киберфизические системы» предлагается следующее определение: «КФС – это спроектированные системы, которые построены и зависят от бесшовной интеграции вычислений и физических компонентов. КФС тесно интегрирует вычислительные устройства, управление, сетевую инфраструктуру и восприятие физического мира. Система может включать взаимодействие человека с контролем или не включать. КФС может также включать несколько интерферируемых системных компонентов, работающих в широких разновидностях пространственных и временных масштабов» [14].

Все приведенные определения сводятся к пониманию КФС как интегрированной системы, объединяющей в себе физические процессы и информационные технологии, которая работает в реальном времени, имеет возможность взаимодействия с окружающей средой и способна адаптироваться к изменениям внешних условий. Это определение подчеркивает, что КФС интегрирует физические и информационные компоненты, работает в реальном времени, а также обладает гибкостью и способностью адаптации к изменениям в окружающей среде.

Наряду с КФС исследователи вводят более общее понятие – киберфизические комплексы (КФК), которое также не имеет общепринятой строгой единой трактовки. Под КФК, как правило, понимается результат синтеза нескольких КФС, что позволяет говорить не об отдельной системе, а о совокупности интегрированных и взаимодействующих друг с другом киберфизических систем.

Определение термина «киберфизический комплекс» может иметь различные интерпретации в различных научных и профессиональных сообществах. В наиболее широком смысле киберфизический промышленный комплекс имеет иерархическую модульную организацию, объединяющую киберфизические системы, которые взаимодействуют друг с другом и с внешней средой, а также другие физические системы, предназначенные для решения задач производства, управления и обслуживания, которые возникают в рамках производственного процесса. Комплекс такого рода интегрирует технологические и информационные ресурсы, включает в себя киберфизические компоненты, представляющие собой сочетание физических устройств и систем, которые управляются и контролируются программным обеспечением и сетевыми технологиями, и социальные компоненты (операторы, менеджеры и т. д.), которые взаимодействуют в рамках производственного процесса и образуют единую интегрированную структуру.

Киберфизические системы и киберфизические комплексы в промышленности объединяет направленность на цифровую трансформацию производства конечной продукции (например, валов, турбин, лопастей и т. д.), которое включает в себя совокупность технологических процессов (промежуточных технологических этапов производственной цепочки, например: нагрев, резка, обработка давлением и т. д.). Отдельные технологические стадии также подвергаются цифровизации в рамках оптимизации и интеллектуализации промышленного производства за счет внедрения киберфизических систем управления технологическими процессами (КФСУ ТП).

Киберфизическая система управления технологическим процессом

Определение киберфизической системы управления технологическими процессами должно опираться на приведенные выше общие определения киберфизической системы и в полной мере отражать феномен информационной трансформации промышленного производства. В этом смысле под КФСУ ТП следует понимать автоматизированную, информационную систему, объединяющую вычислительные, измерительные, управляющие, коммуникационные подсистемы и физический технологический процесс или объект управления. При этом КФСУ ТП функционирует в режиме реального времени и позволяет получать информацию о текущем состоянии процесса, а также принимать решения на основе анализа этой информации с целью автоматизации, оптимизации и интеллектуализации производственных процессов и повышения их эффективности.

Рассмотрим отдельно каждую из подсистем, составляющих КФСУ ТП, что позволит определить функциональное назначение и принципиальные особенности функционирования и взаимодействия основных элементов системы.

Под вычислительной подсистемой понимается одна из основных подсистем КФСУ ТП, в которую входят вычисляющие микропроцессоры, инструменты для хранения и обработки информации и т. д. Принципиальной особенностью данной подсистемы является наличие информационных инструментов, характеризующих Индустрию 4.0. Основным из таких инструментов, который часто применяется в промышленном производстве, является цифровой двойник (DT, Digital Twin). Цифровой двойник – это численная или виртуальная модель физического процесса или объекта, максимально приближенно описывающая его функционирование. Значимость цифровых двойников для «умного производства» сложно переоценить, поскольку они используются для тестирования и симуляции различных сценариев и прогнозов поведения объектов управления, оптимизации производственных процессов и обнаружения неисправностей без вмешательства в реальный процесс.

Интернет вещей (IoT, Internet of Things) открывает большие возможности в функционировании КФСУ ТП. Интернет вещей представляет собой систему взаимосвязанных вычислительных устройств, способных к сбору и передаче информации между сопряженными объектами без участия человека. Такой цифровой инструмент позволяет объединять между собой производственные базы, образуя тем самым взаимосвязанную систему, которая в режиме реального времени обменивается информацией, позволяя тем самым управлять режимом работы производства без человека или с косвенным его участием.

Неотъемлемым элементом сложной киберфизической системы являются технологии обработки масштабных и сложных наборов данных в режиме реального времени (Big Data). В общем случае Big Data представляет собой структурированные или неструктурированные массивы информации больших объемов. Обработка таких массивов специальными автоматизированными инструментами открывает КФСУ ТП большие возможности в анализе, статистике, прогнозировании и даже в принятии решений.

Элементами измерительной подсистемы в КФСУ ТП являются датчики и измерительные устройства различного уровня. Прежде всего они являются источником поступающей в вычислительную подсистему информации, где впоследствии эта информация обрабатывается. Измерительные компоненты находятся непосредственно на самом физическом объекте или процессе и на управляющих компонентах.

Управляющая подсистема в КФСУ ТП представляет собой интеллектуальную систему управления (ИСУ), которая ответственна за принятие решений, основанных на анализе данных, и управление физическими процессами. Перспективными инструментами, которые можно эффективно интегрировать в состав КФСУ ТП, являются интеллектуальные технологии управления технологическими процессами и объектами. Они основаны на системном подходе, современной теории управления и методах искусственного интеллекта. Интеллектуальные технологии управления реализуют сразу несколько функций: сбор и предварительная обработка данных, формирование механизма управления, обучение и адаптация, выполнение управляющего воздействия. Новые методы и подходы в области интеллектуальных технологий управления, включающие инженерию знаний, распознавание образов, ассоциативную память, нечеткую логику, нейронные сети и машинное самообучение, позволили открыть новые возможности в решении проблем управления сложными технологическими процессами. Для реализации этих задач в ИСУ целесообразно и наиболее эффективно использовать интеграцию современных классических методов теории управления с методами и подходами Индустрии 4.0.

ИСУ получает данные из других подсистем, которые затем обрабатываются и используются в целях управления технологическими процессами, идентификации объектов управления, адаптации алгоритмов управления. На основе полученных данных и прогнозов ИСУ принимает управленческие решения и передает соответствующие команды физическим компонентам КФСУ ТП. ИСУ может не только адаптироваться к изменяющимся условиям функционирования, но и оптимизировать работу системы в целом. Она обладает способностью самостоятельно обучаться на основе новых данных и улучшать свою работу с течением времени. ИСУ является ключевой частью КФСУ ТП, которая позволяет автоматизировать и оптимизировать технологические процессы в различных отраслях промышленности.

Коммуникационная подсистема в КФСУ ТП отвечает за взаимосвязь как между остальными компонентами системы, так и между различными КФСУ, интегрированными друг с другом, например в киберфизическом комплексе. Взаимосвязь компонентов может обеспечиваться как с использованием сетевых или распределительных систем (PBC, Networked Embedded Systems, NES), беспроводных сенсорных сетей (Wireless Sensor Network, WSN), так и при помощи Интернета вещей (IoT, Internet of Things).

Физический процесс или объект – это непосредственно объект управления, который полностью интегрирован в КФСУ ТП посредством соединения его с вычислительной подсистемой через измерительную, управляющую и коммуникационную подсистемы.

КФСУ ТП функционирует в режиме реального времени и автоматически обрабатывает запросы пользователей, а также приспосабливается к изменениям, вызванным воздействиями внешних сил.

Структура киберфизической системы управления технологическим процессом

Функционирование киберфизической системы управления технологическим процессом может быть представлено как взаимодействие ее основных подсистем, описанных выше. Несмотря на сложность и многоцелевую направленность функционального назначения подсистем КФСУ ТП все выполняемые подсисте-

мами функции могут быть условно разделены на три основные реализуемые системой задачи: моделирование, управление и анализ [15] (рис. 2).

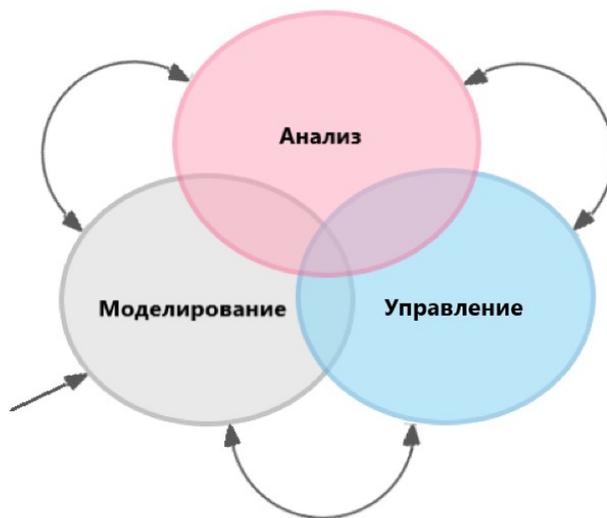


Рис. 2. Основные задачи КФСУ ТП

Одни и те же функции подсистем могут быть нацелены на реализацию только одной или одновременно нескольких задач, которые, в свою очередь, могут решаться как последовательно, так и параллельно. При этом содержание указанных задач следует понимать в расширенном смысле, как это описано в предыдущем разделе, а схема на рис. 2 дает лишь предельно упрощенное представление о возможной аналогии между КФСУ ТП и традиционными АСУ ТП, которую необходимо иметь в виду несмотря на существующие принципиальные отличия между данными системами. Таким образом, функциональная направленность работы КФСУ ТП заключается в итеративном и параллельном выполнении описанных выше функций с целью реализации трех основных задач.

Исходя из представленного описания киберфизической системы управления технологическим процессом можно представить ее обобщенную схему, как показано на рис. 3.

Киберфизические системы имеют два иерархических уровня: вычислительный (информационный) и прикладной (физический) [16]. Это в полной мере относится и к КФСУ ТП. При этом к информационному уровню относятся вычислительная, измерительная, управляющая и коммуникационная подсистемы, а к прикладному – физический процесс или объект управления.

На основе определения основных функций КФСУ ТП и анализа ее обобщенной иерархической структуры можно выделить ряд признаков, которым должна отвечать КФСУ ТП:

1. Признак гибридности: КФСУ ТП строится по принципу интеграции информационно-вычислительной части с физическим процессом или объектом.
2. Высокая степень автоматизации: КФСУ обычно работает без постоянного контроля оператора, поскольку использует специальные методы и искусственный интеллект для принятия решений и управления физическими объектами.

3. Признак автономности: КФСУ ТП можно признать полностью автономной только в случае вхождения в состав вычислительного компонента ИИ, отвечающего за принятие решений без участия человека.

4. Признак адаптивности и гибкости: КФСУ ТП должна подстраиваться под требования пользователя или под изменения, вызванные действиями внешних сил.

5. Признак целостности: каждый компонент КФСУ ТП в достаточной мере связан с другими компонентами, образуя тем самым взаимосвязанную систему, поэтому при ее рассмотрении необходимо использовать системные подходы и методы системного анализа.

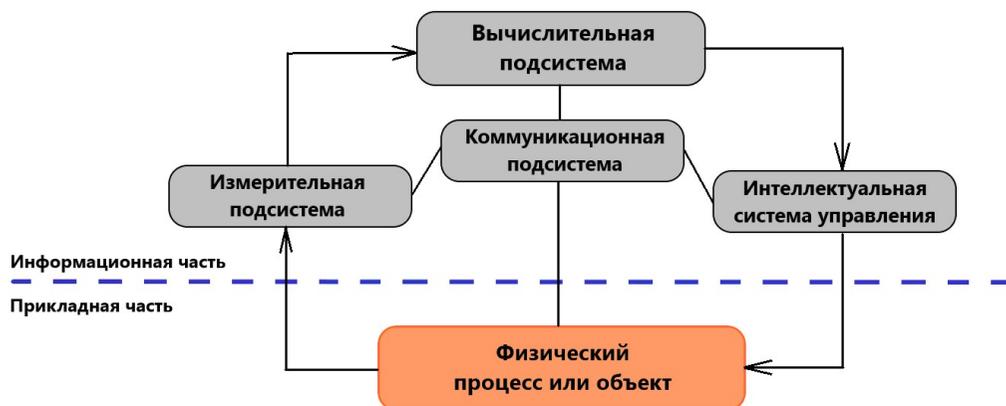


Рис. 3. Обобщенная схема КФСУ ТП

Другими неотъемлемыми признаками КФСУ ТП являются: обработка данных в реальном времени, гибкость и масштабируемость, безопасность использования информации и др., что свидетельствует о значительном потенциале применения таких систем в соответствии с современными тенденциями развития промышленного производства.

КФСУ ТП имеют принципиальные отличия от традиционных АСУ ТП, которые часто не способны адаптироваться к быстро изменяющимся условиям и, как правило, выполняют только функции автоматического управления технологическими процессами производства типовых изделий. В связи с этим перестройка существующего производства, построенного на принципах традиционных систем управления, может занимать значительное количество времени, требовать существенного технического переоснащения и прохождения многочисленных согласований и управленческих решений. КФСУ ТП позволяют создавать более гибкие и адаптивные производственные схемы, способные быстро реагировать на изменения спроса и условий производства, повышая его эффективность и обеспечивая конкурентное преимущество на рынке.

Значимость КФСУ ТП для современного информационного промышленного преобразования сложно переоценить. Прежде всего, идеи и принципы КФСУ ТП хорошо согласуются с современными тенденциями «умного производства» при возможности использования преимуществ традиционных методов и принципов построения систем автоматического управления. Дополнительным достоинством КФСУ ТП является возможность реализации массового производства товаров по индивидуальным заказам, то есть нетиповых изделий, при сохранении оптовых

цен, за счет гибкости и адаптивности. Таким образом, внедрение КФСУ ТП способно эффективно поменять традиционные подходы к оптимизации и интеллектуализации технологических процессов, включая организацию производственных цепочек в целом. Это позволит организовать выпуск широкой номенклатуры товаров в рамках одного производственного комплекса с максимально возможным качеством, при минимальных затратах и за максимально короткие сроки перестройки системы в постоянно изменяющихся внешних условиях.

Заключение

Рассмотренные в данной статье вопросы раскрывают сущность общих понятий киберфизических систем, киберфизических комплексов и киберфизических систем управления технологическими процессами. КФСУ ТП, являющиеся инструментом происходящей в данный момент четвертой промышленной революции, в полной мере влияют на современное промышленное производство и экономику. Современная информационная трансформация типового массового промышленного производства характеризуется существенным ростом уровня автоматизации, оптимизации и интеллектуализации процессов управления, принятия решений, отчетности, аналитики и т. д. Благодаря свойству адаптивности и гибкости КФСУ ТП ожидается их стремительное развитие и внедрение в промышленное производство широкой номенклатуры изделий для быстрого и конкурентоспособного реагирования на изменяющуюся рыночную ситуацию. Значимость КФСУ ТП в современной технологической трансформации подтверждается ростом капитализации «умного производства» в мире, поскольку только за последние 5 лет среднегодовой прирост капитала информационного производства составил 12,4 %.

Кроме того, внедрение в технологический процесс цифровых интеллектуальных элементов позволит повысить производительность труда, а внедрение интеллектуальных систем управления в составе КФСУ ТП позволит существенно сократить влияние «человеческого фактора» за счет оптимальной перестройки промышленного производства, рационального распределения нагрузки оборудования, снижения негативного воздействия на окружающую среду [17], сокращения времени принятия решений и т. д.

С учетом темпов развития интеллектуального производства и ежегодного прироста капитала в развитие информационных технологий ожидается бурное развитие и повсеместное распространение КФСУ ТП, что можно будет увидеть в ближайшее время.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шваб К. Технологии Четвертой промышленной революции. М.: Эксмо, 2018. 320 с.
2. SMART MANUFACTURING MARKET // MARKETSandMARKETS. URL: https://www.marketsandmarkets.com/practices/SmartManufacturing?+utm_source=IEEE (дата обращения: 21.02.2023).
3. Моисеев В. Интеллектуализация производства: реальные примеры. URL: <https://iot.ru/promyshlennost/intellektualizatsiya-proizvodstva-realnye-primery> (дата обращения: 12.02.2023).
4. Капустина Л.М., Кондратенко Ю.Н. Проблемы конкурентоспособности России в условиях развития Индустрии 4 // Фундаментальные и прикладные исследования в области управления, экономики и торговли. СПб, 2017. С. 191–196.
5. Кондратенко Ю.Н. «Умное» предприятие в промышленности региона: понятие и перспективы // Урал – XXI век: регион инновационного развития: материалы II Междунар. науч.-практ. конф. Екатеринбург, 2017. С. 158–165.

6. Россия 4.0: четвертая промышленная революция как стимул глобальной конкурентоспособности // ТАСС. URL: <http://tass.ru/pmef-2017/articles/4277607> (дата обращения: 11.02.2023).
7. *Martin Mikusz*. Towards an understanding of cyber-physical systems as industrial software-product-service systems // Conference paper in Procedia CIRP. 2014.
8. *Чеклецов В.В.* Чувство планеты. Интернет вещей и следующая технологическая революция. М.: Российский исследовательский центр по Интернету вещей, 2013. 130 с..
9. A 21st Century Cyber-Physical Systems Education. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. 2016 Washington, DC: The National Academies Press.
10. *Lee E.A., Seshia S.A.* Introduction to Embedded Systems – A Cyber-Physical Systems Approach, Second Edition. MIT Press, 2017.
11. *Colombo A., Bangemann T.* Industrial Cloud-based Cyber-physical Systems: The IMC-AESOP Approach. Cham Springer International Publishing, 2014. 245 p.
12. European Parliament. Panel for the Future of Science and Technology (STOA). URL: <https://www.europarl.europa.eu/stoa/en/home/highlights> (дата обращения: 19.01.2023).
13. Ethical Aspects of Cyber-Physical Systems. URL: <http://www.europarl.europa.eu> (дата обращения: 19.01.2023).
14. Cyber-Physical Systems. Program solicitation NSF 18-538. URL: <https://www.nsf.gov> (дата обращения: 19.01.2023).
15. *Lee E.A., Seshia S.A.* Introduction to Embedded Systems – A Cyber-Physical Systems Approach. LeeSeshia.org, 2011.
16. *Горбачев Я.Г., Платунов А.Е., Пинкевич В.Ю., Кольчурин М.В.* Киберфизические системы. Методы высокоуровневого проектирования. СПб: Университет ИТМО, 2022. 48 с.
17. *Денисов А.А.* Современные проблемы системного анализа: учебник. 3-е изд. СПб. : Изд-во Политехнического университета, 2008. 291–293 с.

Статья поступила в редакцию 24 февраля 2023 г.

PURPOSE AND PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF CYBERPHYSICAL SYSTEMS FOR TECHNOLOGICAL PROCESSES

K.S. Peshkin*

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

E-mail: kir.peschkin@yandex.ru

Abstract: *The article is devoted to a new way of organizing production that is actively developing in the conditions of the industry's information transformation associated with the introduction of cyber-physical systems. Market analysis shows a positive trend in the growth of capitalization of this industry, indicating the widespread use of digital transformation tools for production and increased investment in the development of information technologies, including the creation and implementation of cyber-physical systems. The article analyzes the existing definitions of "cyber-physical systems" and "cyber-physical complexes." It also reveals the concept of a cyber-physical control system for the technological processes" and describes its main structure. The cyber-physical control system is considered a number of interconnected subsystems that perform strictly defined functions. The article presents a description of each of these subsystems, a generalized scheme of their hierarchical connections, and interactions. The article also considers the role of cyber-physical control systems in the information transformation of the industry and discusses the prospects for their future development.*

Keywords: *Industry 4.0, cyber-physical systems, cyber-physical complexes, intelligent control system, digital twin, technological process.*

REFERENCES

1. *Shvab K. Tekhnologii Chetvertoï promyshlennoï revolyucii [Technologies of the Fourth Industrial Revolution] M.: Eksmo, 2018. 320 p. (In Russian).*
2. SMART MANUFACTURING MARKET // MARKETSandMARKETS. URL: https://www.marketsandmarkets.com/practices/SmartManufacturing?+utm_source=IEEE (accessed February 21, 2023).
3. *Moiseyev V. Intellektualizatsiya proizvodstva: real'nye primery [Intellectualization of production: real examples]. URL: <https://iot.ru/promyshlennost/intellektualizatsiya-proizvodstva-realnye-primery> (accessed February 12, 2023). (In Russian).*
4. *Kapustina L.M., Kondratenko Yu.N. Problemy konkurentosposobnosti Rossii v usloviyah razvitiya Industrii 4 [Problems of Russia's competitiveness in the conditions of Industry development 4] // Fundamental and applied research in the field of management, economics and trade. SPb., 2017. P. 191–196. (In Russian).*
5. *Kondratenko Yu.N. «Umnoe» predpriyatie v promyshlennosti regiona: ponyatie i perspektivy ["Smart" enterprise in the industry of the region: the concept and prospects] // Ural – XXI century: the region of innovative development: materials of the II International. scientific and practical conferences. Ekaterinburg, 2017. P. 158–165. (In Russian).*
6. *Russia 4.0: the Fourth Industrial Revolution as an incentive for global competitiveness // TASS. URL: <http://tass.ru/pmef-2017/articles/4277607> (accessed February 11, 2023).*
7. *Martin Mikusz. Towards an understanding of cyber-physical systems as industrial software-product-service systems // Conference paper in Procedia CIRP. 2014.*
8. *Chyckletsov V.V. Chuvstvo planety. Internet veshchej i sleduyushchaya tekhnologicheskaya revolyuciya [The feeling of the planet. The Internet of Things and the next technological revolution]. M.: Russian Research Center for the Internet of Things, 2013. 130 p. (In Russian).*

* Kirill S. Peshkin, Postgraduate Student.

9. A 21st Century Cyber-Physical Systems Education. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. 2016 Washington, DC: The National Academies Press.
10. *Lee E.A., Seshia S.A.* Introduction to Embedded Systems – A Cyber-Physical Systems Approach, Second Edition. MIT Press, 2017.
11. *Colombo A., Bangemann T.* Industrial Cloud-based Cyber-physical Systems: The IMC-AESOP Approach. Cham Springer International Publishing, 2014. 245 p.
12. European Parliament. Panel for the Future of Science and Technology (STOA). URL: <https://www.europarl.europa.eu/stoa/en/home/highlights> (accessed January11, 2023).
13. Ethical Aspects of Cyber-Physical Systems. URL: <http://www.europarl.europa.eu> (accessed January19, 2023).
14. Cyber-Physical Systems. Program solicitation NSF 18-538. URL: <https://www.nsf.gov> (accessed January19, 2023).
15. *Lee E.A., Seshia S.A.* Introduction to Embedded Systems – A Cyber-Physical Systems Approach. LeeSeshia.org, 2011.
16. *Gorbachev Ya.G., Platunov A.Ye., Pinkyevich V.Yu., Kol'churin M.V.* Kiberfizicheskie sistemy. Metody vysokourovneвого proektirovaniya [Cyberphysical systems. Methods of high-level design]. SPb: ITMO University, 2022. 48 p. (In Russian).
17. *Dyenisov A.A.* Sovremennye problemy sistemnogo analiza [Modern problems of system analysis: textbook. 3rd edition]. SPb.: Polytechnic University Publishing House, 2008. 291–293 p. (In Russian).

Энергетика и электротехника

УДК 629.3.027.3+629.3.064.5

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И СТРУКТУРЫ СИСТЕМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ ПОПЕРЕЧНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ АВТОМОБИЛЯ

*А.М. Абакумов, А.А. Горячкин, В.Н. Овсянников**

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: Abakumov-am@yandex.ru, gor.al.al@yandex.ru, ovsyannikov0512@mail.ru

Аннотация. В настоящее время интенсивно ведутся исследования по совершенствованию эксплуатационных характеристик автомобиля: виброзащитности, плавности хода, устойчивости, управляемости. Указанные свойства в значительной мере определяются характеристиками подвески автомобиля, обеспечивающей связь между несущей системой и колесами. Существенное внимание уделяется разработке активных подвесок, в которых для формирования необходимых характеристик применяются дополнительные исполнительные элементы, в частности линейные двигатели постоянного тока. Использование активных исполнительных элементов позволяет управлять положением кузова автомобиля, в том числе его поперечным креном. В статье получены соотношения, утаивающие зависимость дополнительных упругих деформаций в подвеске и угла крена автомобиля от центробежной силы в стационарном режиме. При разработке линеаризованной математической модели объекта управления для исследования нестационарных режимов использована двухмассовая расчетная схема и получены операторные уравнения, учитывающие упруго-диссипативные свойства поддресоренной и неподдресоренной частей автомобиля, а также дополнительное управляющее воздействие, создаваемое исполнительным элементом. Показано, что динамические свойства исследуемого объекта управления могут быть приближенно описаны передаточными функциями аperiodического звена второго порядка либо колебательного звена. Для первого случая разработана одноконтурная система, замкнутая по углу крена с ПИД-регулятором. Во второй ситуации целесообразно применять двухконтурную систему с внутренним контуром гибкой обратной связи по деформации подвески и внешним контуром, замкнутым по углу крена с использованием ПИД-регулятора. Показана возможность формирования сигнала обратной связи по скорости деформации

* Александр Михайлович Абакумов, доктор технических наук, профессор кафедры электромеханики и автомобильного электрооборудования.

Александр Александрович Горячкин, аспирант кафедры электромеханики и автомобильного электрооборудования.

Владимир Николаевич Овсянников, кандидат технических наук, доцент кафедры электромеханики и автомобильного электрооборудования.

подвески во внутреннем контуре с помощью датчика ЭДС линейного двигателя постоянного тока.

На основе структурной схемы разработана компьютерная модель системы, и для типичных параметров объекта управления проведено исследование переходных процессов отработки возмущения в виде изменения центробежной силы. По результатам моделирования установлено, что использование разработанной САУ обеспечивает высокую точность стабилизации угла крена автомобиля.

Ключевые слова: *поперечная устойчивость автомобиля, система стабилизации угла крена, линейный двигатель.*

Введение

В современном автомобилестроении значительное внимание уделяется проблемам обеспечения виброзащиты, плавности хода, устойчивости, управляемости автотранспортных средств [1]. Среди большого разнообразия устройств и систем управления, обеспечивающих решение указанных проблем, важное место занимают системы обеспечения поперечной устойчивости автомобиля (транспортного средства) [2].

Системы и устройства стабилизации поперечной устойчивости в значительной мере обеспечивают комфортабельность и безопасность движения и, в частности, определяют предельные скорости маневров «переставка» и «вход в поворот».

Решение задачи повышения показателей поперечной устойчивости непосредственно связано с совершенствованием конструкции подвески и систем управления ее элементами.

Подвеска транспортного средства – это совокупность устройств, связывающих мост или колеса с рамой (кузовом) автомобиля и предназначенных для уменьшения динамических нагрузок, передающихся автомобилю при движении по неровностям опорой поверхности дороги, а также обеспечивающих передачу всех сил и моментов, действующих между колесами и рамой (кузовом) [3].

Подвеска содержит параллельно соединенные упругий элемент – пружину и демпфирующий элемент, установленные между ступицей колеса и кузовом автомобиля.

Традиционный механический стабилизатор поперечной устойчивости как составляющий элемент подвески выполняется в виде П-образного стержня (торсиона), концы которого соединены через тяги с нижней частью подвески одной оси, как правило передней, а средняя часть закреплена на кузове с возможностью поворота [4].

При кренах автомобиля под действием центробежной силы упругие элементы подвески внешних по отношению к центру поворота колес сжимаются, упругий стержень закручивается и создает сжимающее усилие упругих элементов подвески внутренних колес, что уменьшает крен кузова автомобиля.

Требования к характеристикам подвески имеют противоречивый характер: для повышения эффективности стабилизации крена требуется обеспечить увеличение жесткости скручивания стержня стабилизатора, однако при этом утрачивается независимость отдельных подвесок, что приводит к ухудшению виброзащитных свойств и проходимости автомобиля. Ухудшение виброзащиты связано с появляющейся взаимосвязью подвесок, когда движение колеса одной стороны по неровностям через стабилизатор создает реактивное действие в под-

веске связанного колеса. Проходимость автомобиля снижается вследствие ограничения стабилизатором хода подвески.

Для устранения отмеченных противоречий используют стабилизаторы с активным разделением торсионного стержня на две части, которые в зависимости от дорожной ситуации могут соединяться или разъединяться гидравлическим либо электромеханическим исполнительным элементом [2]. Дополнительный эффект стабилизации достигается при использовании систем управления, обеспечивающих активное закручивание частей торсионного стержня.

Нашли также применение полностью гидравлические системы стабилизации крена, в которых для формирования требуемых силовых воздействий на подвеску используются управляемые гидроцилиндры.

Перспективными для решения рассматриваемых задач, особенно учитывая тенденции развития электромобиля, являются исполнительные элементы в виде линейных двигателей [5, 6]. Линейный двигатель устанавливается параллельно упругому элементу и амортизатору традиционной подвески каждого колеса одной или двух осей. Это позволяет обеспечить независимую работу подвесок при отработке неровностей полотна дороги и повысить плавность движения. В случае входа в поворот по информации об угле поворота рулевого колеса и скорости движения система переключается в режим стабилизации крена и обеспечивается взаимосвязанное управление подвесками соответствующей оси.

В предлагаемой статье рассмотрена математическая модель объекта управления, ориентированная на исследование системы управления углом крена автомобиля, приведена методика синтеза регулятора системы управления креном и обсуждаются результаты компьютерного моделирования динамических характеристик системы.

Актуальность темы исследования определяется также тем, что в известных публикациях приводится в основном описание принципа действия систем активного управления подвеской и не рассматриваются математические модели объекта управления, что не позволяет использовать известные в теории управления методики анализа и синтеза систем управления.

Математическая модель объекта управления

При построении математической модели объекта управления в качестве выходной координаты рассматривается угол крена автомобиля, порождаемый действием центробежной силы на повороте. Для парирования этого возмущения используется управляющее воздействие в виде дополнительного усилия в подвеске, создаваемого исполнительным элементом.

Схема сил, действующих на автомобиль и подвеску при повороте, приведена на рис. 1.

На рис. 1, *a* показан вид сверху движения автомобиля по окружности радиуса R . При расчете сил используются общепринятые для подобных задач допущения; в частности, кузов автомобиля считают абсолютно жестким телом и принимают, что подрессоренная масса автомобиля m_2 сосредоточена в точке – центре масс.

Расположение центра масс опишем относительно точек опирания на подвеску. Так как расположение подвесок по продольной оси автомобиля совпадает с расположением ходовых осей, то центр масс подрессоренной части автомобиля находится на расстоянии a_1 и a_2 от осей ходовой части автомобиля, где $a_1 + a_2 = a$ – расстояние между осями ходовой части автомобиля.

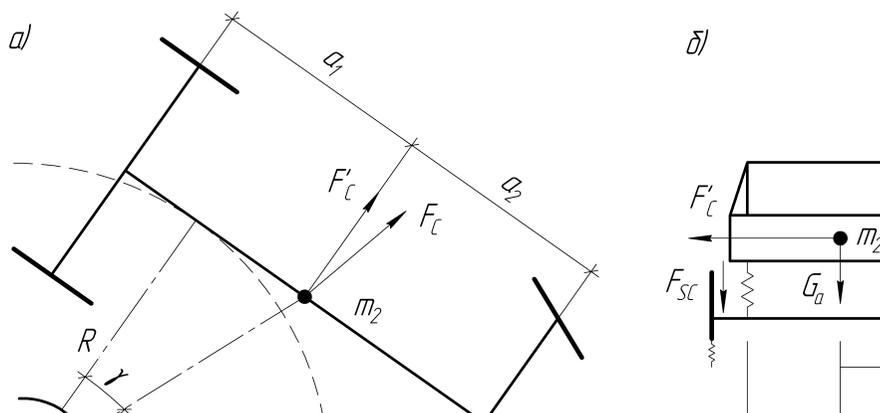


Рис. 1. Схема сил, действующих на автомобиль и подвеску на повороте:
a – вид сверху; *б* – вид сбоку

Аналогично по вертикальной (нормальной) оси (рис. 1, *б*): $b_1 + b_2 = b$ – расстояние между точками крепления поддрессоренной части автомобиля к подвескам. Значение b для передней и задней ходовых осей может отличаться. В таком случае при расчете усилий значение b применяется для соответствующей оси.

Расположение центра масс по поперечной оси автомобиля относительно точек крепления поддрессоренной части автомобиля к подвескам обозначим h (рис. 1, *б*). Значение h для передней и задней ходовых осей может отличаться. В таком случае при расчете усилий значение h применяется для соответствующей оси. Центр масс может располагаться ниже точек крепления поддрессоренной части автомобиля к подвескам. В этой ситуации направление вектора силы F_{SC} , действующей на подвеску при повороте, изменится на противоположное.

Расчет сил, действующих на автомобиль при повороте в режиме установившегося движения, в общем виде приводится в [7, 8]. Однако авторы приводят расчет в упрощенной форме, не позволяющей рассчитать усилия на подвеску при повороте.

На объект массой m_2 , движущийся со скоростью V по окружности радиусом R , действует центробежная сила F_C :

$$F_C = \frac{m_2 V^2}{R}.$$

В случае поворота с заносом направление центробежной силы изменяется, что влечет за собой изменение сил, действующих на подвески [7]:

$$F'_C = F_C \cos(\gamma).$$

Дополнительное усилие, действующее на автомобиль на поворотах, приводит к упругим деформациям подвески и неподдрессоренной массы. В соответствии с рис. 1, *б* взаимосвязь деформирующего усилия в подвеске с центробежной силой для «малых» отклонений может быть описана коэффициентом передачи:

$$k_{SC} = \frac{F_{SC}}{F_C} = \frac{h_n b_n \cos(\gamma)}{a_n^2 + b_n^2 + h_n^2}, \quad (1)$$

где индекс n ($n=1$ или $n=2$) определяет геометрический размер, связывающий рассматриваемую подвеску с центром масс в соответствии с рис. 1.

Рассмотрим ситуацию, когда заноса автомобиля не происходит, то есть угол $\gamma = 0$, и пренебрежем смещением центра масс. В таком случае выражение (1) примет вид:

$$k_{SC} = \frac{F_{SC}}{F_C} = \frac{h_n b_n}{a_n^2 + b_n^2 + h_n^2}.$$

В стационарном режиме деформация подвески и неподдресоренной массы определяется эквивалентной жесткостью C :

$$\delta Z = \frac{k_{SC} F_C}{C}.$$

В ситуации, когда центр масс находится на пересечении продольной и поперечной осей ($a_1 = a_2$, $b_1 = b_2$) и автомобиль входит в поворот без заноса, угол крена автомобиля α на повороте определяется только параметром b и величиной δZ :

$$\alpha = \arctg\left(\frac{2\delta Z}{b}\right). \quad (2)$$

Если рассматривать ситуацию со смещением центра масс, то величина воздействия на подвески будет различной, соответственно величина деформаций подвесок также будет различной. С учетом этого выражение (2) преобразуется:

$$\alpha = \arctg\left(\frac{\delta Z_L + \delta Z_R}{b}\right),$$

где δZ_L и δZ_R – деформация левой и правой подвески соответственно.

Изменение угла крена в переходных режимах и поворот автомобиля вокруг продольной оси, проходящей через центр тяжести, приведут к возникновению инерционного (динамического) момента $M = J \frac{d^2 \alpha}{dt^2}$, где J – момент инерции автомобиля относительно продольной оси. Этот момент несущественно влияет на перераспределение усилий в поддресоренной и неподдресоренной частях автомобиля, и его действием пренебрегают [9].

Система стабилизации угла крена содержит аналогичные каналы, формирующие управляющие воздействия на подвески. Направление крена определяется по знаку сигнала датчика крена. При этом в замкнутых контурах управления, внешних и внутренних по отношению к центру поворота подвесок, исполнительными элементами создаются противоположные по знаку дополнительные усилия (на сжатие или отбой). Вводя допущение о том, что центр масс находится на пересечении продольной и поперечной осей автомобиля, и учитывая ана-

логию каналов и реализуемых алгоритмов управления, далее будем рассматривать систему управления отдельной подвеской.

Для исследования динамики объекта управления должны быть учтены упруго-диссипативные свойства подвески. Используем расчетную схему двухмассовой колебательной системы, представленную на рис. 2, где обозначено: m_1 , m_2 – неподрессоренная и поддрессоренная масса; C_1 , C_2 и β_1 , β_2 – жесткости и коэффициенты вязкого трения неподрессоренных и поддрессоренных элементов подвески соответственно; Z_1 , Z_2 , Z_0 – перемещения неподрессоренной и поддрессоренной масс и кинематическое воздействие со стороны дорожного полотна соответственно.

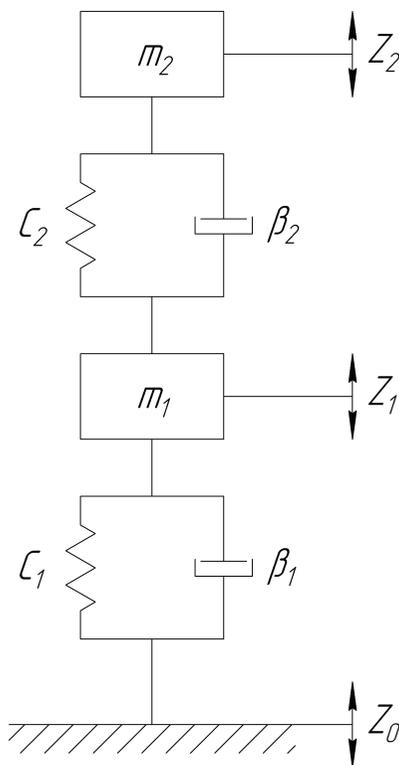


Рис. 2. Расчетная схема двухмассовой колебательной системы

На основе уравнений Лагранжа второго рода дифференциальные уравнения движения для «малых» отклонений расчетной колебательной системы с учетом дополнительного силового воздействия F_M , создаваемого исполнительным элементом, и усилия F_C , порождаемого в подвеске центробежной силой, получены в виде:

$$m_1 \frac{d^2 Z_1}{dt^2} = \beta_1 \left(\frac{dZ_0}{dt} - \frac{dZ_1}{dt} \right) + C_1 (Z_0 - Z_1) - \left[\beta_2 \left(\frac{dZ_1}{dt} - \frac{dZ_2}{dt} \right) + C_2 (Z_1 - Z_2) \pm F_M \pm F_C \right]; \quad (3)$$

$$m_2 \frac{d^2 Z_2}{dt^2} = \beta_2 \left(\frac{dZ_1}{dt} - \frac{dZ_2}{dt} \right) + C_2 (Z_1 - Z_2) \pm F_M \pm F_C. \quad (4)$$

Преобразовав по Лапласу (3) и (4), получим:

$$m_1 Z_1(p) p^2 = (\beta_1 p + C_1)(Z_1(p) - Z_0(p)) - (\beta_2 p + C_2) \pm F_M(p) \pm F_C(p); \quad (5)$$

$$m_2 Z_2(p) p^2 = (\beta_2 p + C_2)(Z_1(p) - Z_2(p)) \pm F_M(p) \pm F_C(p) = 0. \quad (6)$$

Введем обозначения

$$A_1(p) = \beta_1 p + C_1, \quad A_2(p) = \beta_2 p + C_2 \quad (7)$$

и запишем уравнения (5), (6) с учетом (7) в виде

$$Z_1(p) = \frac{1}{m_1 p^2} \{ A_1(p) [Z_0(p) - Z_1(p)] - A_2(p) [Z_1(p) - Z_2(p)] \pm F_M(p) \pm F_C(p) \}; \quad (8)$$

$$Z_2(p) = \frac{1}{m_2 p^2} \{ A_2(p) [Z_1(p) - Z_2(p)] \pm F_M(p) \pm F_C(p) \}. \quad (9)$$

Приведенной системе операторных уравнений (8) – (9) соответствует структурная схема объекта управления, приведенная на рис. 3.

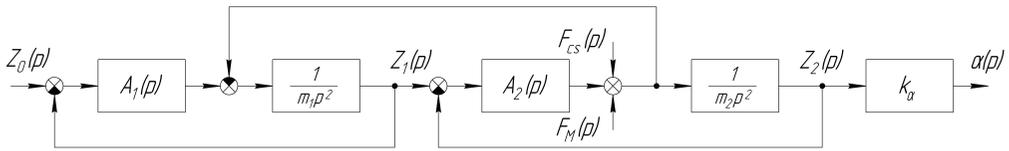


Рис. 3. Структурная схема объекта управления

В соответствии со структурной схемой после преобразований передаточная функция объекта по управляющему воздействию в виде усилия, создаваемого исполнительным элементом, и выходной переменной – углом крена – может быть представлена в виде

$$W_u(p) = \frac{\alpha(p)}{F_M(p)} = W_{u1}(p) k_\alpha, \quad (10)$$

где

$$W_{u1}(p) = \frac{Z_2(p)}{F_M(p)} = \frac{1/C_2 (T_{11}^2 p^2 + T_{12} p + 1)}{(T_{11}^2 p^2 + T_{12} p + 1)(T_{21}^2 p^2 + T_{22} p + 1) + C_2/C_1 T_{21}^2 (T_{22} p + 1) p^2}; \quad (11)$$

$$k_\alpha = \frac{\alpha}{Z_2}; \quad T_{11} = \sqrt{\frac{m_1}{C_1}}; \quad T_{12} = \frac{\beta_1}{C_1}; \quad T_{21} = \sqrt{\frac{m_2}{C_2}}; \quad T_{22} = \frac{\beta_2}{C_2}. \quad (12)$$

Для рассматриваемого объекта управления жесткость C_1 существенно выше C_2 , а m_1 на порядок меньше m_2 . Соответственно, T_{11} на порядок меньше

T_{21} . С учетом этого, как показывает анализ, вторым слагаемым в знаменателе (11) без существенной погрешности можно пренебречь и на этапе структурно-параметрического синтеза использовать приближенную передаточную функцию

$$W_{u1}(p) = \frac{1/C_2}{T_{21}^2 p^2 + T_{22} p + 1}. \quad (13)$$

Структурно-параметрический синтез САУ

Система стабилизации угла крена автомобиля может быть реализована на основе как принципа управления по возмущению, так и принципа управления по отклонению. В первом случае для расчета центробежной силы может использоваться информация о скорости автомобиля и угле поворота рулевого колеса либо об ускорении по поперечной оси автомобиля, получаемая с помощью акселерометра.

Имея в виду известные недостатки систем со связью по возмущению, предпочтительно использовать принцип управления по отклонению и выполнять систему замкнутой по углу крена автомобиля.

Структурная схема такой системы приведена на рис. 4.

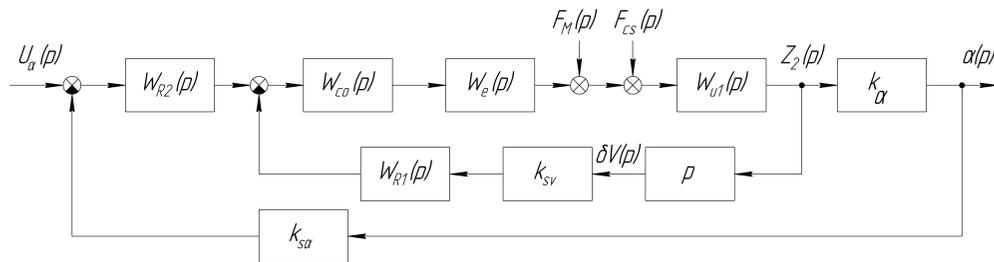


Рис. 4. Структурная схема системы управления углом крена автомобиля

Она наряду со звеньями, отражающими динамические свойства объекта управления, содержит в прямой цепи передаточные функции регулятора $W_{R2}(p)$, управляемого силового преобразователя $W_{co}(p)$, исполнительного элемента $W_e(p)$ и звено с коэффициентом передачи датчика угла крена $k_{s\alpha}$ в цепи обратной связи.

Назначение дополнительной цепи обратной связи (звенья $W_{R1}(p)$, k_{sv}) поясняется далее.

Рассматривается работа системы стабилизации угла крена при движении на повороте по дороге без неровностей дорожного полотна: $Z_0 = 0$.

Электрохимические исполнительные элементы и силовые управляемые преобразователи имеют высокое быстродействие, и их динамика может быть учтена передаточными функциями аperiодических звеньев:

$$W_e(p) = \frac{k_e}{T_e p + 1},$$

$$W_{co}(p) = \frac{k_{co}}{T_{co} p + 1}.$$

Постоянная времени исполнительного элемента T_e и управляемого силового преобразователя T_{co} , как правило, на порядок меньше постоянных T_{21} и T_{22} , что позволяет при синтезе регулятора принять

$$T_{\mu} = T_{co} + T_e$$

за «малую» постоянную времени и представить их эквивалентную передаточную функцию в виде

$$W_{co}(p)W_e(p) \approx \frac{k_{co}k_e}{T_{\mu}p + 1}. \quad (14)$$

Для синтеза регуляторов передаточную функцию (13) необходимо привести к типовому виду. При выполнении условия

$$T_{22} \geq 2T_{21} \quad (15)$$

выражение (13) преобразуется к виду передаточной функции двух апериодических звеньев

$$W_{u1}(p) = \frac{1/C_2}{(T_{01}p + 1)(T_{02}p + 1)}, \quad (16)$$

где

$$T_{01,02} = \frac{T_{22} \pm \sqrt{T_{22}^2 - 4T_{21}^2}}{2}. \quad (17)$$

Соответственно передаточная функция нескорректированной разомкнутой системы с учетом (14) будет

$$W_{op1}(p) = \frac{k_e k_{co} k_{\alpha} k_{s\alpha} / C_2}{(T_{01}p + 1)(T_{02}p + 1)(T_{\mu}p + 1)}. \quad (18)$$

Система в этом случае выполняется как одноконтурная, и синтез регулятора ведется известными методами, используемыми при построении систем подчиненного регулирования координат [10, 11, 12].

Для компенсации «больших» постоянных времени и придания системе астатических свойств в системе используется ПИД-регулятор

$$W_{R2}(p) = \frac{(T_{R1}p + 1)(T_{R2}p + 1)}{T_{R3}p},$$

постоянные времени которого для выполнения условий модульного оптимума выбираются по соотношениям:

$$T_{R1} = T_{01}; \quad T_{R2} = T_{02}; \quad T_{R3} = \frac{2k_e k_{co} k_{\alpha} k_{s\alpha} T_{\mu}}{C_2}.$$

Если условие (15) не выполняется, что имеет место в случае слабого демпфирования в упруго-диссипативной системе, выражение (13) преобразуются к виду передаточной функции колебательного звена:

$$W_{u1}(p) = \frac{Z_2(p)}{F_M(p)} = \frac{1/C_2}{T_{21}^2 p^2 + 2\xi T_{21} p + 1}, \quad (19)$$

где коэффициент демпфирования $0 < \xi < 1$.

Колебательные свойства объекта управления в случае включения корректирующих звеньев в прямой цепи приводят к необходимости применения нестандартных регуляторов.

Для упрощения регуляторов используем структуру с корректирующим звеном $W_{R1}(p)$ в цепи обратной связи. Организуем в системе внутренний замкнутый контур с отрицательной обратной связью по скорости $\delta V = \frac{dZ_2}{dt}$ (см. рис. 4).

Передаточная функция прямой цепи этого контура, содержащая звенья $W_{co}(p)$, $W_e(p)$, $W_{u1}(p)$,

$$W(p) = \frac{k_e k_{co} / C_2}{(T_{21}^2 p^2 + 2\xi T_{21} p + 1)(T_{\mu} p + 1)}. \quad (20)$$

Используем в цепи обратной связи внутреннего контура ПД-регулятор с передаточной функцией

$$W_{R1}(p) = k_{R1}(T_{R1} p + 1)$$

и примем $T_{R1} = T_{\mu}$.

Несложно показать, что в этом случае эквивалентная передаточная функция замкнутого внутреннего контура будет

$$W_{cl}(p) = \frac{k_e k_{co} / C_2}{(T_{21}^2 p^2 + T_{03} p + 1)(T_{\mu} p + 1)}, \quad (21)$$

где

$$T_{03} = T_{22} + T_{R1} k_{R1} k_{sz}. \quad (22)$$

Из сравнения (20) и (21) следует, что $W_{cl}(p)$ отличается от (20) только значением коэффициента при p в первом сомножителе знаменателя. Причем, выбрав значение коэффициента регулятора

$$k_{R1} \geq \frac{2T_{21}(1-\xi)C_2}{k_e k_{co} k_{sv}},$$

можно увеличить постоянную времени T_{03} так, чтобы выполнялось соотношение

$$T_{03} \geq 2T_{21},$$

и получить передаточную функцию внутреннего замкнутого контура в виде

$$W_{cl}(p) = \frac{k_e k_{co} / C_2}{(T_{04} p + 1)(T_{05} p + 1)(T_{\mu} p + 1)}, \quad (23)$$

где постоянные времени определяются выражением, аналогичным (17):

$$T_{04,05} = \frac{T_{03} \pm \sqrt{T_{03}^2 - 4T_{21}^2}}{2}.$$

В результате передаточная функция внешнего нескорректированного контура в разомкнутом состоянии будет иметь вид, аналогичный (18):

$$W_{op2}(p) = \frac{k_e k_{co} k_{\alpha} / C_2}{(T_{04}p + 1)(T_{05}p + 1)(T_{\mu}p + 1)}.$$

Соответственно, задача синтеза регулятора и расчета его параметров решается аналогично ситуации, когда выполняется соотношение (15).

Рассмотрим особенности построения САУ при использовании в качестве исполнительного элемента линейного двигателя постоянного тока (ЛДПТ). Операторные уравнения движения ЛДПТ имеют вид [1]:

$$U(p) = E(p) + I(p)R[1 + T_e p]; \quad (24)$$

$$E(p) = \frac{1}{k_e} p [Z_2(p) - Z_1(p)]; \quad (25)$$

$$F_M(p) = k_e I(p), \quad (26)$$

где I – ток якоря; E – наведенная в якоре ЭДС; L – индуктивность цепи якоря; R – сопротивление якорной цепи двигателя; $k_e = c_e \Phi$ – коэффициент передачи двигателя; c_e – конструктивный коэффициент; $T_e = L/R$ – электромагнитная постоянная ЛДПТ.

Структурная схема исполнительного элемента W_{el} , показанного на рис. 4, с учетом соотношений (24) – (26) приобретает вид, представленный на рис. 5, где

$$W_{el}(p) = \frac{I(p)}{E(p)} = \frac{1/R}{1 + T_e p}.$$

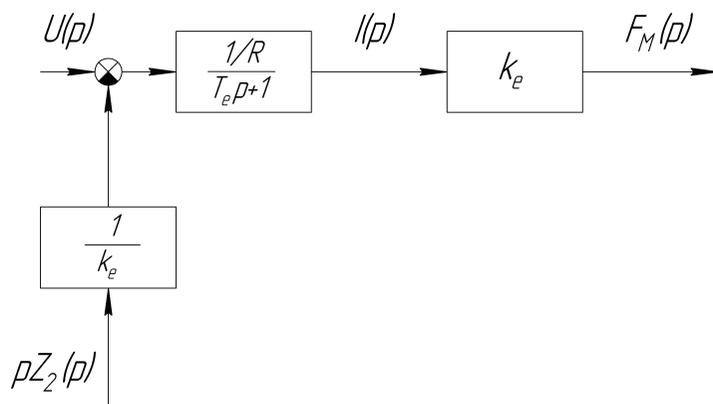


Рис. 5. Структурная схема исполнительного элемента

Согласно (25) ЭДС линейного двигателя постоянного тока пропорциональна производной от деформации подвески $Z_2 - Z_1$. Причем при указанном выше соотношении жесткости подрессоренной и непрорессоренной частей $C_1 \gg C_2$ деформация подвески $Z_2 - Z_1 \approx Z_2$. Эти обстоятельства позволяют упростить внутренний контур двухконтурной системы.

ЭДС двигателя в соответствии с (24) определяется соотношением

$$E(p) = U(p) - I(p)R[1 + T_e p].$$

В автоматизированном электроприводе постоянного тока используются датчики ЭДС, выполненные по известной схеме: в соответствии с последним выражением дифференцирующий вход датчика ЭДС подключается к выходу датчика тока, а пропорциональный вход – к датчику напряжения.

Напряжение U_{sE} на выходе датчика ЭДС определяется его коэффициентом передачи k_{sE} и, согласно изложенному, производной от перемещения Z_2 :

$$U_{sE}(p) = k_{sE}E(p) \approx \frac{k_{sE}}{k_e} pZ_2(p).$$

Следовательно, в цепи обратной связи внутреннего контура вместо датчика перемещения Z_2 можно использовать датчик ЭДС линейного двигателя. В этом случае отпадает необходимость дифференцирования сигнала датчика обратной связи внутреннего контура.

Синтез регулятора внешнего контура при этом выполняется по рассмотренной выше методике.

Моделирование системы

Расчеты и моделирование проведены для типичных для легкового автомобиля параметров элементов системы: $m_2 = 250$ кг, $C_2 = 25000$ Н/м, $T_{12} = 0,1$ с, $T_{22} = 0,1$ с, $T_\mu = 0,02$ с, $k_e = 24$ Н/А, $k_{co} = 2,4$, $k_\alpha = 88,9$ град/м, $k_{S\alpha} = 0,5$ В/град.

В соответствии со структурной схемой САУ (см. рис. 5) разработана компьютерная модель системы.

Передаточная функция $W_{u1}(p)$ для принятых параметров имеет вид выражения (19), где $\xi = 0,5$. Коэффициент передачи регулятора внутреннего контура выбран по условию

$$k_{R1} = \frac{2T_{21}(1-\xi)C_2}{k_e k_{co} k_{sv}}.$$

При этом замкнутый внутренний контур содержит апериодические звенья (23) с равными постоянными времени $T_{04} = T_{05} = 0,1$ с.

Переходный процесс изменения угла крена при действии наиболее неблагоприятного ступенчатого изменения центробежной силы приведен на рис. 6, кривая 1. Величина возмущающего воздействия выбрана по условию: установившееся отклонение угла крена в разомкнутой системе равно 1 град.

Как следует из графика, максимальное динамическое отклонение угла крена составляет 0,15 град, то есть снижается более чем в 6 раз по сравнению с установившимся отклонением в разомкнутой системе.

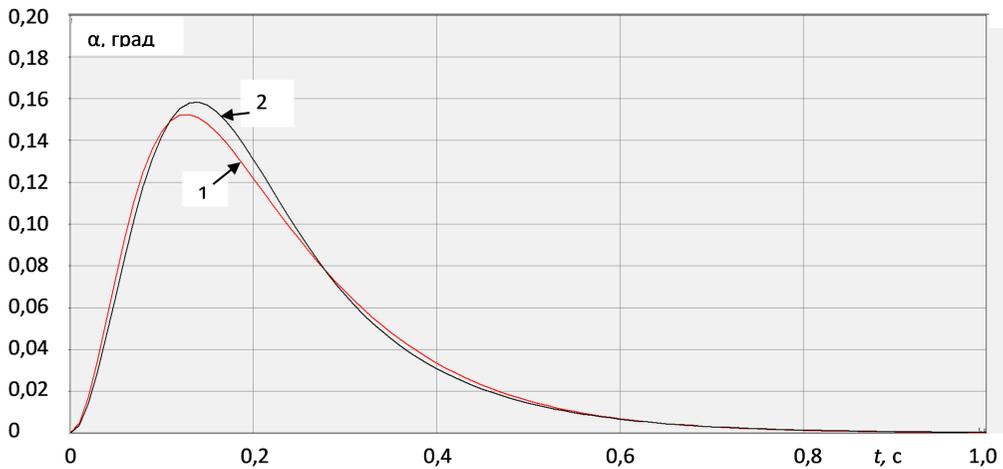


Рис. 6. Графики отработки ступенчатого возмущения: кривая 1 – для расчетных значений параметров; кривая 2 – при увеличении массы на 30 %

Оценено влияние вариаций массы (загрузки) автомобиля на качество регулирования. На рис. 6 показан график отработки ступенчатого возмущения при увеличении массы m_2 на 30 % относительного расчетного значения (кривая 2). Максимальное динамическое отклонение угла крена в этом случае возрастает незначительно – до 0,16 град.

Кроме того, как показывают результаты компьютерного моделирования, без существенной потери качества регулирования во внутреннем контуре системы с датчиком перемещения ПД-регулятор $W_{R1}(p) = k_{R1}(T_{R1}p + 1)$ может быть упрощен до Д-регулятора: $W_{R1}(p) = k_{R1}p$. А при использовании в цепи обратной связи датчика ЭДС линейного двигателя можно, с учетом вышеизложенного, использовать пропорциональный регулятор.

Заключение

Для достижения высокой точности стабилизации угла крена автомобиля систему управления необходимо выполнять замкнутой по регулируемой переменной с использованием в подвеске активных исполнительных элементов, в частности линейных двигателей постоянного тока. Динамические свойства объекта управления для рассматриваемых переменных в зависимости от характеристик элементов подвески можно приближенно представить передаточными функциями апериодического звена второго порядка либо колебательного звена. Для первой ситуации систему управления следует выполнять одноконтурной и использовать ПИД-регулятор. Во второй ситуации, когда объект управления имеет колебательные свойства, систему управления целесообразно выполнять как двухконтурную, с внутренним контуром, замкнутым по скорости деформации подвески, используя в качестве датчика обратной связи датчик ЭДС линейного двигателя. Во внешнем контуре при этом также используется ПИД-регулятор. Компьютерное моделирование показало, что в разработанной системе управления при выборе параметров ПИД-регулятора по условиям модульного оптимума динамическое отклонение угла крена при отработке возмущающего воздействия

снижается примерно в 6 раз по сравнению с установившимся отклонением в разомкнутой системе.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Волченко Т.С.* Оптимизация параметров виброзащиты грузовых автотранспортных средств по критерию минимума динамических нагрузок: дис. ... канд. техн. наук: 01.02.06. – Южно-Уральский государственный университет. – Челябинск, 2014.
2. *Попов А.В., Горбунов А.А.* Выбор типа активной системы стабилизации поперечной устойчивости при проектировании автомобильных транспортных средств // Современные научные исследования и инновации. 2016. № 8 [Электронный ресурс]. URL: <https://web.snauka.ru/issues/2016/08/70289> (дата обращения: 28.07.2022).
3. ОСТ 37.001.277-84 Подвеска автотранспортных средств. Термины и определения. М.: Министерство автомобильной промышленности, 1984.
4. *Тягунов А.Е., Карташов А.Б.* Расчет и обоснование конструктивных параметров автомобильных механических стабилизаторов поперечной устойчивости с регулируемой жесткостью // Известия МГТУ «МАМИ». 2017. Т. 11. № 2 (32). С. 64–71.
5. *Абакумов А.М., Рандин Д.Г., Бочков В.В.* Исследование активной системы виброзащиты на основе линейного двигателя постоянного тока // Вестник Самарского государственного технического университета. 2018. № 3 (59). С. 118–128.
6. *Rasid S.M.R., Mizuno T., Ishino Y., Takasaki M., Hara M., Yamaguchi D.* Design and control of active vibration isolation system with an active dynamic vibration absorber operating as accelerometer // Journal of Sound and Vibration. January 2019. Vol. 438. Pp. 175–190.
7. *Сазонов И.С., Ким В.А., Ки Йонг Чой.* Теория автомобиля: учеб. пособие. Могилев: ГУВПО «Белорусско-Российский университет», 2017. 164 с.
8. *Селифонов В.В., Хусаинов А.Ш., Ломакин В.В.* Теория автомобиля: учеб. пособие. М.: МГТУ «МАМИ», 2007. 102 с.
9. *Стуканов В.А.* Основы теории автомобильных двигателей и автомобилей: учеб. пособие. М.: ФОРУМ: ИНФРА-М, 2005. 368 с.
10. *Рапопорт Э.Я.* Системы подчиненного регулирования электроприводов постоянного тока. Куйбышев: КПТИ, 1985. 56 с.
11. *Терехов В.М., Осипов О.И.* Система управления электроприводов: учебник. Стер., 2-е изд. М.: Академия, 2003. 304 с.
12. *Фрер Ф., Ортенбургер Ф.* Введение в электронную технику регулирования. М.: Энергия, 1973. 192 с.
13. *Чичварин А.В.* Динамика активной системы виброизоляции с механизмами параллельной структуры: дис. ... канд. техн. наук: 01.02.06. – Орловский государственный технический университет. Орел, 2006.
14. *Апресов С., Мамонтов Д., Черняускас В.* Незримая опека // Популярная механика. Январь 2011. № 1 (99).
15. *Lukoševičius V., Makaras R., Rutka A., Kersys R.* Investigation of vehicle stability with consideration of suspension performance // Applied sciences. October 2021. Vol. 11. 9778. No. 20. Pp. 1–32.
16. *Ahmed A.E.N.S., Ali A.S., Ghazaly N.M., Abd el- Jaber G.T.* PID controller of active suspension system for a quarter car model // International journal of advances in engineering & technology. December 2015. Vol. 8. No. 6. Pp. 899–909.
17. *Кулагин В.А.* Разработка комплекса математических моделей подвески легкового автомобиля для анализа усталостной долговечности // Известия МГТУ «МАМИ». 2021. Т. 15. № 4 (50). С. 32–42.

Статья поступила в редакцию 23 октября 2022 г.

MATHEMATICAL MODELS AND STRUCTURES OF THE VEHICLE LATERAL STABILITY STABILIZATION SYSTEM

*A.M. Abakumov, A.A. Goryachkin, V.N. Ovsyannikov**

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., 443100, Russian Federation

E-mail: Abakumov-am@yandex.ru, gor.al.al@yandex.ru, ovsyannikov0512@mail.ru

Abstract. *Currently, intensive research is being carried out to improve the operational characteristics of the car: vibration protection, smoothness, stability, controllability. These properties are largely determined by the characteristics of the vehicle suspension, which provides a connection between the carrier system and the wheels of the vehicle. Significant attention is paid to the development of active suspensions, in which additional actuators are used to form the necessary characteristics, in particular, linear DC motors. The use of active actuators allows you to control the position of the car body, including its lateral roll. In the article, relations are obtained that establish the dependence of additional elastic deformations in the suspension and the car's roll angle on the centrifugal force in a stationary mode. When developing a linearized mathematical model of the control object for the study of non-stationary modes, a two-mass design scheme was used and operator equations were obtained that take into account the elastic-dissipative properties of the sprung and unsprung parts of the car, as well as an additional control action created by the actuator. It is shown that the dynamic properties of the studied control object can be approximately described by the transfer functions of a second-order aperiodic link or an oscillatory link. For the first case, a single-loop system was developed, closed in terms of the angle of heel with a PID controller. In the second situation, it is advisable to use a two-loop system with an internal flexible feedback loop for suspension deformation and an external loop closed for the roll angle using a PID controller. The possibility of forming a feedback signal on the strain rate of the suspension in the wind circuit with the help of an EMF sensor of a linear DC motor is shown.*

On the basis of the block diagram, a computer model of the system was developed, and for typical parameters of the control object, a study was made of transient processes of working off a disturbance in the form of a change in centrifugal force. Based on the simulation results, it was found that the use of the developed ACS provides high accuracy in stabilizing the vehicle roll angle.

Keywords: *lateral stability of the vehicle, roll angle stabilization system, linear motor.*

REFERENCES

1. *Volchenko T.S.* Optimization of vibration protection parameters of cargo vehicles according to the criterion of minimum dynamic loads [Optimizatsiya parametrov vibrozashchity gruzovykh avtotransportnykh sredstv po kriteriyu minimuma dinamicheskikh nagruzok], South Ural State University (NRU), Chelyabinsk, dis. ... kan. of technical Sciences: 01.02.06, 2014. (In Russian).
2. *Popov A.V., Gorbunov A.A.* The choice of the type of active transverse stability stabilization system in the design of motor vehicles [Vybor tipa aktivnoy sistemy stabilizatsii poperechnoy ustojchivosti pri proektirovanii avtomobil'nykh transportnykh sredstv] // Modern scientific re-

* *Alexander M. Abakumov (Dr. (Techn.)), Professor.*

Alexander A. Goryachkin, Postgraduate Student.

Vladimir N. Ovsyannikov (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.

- search and innovation. 2016. No. 8 [Electronic resource]. URL: <https://web.snauka.ru/issues/2016/08/70289> (accessed: 07/28/2022). (In Russian).
3. OST 37.001.277-84 Suspension of motor vehicles. Terms and definitions [Podveska avto-transportnyh sredstv]. M.: Ministry of Automotive Industry, 1984. (In Russian).
 4. *Tyagunov A.E., Kartashov A.B.* Calculation and justification of design parameters of automotive mechanical stabilizers of transverse stability with adjustable rigidity [Raschet i obosnovanie konstruktivnyh parametrov avtomobil'nyh mekhanicheskikh stabilizatorov poperechnoj ustojchivosti s reguliruemoj zhestkost'yu] // *Izvestia of MSTU "MAMI"*, Vol. 11, No 2 (32), 2017. Pp. 64–71. (In Russian).
 5. *Abakumov A.M., Randin D.G., Bochkov V.V.* Investigation of an active vibration protection system based on a linear DC motor [Issledovanie aktivnoj sistemy vibrozashchity na osnove linejnogo dvigatelya postoyannogo toka] // *Bulletin of Samara State Technical University*, No. 3 (59), 2018. Pp. 118–128. (In Russian).
 6. *Rasid S.M.R., Mizuno T., Ishino Y., Takasaki M., Hara M., Yamaguchi D.* Design and control of active vibration isolation system with an active dynamic vibration absorber operating as accelerometer // *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 438, January 2019. Pp. 175–190.
 7. *Sazonov I.S., Kim V.A., Ki Yong Choi.* The theory of the car: a textbook [Teoriya avtomobilya]. Mogilev: GUVPO "Belarusian-Russian University", 2017. 164 p. (In Russian).
 8. *Selifonov V.V., Khusainov A.Sh., Lomakin V.V.* The theory of the car: a textbook [Teoriya avtomobilya]. M.: MSTU "MAMI", 2007. 102 p. (In Russian).
 9. *Stukanov V.A.* Fundamentals of the theory of automobile engines and automobiles: textbook [Osnovy teorii avtomobil'nyh dvigatelej i avtomobilej]. M.: FORUM: INFRA-M, 2005. 368 p. (In Russian).
 10. *Rapoport E.Ya.* Systems of subordinate regulation of DC electric drives [Sistemy podchinnogo regulirovaniya elektroprivodov postoyannogo toka]. Kuibyshev: KPTI, 1985. 56 p. (In Russian).
 11. *Terekhov V.M., Osipov O.I.* Control system of electric drives [Sistema upravleniya elektroprivodov]. Textbook. ster., 2nd ed. M.: Publishing Center "Academy", 2003. 304 p. (In Russian).
 12. *Frere F., Orttenburger F.* Introduction to electronic control technology [Vvedenie v elektronnyu tekhniku regulirovaniya]. M.: Energiya, 1973. 192 p. (In Russian).
 13. *Chichvarin A.V.* Dynamics of an active vibration isolation system with parallel structure mechanisms [Dinamika aktivnoj sistemy vibrozolyacii s mekhanizmami paralel'noj struktury]. Oryol State Technical University, Orel, dis. ... can. of technical sciences: 01.02.06, 2006. (In Russian).
 14. *Apresov S., Mamontov D., Chernyauskas V.* Invisible guardianship [Nezrimaya opeka] // *Popular Mechanics*, No. 1 (99), January 2011. (In Russian).
 15. *Lukoševičius V., Makaras R., Rutka A., Kersys R.* Investigation of vehicle stability with consideration of suspension performance // *Applied sciences*, Vol. 11, 9778, No. 20, October 2021. Pp. 1–32.
 16. *Ahmed A.E.N.S., Ali A.S., Ghazaly N.M., Abd el-Jaber G.T.* PID controller of active suspension system for a quarter car model // *International journal of advances in engineering & technology*, Vol. 8, No. 6, December 2015. Pp. 899–909.
 17. *Kulagin V.A.* Development of a complex of mathematical models of passenger car suspension for fatigue durability analysis [Razrabotka kompleksa matematicheskikh modelej podveski legkovogo avtomobilya dlya analiza ustalostnoj dolgovechnosti] // *Izvestia of MSTU "MAMI"*, Vol. 15, No 4 (50), 2021. Pp. 32–42. (In Russian).

УДК 621.365.511

ИНДУКЦИОННАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ПОДОГРЕВА КРУПНОГАБАРИТНЫХ КОЛЕЦ ПЕРЕД РАСКАТКОЙ

*А.И. Данилушкин, Д.В. Колпаков, Н.Р. Штукатуров**

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: aidanilushkin@mail.ru, sward63rus@mail.ru, vip.ue98@mail.ru

Рассматриваются вопросы проектирования индукционной системы для нагрева крупногабаритных полых цилиндрических заготовок перед раскаткой. Отмечены специфические особенности процесса нагрева заготовок на установке, встроенной в технологическую линию обработки. Показано, что эффективность процесса нагрева крупногабаритных стальных заготовок повышается при использовании системой индукторов с применением теплового экрана. Выполнено исследование процесса подогрева заготовок с учетом нелинейной зависимости физических характеристик металла нагреваемых заготовок от изменяющейся в процессе нагрева температуры. Расчет параметров индукционной системы проводится на основе двумерной модели. Геометрические параметры кольцевой заготовки обусловили значительную неравномерность распределения плотности тока по аксиальной координате заготовки из-за сильно выраженных краевых эффектов. Представлены результаты численного расчета электромагнитных и тепловых полей при различной вариации конструкции индукционной системы. Для обоснования и выбора конструкции индукционной системы, обеспечивающей нагрев кольца за время, обусловленное темпом работы деформирующего оборудования, произведен ряд расчетов, включающих три варианта: нагрев внешним цилиндрическим индуктором; нагрев двумя индукторами: нагрев системой индукторов с тепловым экраном. Анализ эффективности исследуемых вариантов основан на многократном уточнении результатов в процессе итерационного проектирования. Приведены результаты расчета температурного распределения в заготовке в процессе нагрева. Результаты проведенных исследований могут быть использованы для разработки конструктивных и режимных параметров системы индукционного нагрева колец в линии раскатки.

Ключевые слова: индукционный нагрев, раскатка, математическая модель, электромагнитное поле, краевые эффекты, тепловой экран, температурное распределение.

Технологический процесс производства колес и бандажей для железнодорожного состава включает в себя основной нагрев заготовок до температуры 1220÷1260 °С и последующий комплекс операций по осадке и обжатию на прес-

* Александр Иванович Данилушкин, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры электроснабжения промышленных предприятий.

Дмитрий Викторович Колпаков, аспирант кафедры электроснабжения промышленных предприятий.

Николай Романович Штукатуров, аспирант кафедры электроснабжения промышленных предприятий

сах, прошивке отверстий. Перечисленные операции осуществляются на различных устройствах с промежуточной транспортировкой заготовки от одного устройства к другому. В процессе перечисленных операций имеют место значительные тепловые потери с поверхности заготовки. В итоге заготовка подается к заключительной операции – к раскаточному стану – с температурой, недостаточной для последующей раскатки. При температуре раскатки $1050 \div 1070$ °С заготовка подходит к раскаточной машине с температурой $950 \div 1020$ °С. В целях повышения качества изделий, снижения брака и повышения срока межремонтного периода перед подачей заготовки к раскаточной машине необходим промежуточный подогрев заготовки. Так как время для подогрева заготовки ограничено и определяется производительностью линии раскатки, для нагрева необходим нагреватель, обеспечивающий быстрый нагрев. Таковую задачу можно реализовать с помощью индукционной нагревательной установки. Применение индукционного метода нагрева обеспечивает высокое быстродействие, обусловленное самим принципом работы. Кроме того, индукционный нагреватель представляет собой компактное устройство, которое можно встроить непосредственно в линию раскатки [1–3].

Кольцевые заготовки поступают по рольгангу к индукционной установке, которая состоит из двух цилиндрических индукторов, механизма перемещения заготовки в зону нагрева и механизма перемещения индукторов.

Для расчета параметров индукционной системы в работе используется математическая модель процесса индукционного нагрева металла в виде системы дифференциальных уравнений Максвелла и Фурье [4–6] соответственно для электромагнитного и теплового полей. Характер электромагнитной и тепловой задач, даже при условии постоянства коэффициентов исходных уравнений, существенно зависит от граничных условий, которые в общем случае являются нелинейными [7–9]. При разработке и исследовании индукционной системы применяется конечно-элементная модель расчета электромагнитных устройств, позволяющая учесть основные нелинейности процесса. Численный расчет электромагнитных и тепловых полей в системе «индуктор – металл» производится в программном комплексе ELCUT [11].

В табл. 1 приведены исходные данные для расчета.

Таблица 1

Исходные данные для расчета

Внешний диаметр кольца d_1 , м	Внутренний диаметр кольца d_2 , м	Высота кольца, м	Коэффициент теплопроводности, Вт/м·°С	Коэффициент теплоемкости, Дж/кг·°С	Коэффициент теплоотдачи с поверхностью, Вт/м ² ·°С	Нагрев, град
0,845	0,25	0,145	26	600	66,5	950–1260

Реализация предлагаемой конструкции ИНУ требует последовательного решения ряда задач, связанных с исследованием электромагнитных и тепловых полей при индукционном нагреве заготовок в условиях нелинейностей, обусловленных зависимостью электрофизических характеристик металла от температуры. Кроме того, при проектировании конструкции индукционного нагревателя необходимо учитывать значительное количество конструктивных параметров, которые влияют как на условия согласования индукционного нагревателя

с системой электроснабжения, так и на эффективность всего процесса нагрева металла.

Особенностью расчета параметров индукционных нагревателей являются сложный характер взаимосвязанных электро- и теплофизических процессов, ярко выраженная неравномерность пространственного распределения внутренних источников тепла, индуцируемых электромагнитным полем индуктора, зависимость мощности внутреннего тепловыделения от температуры нагреваемых заготовок. В связи с этим для разработки методики расчета индукционной системы, оптимизации конструктивных и режимных параметров необходимо иметь соответствующую математическую модель, адекватно описывающую процесс нагрева с учетом влияния на параметры нагревателя нелинейной зависимости удельного сопротивления, удельной теплоемкости от температуры в процессе нагрева.

Исходная электромагнитная задача может быть выражена через векторный потенциал общим уравнением Пуассона в двумерной осесимметричной области $V(r, z)$ [12–14]

$$\begin{cases} \operatorname{rot} \left(\frac{1}{\mu_a} \operatorname{rot} A \right) + j \frac{\partial A}{\partial \tau} = J_0 \\ \operatorname{rot} A = B \\ \operatorname{div} A = 0 \end{cases}, \quad (1)$$

где r и z – радиальная и осевая координаты соответственно; A – векторный магнитный потенциал; $\mu_a = \mu \cdot \mu_0$ – абсолютная магнитная проницаемость среды; j – удельная электрическая проводимость.

Учитывая осевую симметрию и квазистационарность исследуемого поля, уравнение (1) можно представить для комплексной амплитуды векторного потенциала в виде

$$\frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{1}{\mu_a(r, z)} \cdot \frac{\partial A(r, z)}{\partial A} \right] + \frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{1}{r} \cdot \frac{1}{\mu_a(r, z)} \cdot \frac{\partial A(r, z)}{\partial r} \right] - j\omega A - J_0(r, z) = 0,$$

где $\omega = 2\pi f$ – циклическая частота питающего тока.

В качестве граничных условий приняты наиболее общие условия – равенство нулю векторного потенциала на границе расчетной области, находящейся в бесконечности.

В реальной ситуации граница может быть достаточно удалена от источников тока, где магнитная энергия поля действительно спадает практически до нуля. В плоскостях геометрической симметрии принимается перпендикулярность линий потока электромагнитного поля этим плоскостям

$$\frac{A}{S_1} \in S = 0; \quad \frac{\partial A}{\partial r} \in S_2 = 0,$$

где S_1 – удаленная граница области; S_2 – граница плоскостей симметрии.

В целях получения приемлемой математической модели процесса индукционного нагрева принимаются некоторые допущения, которые значительно упрощают процедуру расчета и обеспечивают удовлетворительную точность результатов [15–18].

Рассматривается двумерная осесимметричная область, где индукция B и напряженность H магнитного поля имеют две составляющие – по радиусу и по длине заготовки, а плотность тока индуцированных источников, магнитный векторный потенциал и напряженность электрического поля направлены строго по касательным к окружностям с центром на оси индукционной системы.

1. Поле принимается квазистационарным, относительно низкая частота внешнего тока ($f = 50$ Гц) позволяет пренебречь токами смещения по сравнению с токами проводимости в металле.

2. Рассматривается двумерная осесимметричная область, где индукция B и напряженность H магнитного поля имеют две составляющие – по радиусу и по длине заготовки, а плотность тока индуцированных источников, магнитный векторный потенциал и напряженность электрического поля направлены строго по касательным к окружностям с центром на оси индукционной системы.

3. Не учитываются потери на гистерезис при нагреве в силу их незначительности по сравнению с потерями от вихревых токов.

Принятые допущения позволяют осуществить раздельное решение электромагнитной и тепловой задач.

В результате расчета определяются приближенные значения функции распределения внутренних источников тепла $W(r, Z, t)$ по радиальной и аксиальной координатам.

Характер электромагнитной и тепловой задач даже при условии постоянства коэффициентов исходных уравнений существенно зависит от граничных условий, которые в общем случае являются нелинейными.

Для проектирования индуктора используется конечно-элементная модель расчета электромагнитных устройств, позволяющая учесть все сложности формы нагреваемого тела и индуктора. Численный расчет электромагнитных и тепловых полей в системе «индуктор – металл» производится в программном комплексе ELCUT.

Геометрическая модель для решения электромагнитной задачи с внешним индуктором представлена на рис. 1.

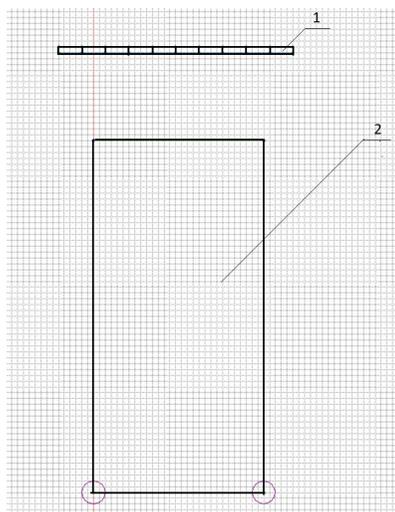


Рис. 1. Геометрическая модель для расчета электромагнитных источников с внешним индуктором: 1 – витки индуктора; 2 – сечение кольца

Результаты решения электромагнитной задачи при нагреве внешним индуктором приведены ниже. На рис. 2 приведена диаграмма распределения объемной мощности тепловыделения. На рис. 3 приведена диаграмма распределения плотности тока по аксиальной координате на поверхности заготовки.

Значительная неравномерность распределения плотности тока по аксиальной координате заготовки обусловлена краевыми эффектами. Как следует из результатов расчета, удельная мощность источников тепла распределена существенно неравномерно, основная часть тепла выделяется примерно на 1/3 расстояния от поверхности заготовки. Основная часть металла заготовки от боковой поверхности к центру нагревается за счет теплопроводности. Это приводит к значительному увеличению времени нагрева, превышающему время раскатки кольца.

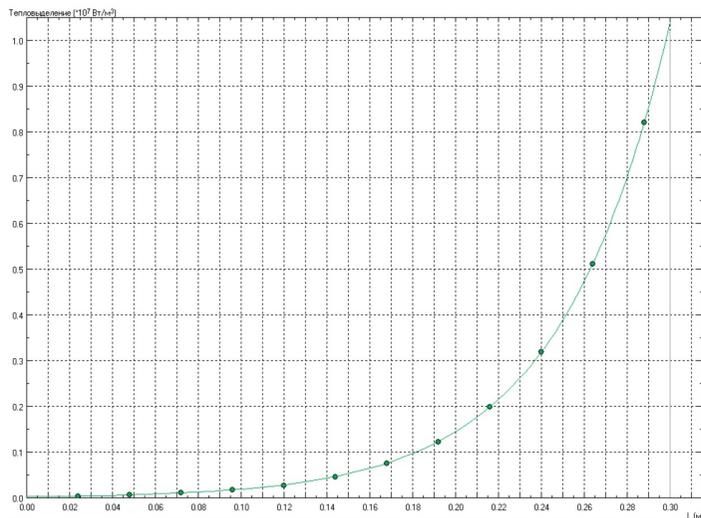


Рис. 2. Диаграмма распределения объемной мощности тепловыделения по радиусу заготовки

Для выбора и расчета оптимальной конструкции индукционной системы, обеспечивающей нагрев кольца за время, обусловленное темпом работы деформирующего оборудования, произведен ряд расчетов, включающих три варианта:

1. Расчеты электромагнитных и тепловых полей при нагреве внешним цилиндрическим индуктором.

2. Расчеты электромагнитных и тепловых полей при нагреве двумя индукторами: внешним цилиндрическим индуктором и внутренним индуктором.

3. Расчеты электромагнитных и тепловых полей в условиях, когда для снижения тепловых потерь с торцевой поверхности заготовки и сокращения времени нагрева верхняя торцевая поверхность заготовки дополнительно снабжена тепловым экраном.

На рис. 4 представлена геометрическая модель системы «внутренний индуктор – металл».

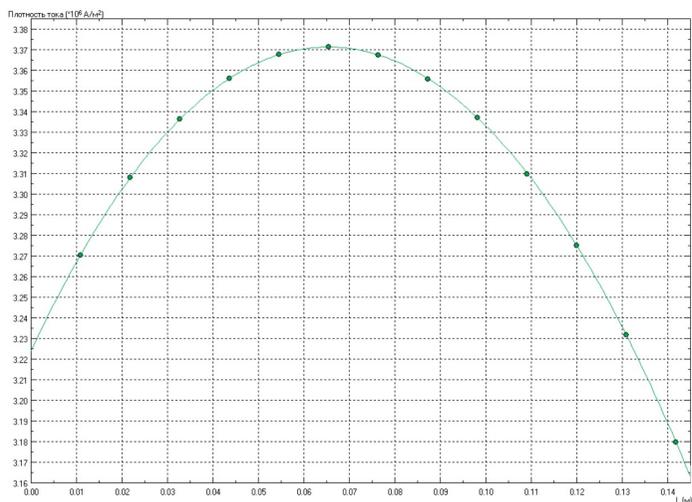


Рис. 3. Диаграмма распределения плотности тока по аксиальной координате

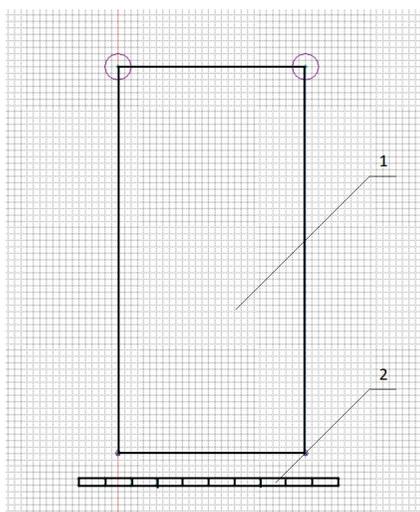


Рис. 4. Электромагнитная задача. Геометрическая модель:
1 – заготовка; 2 – витки внутреннего индуктора

Результаты исследования электромагнитных процессов в системе «внутренний индуктор – металл» приведены на рис. 5 и 6.

Определение температурных полей нагреваемого кольца сводится к решению уравнения теплопроводности Фурье [5, 6] с известной функцией распределения внутренних источников тепла, найденной в результате решения электромагнитной задачи.

Для решения тепловой задачи с учетом реальных режимов теплообмена с окружающей средой в качестве общей исходной модели температурного поля принято двумерное нестационарное уравнение теплопроводности для полого цилиндра с радиальной r и продольной x координатами вида [13, 14]

$$C_p(r, x, \tau) \gamma(r, x, \tau) \frac{\partial T(r, x, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(r, x, \tau) \frac{\partial T(r, x, \tau)}{\partial x} \right] + \\ + \frac{\partial}{\partial r} \left[\lambda(r, x, \tau) \frac{1}{r} \frac{\partial T(r, x, \tau)}{\partial r} \right] + W(r, x) \cdot U(\tau), \quad R_1 < r < R_2, \quad 0 < x < L$$

с начальными $T(r, x, 0) = \text{const}$ и граничными условиями

$$\lambda(r, x, \tau) \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R_1} = -\alpha [T(R_1, x, \tau) - T_0]; \\ \lambda(r, x, \tau) \frac{\partial T(r, x, \tau)}{\partial r} \Big|_{r=R_2} = \varepsilon [T^4(R_2, x, \tau) - T_0^4]; \\ \lambda(r, x, \tau) \frac{\partial T(r, x, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=0} = -\alpha [T(r, 0, \tau) - T_0]; \\ \lambda(r, x, \tau) \frac{\partial T(r, x, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=L} = -\alpha [T(r, L, \tau) - T_0].$$

Здесь $T(r, x, \tau)$, T_0 – температурное распределение в металле заготовки и температура окружающей среды; $C_p(r, x, \tau)$, $\gamma(r, x, \tau)$, $\lambda(r, x, \tau)$, α , ε – соответственно удельные теплоемкость и плотность металла, коэффициенты теплопроводности, теплообмена и черноты поверхности излучения; $W(r, x)$, $U(\tau)$ – соответственно функция распределения плотности теплового потока и удельная мощность источников внутреннего тепловыделения на стадии индукционного нагрева перед раскаткой.

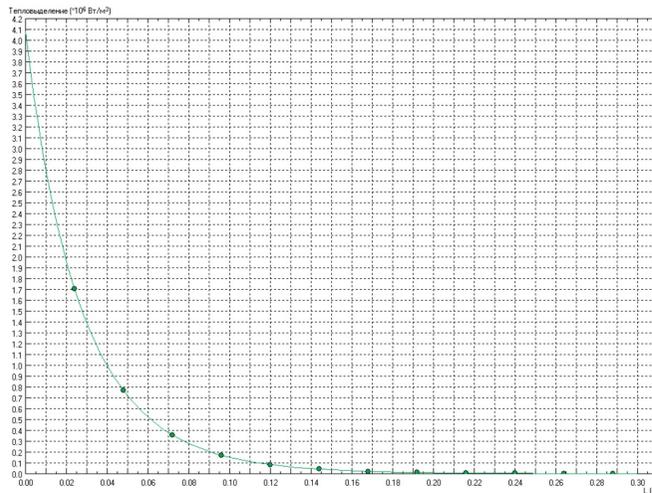


Рис. 5. Диаграмма распределения удельной мощности тепловыделения

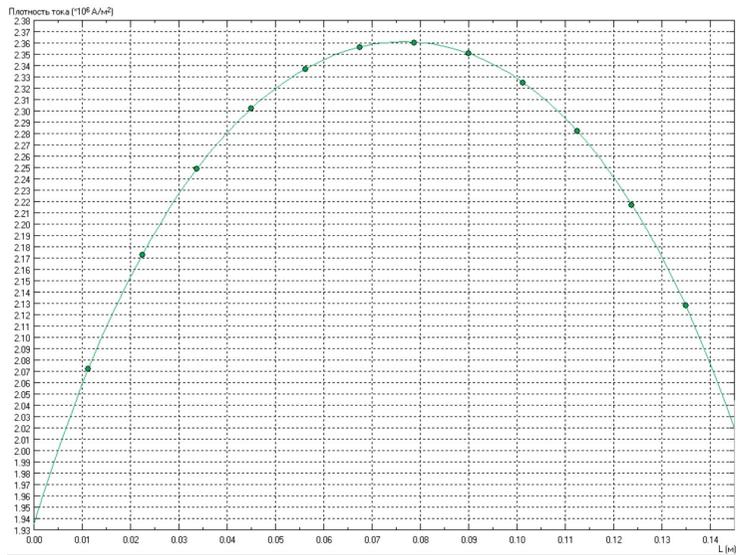


Рис. 6. Диаграмма распределения плотности тока по высоте заготовки

В ряде работ [7, 8, 10, 14, 15, 18] показано, что функции $C_p(r, x, t)$, $\gamma(r, x, t)$, $\lambda(r, x, t)$ можно принять постоянными при вычислении температурных распределений в рабочем диапазоне температур. Так, замена температурных зависимостей $C_p(r, x, t)$, $\gamma(r, x, t)$, $\lambda(r, x, t)$ их осредненными значениями приводит к определению температурных перепадов с погрешностью $\pm 2\%$, а температурных распределений – $\pm 0,7\%$. Вследствие незначительного влияния вариации указанных параметров на выходные координаты объекта математическая модель объекта может быть принята линейной с постоянными коэффициентами.

Алгоритм расчета электротепловых процессов в модели при известном начальном распределении температур заключается в следующем:

1. Исходя из температурного поля загрузки находится удельное сопротивление каждого элемента дискретизации области загрузки.

2. Проводится расчет электромагнитного поля.

3. В интерполяционном блоке происходит формирование массива внутренних источников теплоты для решения тепловой задачи из массива, найденного после решения электрической задачи. Если элементы их дискретизации одинаковы в обеих задачах, то массивы их внутренних источников теплоты совпадают.

4. Находится температурное поле на следующем временном слое, определяемом шагом по времени τ .

5. Если критерии окончания процесса нагрева не удовлетворены, то происходит переход к п. 1.

Выбор шага τ по времени определяется требуемой точностью расчета. В то же время при фиксированном шаге точность определения температурного поля зависит от свойств схемы решения и от того, насколько сильно изменились внутренние источники теплоты за время τ . Если источники меняются слабо, то на выбор шага по времени оказывает влияние только первый фактор.

Геометрическая модель для решения тепловой задачи представлена на рис. 7. На схеме: 1 – футеровка внутреннего индуктора; 2, 4 – внутренняя и внешняя области тепловыделения в кольце; 3 – часть сечения кольца без источников тепла; 5 – футеровка внешнего индуктора; 6 – площадка для установки кольца. Основание, на которое устанавливается кольцо, выполнено из жаропрочного теплоизоляционного материала. В основании вмонтированы направляющие из нержавеющей стали.

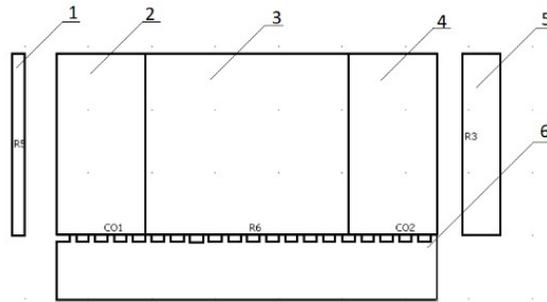


Рис. 7. Геометрическая модель для тепловой задачи: 1 – футеровка внутреннего индуктора; 2, 4 – внутренняя и внешняя области тепловыделения в заготовке; 3 – часть сечения заготовки без источников тепла; 5 – футеровка внешнего индуктора; 6 – площадка для установки кольца

Температурное распределение по радиальной координате на торцевой поверхности кольца в момент выхода температуры внешней поверхности на предельно допустимый уровень представлено на рис. 8.

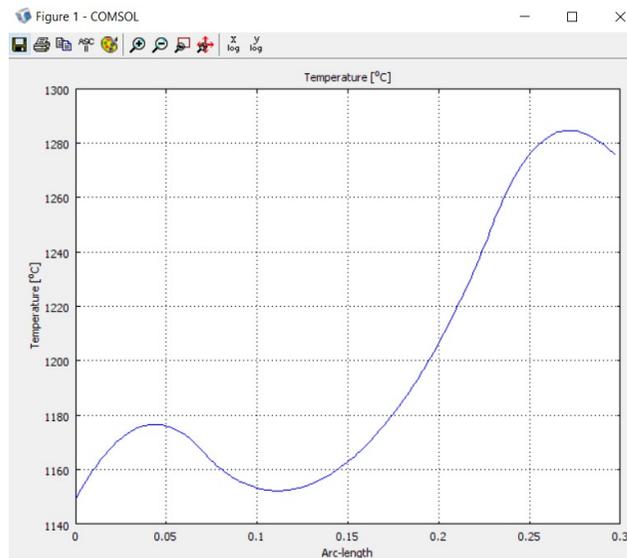


Рис. 8. График распределения температуры по радиальной координате на торцевой поверхности заготовки

Как следует из анализа температурного распределения, применение внутреннего индуктора не позволяет обеспечить необходимую равномерность температурного распределения по радиальной координате. Основные источники тепла создаются внешним индуктором; нагрев источниками, создаваемыми внутренним индуктором, незначителен, поэтому сечение кольца нагревается только с внешней боковой поверхности. Полученное температурное распределение не удовлетворяет технологическим требованиям.

Для того чтобы получить требуемое по технологии распределение температуры по всему объему кольца, необходимо ввести второй интервал нагрева, в течение которого температура внешней поверхности поддерживается на постоянном, предельно допустимом уровне. Полученное температурное распределение удовлетворяет технологическим требованиям. Перепад температуры составляет 90 °С. Однако при этом время нагрева при максимальной мощности индуктора составляет 56 мин и оказывается значительно большим, чем это обусловлено темпом работы линии раскатки.

Существенное влияние на длительность процесса нагрева оказывает величина тепловых потерь с поверхности кольца. Для снижения тепловых потерь и уменьшения времени нагрева используется тепловой экран, установленный над верхней торцевой поверхностью кольца (рис. 9).

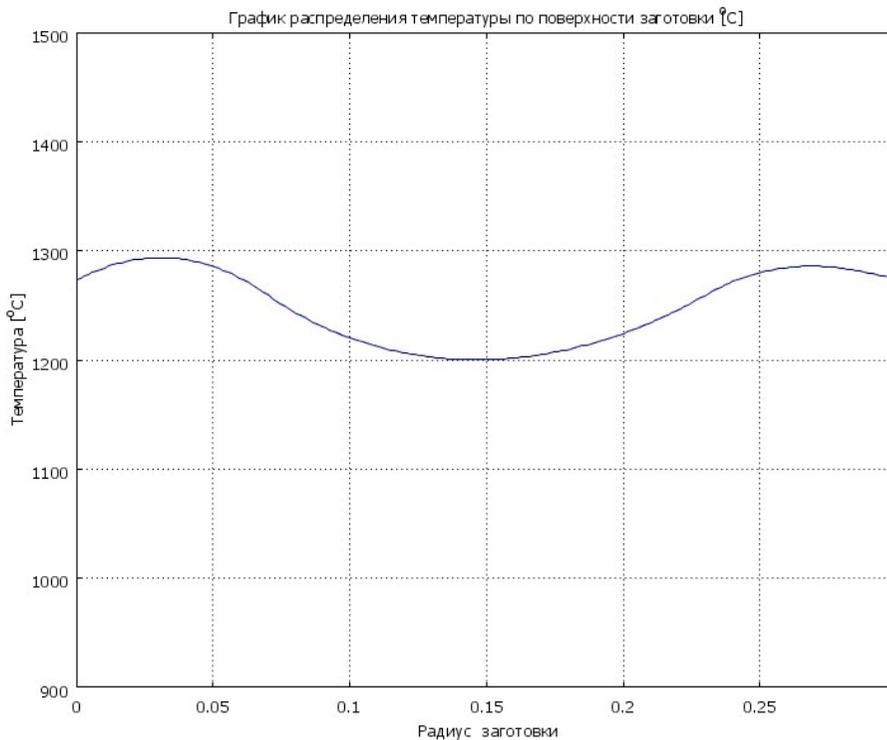


Рис. 9. График распределения температуры на торцевой поверхности заготовки

На рис. 10 приведены результаты расчета индукционной системы при нагреве двумя индукторами с использованием экрана. Здесь график 1 – температура на торцевой поверхности в точке с радиальной координатой R , соответст-

вующей внешнему радиусу кольца; график 2 – температура в точке с координатами 0,75 радиуса кольца; график 3 – температура на торцевой поверхности в точке с радиальной координатой, соответствующей внутреннему радиусу кольца.

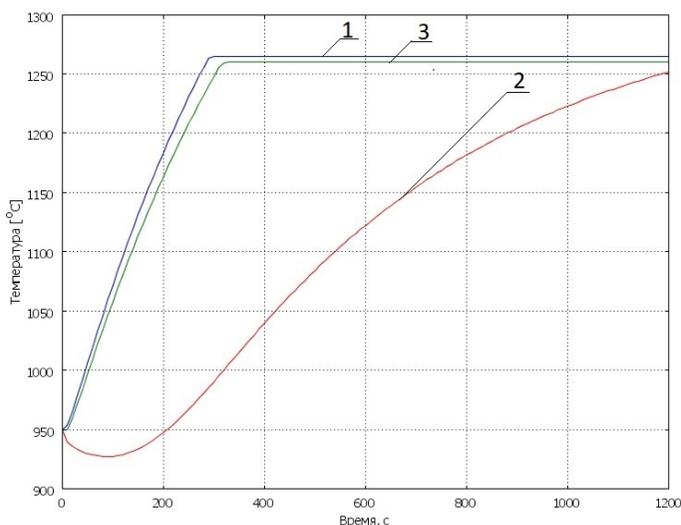


Рис. 10. Графики температуры в контролируемых точках на торцевой поверхности в процессе нагрева

В результате применения экрана перепад температуры в конце нагрева составил 90 °С, что удовлетворяет технологическим требованиям. Одновременно время нагрева сократилось до 19 мин, что соответствует темпу работы деформирующего оборудования.

Результаты расчета индукционной системы при нагреве двумя индукторами с использованием экрана приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты расчета индукционной системы

Параметры внешнего индуктора									
Размеры трубки, мм	Число витков	Высота индуктора, мм	Зазор между индуктором и кольцом, мм	Ток в индукторе, А	Напряжение на индукторе, В	Мощность, выделяемая в заготовке, Вт	Мощность, подводимая к индуктору, Вт	к.п.д., %	cos φ
30×36	5	150	40	8000	330	63000	86000	73	0,15
Параметры внутреннего индуктора									
22×16	10	230	50	8000	320	20383	58340	35	0,22

Закключение

Разработаны конечно-элементная модель и алгоритм расчета внутренних источников тепла при нагреве крупногабаритных колец цилиндрическими индукторами. Показано, что нагрев одним внешним индуктором не дает требуемо-

го эффекта. Нагрев двумя индукторами – внешним и внутренним – сокращает время нагрева, но ограничения, накладываемые на параметры внутреннего индуктора геометрическими размерами, низкие энергетические характеристики внутреннего индуктора и наличие значительных тепловых потерь с торцевой поверхности кольца хотя и уменьшают время нагрева, но не позволяют получить требуемое температурное распределение по объему кольца за ограниченное процессом раскатки время. Желаемый эффект получен при совместном использовании системы индукторов и применении тепловых экранов с торцевой поверхности кольца. Разработана экономичная программа расчета системы индукторов с учетом тепловых экранов, обеспечивающих требуемое температурное распределение за заданное время. Предложенная модель используется для проектирования конструкции индукционной системы, реализующей распределение источников внутреннего тепловыделения по радиальной координате из условия достижения требуемого конечного состояния объекта. На основании проведенных исследований определены основные параметры индукционной системы с тепловым экраном, обеспечивающей заданное температурное распределение за ограниченное технологическим процессом раскатки время.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Безручко И. И.* Индукционный нагрев для объемной штамповки. Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1987. 127 с.
2. *Головин Г.Ф., Зимин Н.В.* Технология термической обработки металлов с применением индукционного нагрева. Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1990. 87 с.
3. *Слухоцкий А.Е., Рыскин С.Е.* Индукторы для индукционного нагрева. Л.: Энергия, 1974. 264 с.
4. *Вайнберг А.М.* Индукционные плавильные печи. М.: Энергия, 1967. 416 с.
5. *Карташов Э.М.* Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел. М.: Высшая школа, 2001. 550 с.
6. *Льков А.В.* Тепломассообмен. М.: Энергия, 1978. 480 с.
7. *Демидович В.Б., Чмиленко Ф.В., Ситько П.А.* Моделирование и оптимизация индукционных нагревателей мерных заготовок в кузнечном производстве // Индукционный нагрев. 2013. № 2 (24). С. 15–17.
8. *Немков В.С., Демидович В.Б.* Теория и расчет устройств индукционного нагрева. Л.: Энергоатомиздат, 1988. 280 с.
9. *Rudnev V.* Handbook of Induction Heating. Second Edition. CRC Press. Taylor Francis Group. Boca Raton. London New York, 2017. 657 p.
10. *Демидович В.Б., Никитин Б.М., Иванов В.Н., Червинский В.Н., Баранкова И.И.* Актуальные энергосберегающие технологии индукционного нагрева в металлургии // Индукционный нагрев. 2008. № 4. С. 20–26.
11. ELCUT. Моделирование двумерных полей методом конечных элементов. Руководство пользователя. Версия 5.9. СПб: Производственный кооператив ТОР, 2009.
12. *Турбин В.В.* Численное моделирование процесса проходного индукционного нагрева металла перед пластической деформацией // Новая наука: проблемы и перспективы. 2017. № 1–2. С. 178–180.
13. *Базаров А.А.* Моделирование процесса теплопроводности для задач синтеза систем управления в среде MATLAB // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2005. Вып. 33. С. 7–11.
14. *Данилушкин А.И., Кожемякин А.В., Мостовой А.П.* Исследование режима нагрева ферромагнитных заготовок в двухчастотном индукционном нагревателе дискретно-непрерывного действия // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2013. Вып. 3 (72). С. 111–116.
15. *Демидович В.Б., Чмиленко Ф.В., Ситько П.А.* Моделирование и оптимизация индукционных нагревателей мерных заготовок в кузнечном производстве // Индукционный нагрев. 2013. Вып. 2 (24). С. 15–17.

16. *Drobenko B., Vankevych P., Ryzhov Y., Yakovlev M.* Rational approaches to high temperature induction heating // International Journal of Engineering Science. 2017. V. 117. P. 34–50.
17. *Кувалдин А.Б., Лепешкин А.Р.* Исследования теплового и термонапряженного состояния цилиндрических заготовок при скоростном индукционном нагреве // Индукционный нагрев. 2008. № 2. С. 4–13.
18. *Базаров А.А., Данилушкин А.И., Данилушкин В.А.* Комплексное моделирование и управление процессом непрерывного индукционного нагрева ферромагнитных заготовок // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2016. Вып. 2 (50). С. 128–139.

Статья поступила в редакцию 08 ноября 2022 г.

INDUCTION SYSTEM FOR HEATING LARGE RINGS BEFORE ROLLING

*A.I. Danilushkin, D.V. Kolpakov, N.R. Shtukurov**

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya str., Samara, 443100, Russian Federation

E-mail: aidanilushkin@mail.ru, sward63rus@mail.ru, vip.ue98@mail.ru

Abstract. *The paper considers the issues of designing an induction system for heating large-sized hollow cylindrical billets before rolling. The specific features of the billets heating process at the installation built into the technological processing line are noted. It is shown that for increasing the efficiency of the process of heating large-sized steel billets it is expedient to carry out the system of inductors with the use of a heat shield. A study of the process of heating of workpieces taking into account the nonlinear dependence of the physical characteristics of the metal of heated workpieces on the temperature changing in the process of heating is performed. The parameters of the induction system are calculated on the basis of a two-dimensional model. The geometric parameters of the circular billet resulted in a significant nonuniformity of the current density distribution along the axial coordinate of the billet due to the strongly pronounced boundary effects. The results of numerical calculation of the electromagnetic and thermal fields at different variations of the induction system design are presented. In order to substantiate and select the design of induction system that provides heating of the ring for the time caused by the work rate of the deforming equipment. A series of calculations was made, including three options: heating by an external cylindrical inductor; heating by two inductors: heating by inductor system with a heat shield. Analysis of efficiency of the investigated variants is based on multiple refinement of the results in the process of iterative design. Results of calculation of temperature distribution in the billet during heating are presented. The results of the research can be used to develop design and operating parameters of induction ring heating system in the rolling line.*

Keywords: *induction heating, rolling, mathematical model, electromagnetic field, edge effects, heat shield, temperature distribution.*

REFERENCES

1. *Bezruchko I.I.* Induction heating for forging [Indukcionnyj nagrev dlya ob'emnoj shtampovki]. L.: Mechanical engineering. Leningrad. department, 1987. 127 p. (In Russian).
2. *Golovin G.F., Zimin N.V.* Technology of heat treatment of metals using induction heating [Tekhnologiya termicheskoy obrabotki metallov s primeneniem indukcionnogo nagreva]. L.: Mashinostroenie. Leningrad department, 1990. 87 p. (In Russian).
3. *Slukhotsky A.E., Ryskin S.E.* Inductors for induction heating [Induktory dlya indukcionnogo nagreva]. L.: Energy, 1974. 264 p. (In Russian).
4. *Weinberg A.M.* Induction melting furnaces [Indukcionnye plavil'nye pechi]. M.: Energy, 1967. 416 p. (In Russian).
5. *Kartashov E.M.* Analytical methods in the theory of thermal conductivity of solids [Analiticheskie metody v teorii teploprovodnosti tverdyh tel]. M.: Vysshaya shkola, 2001. 550 p. (In Russian).
6. *Lykov A.V.* Heat and Mass Transfer [Teplomassoobmen]. M.: Energy, 1978. 480 p. (In Russian).
7. *Demidovich V.B., Chmilenko F.V., Sitko P.A.* Modeling and optimization of induction heaters for dimensional workpieces in forging [Modelirovanie i optimizaciya indukcionnyh nagre-

* *Aleksandr I. Danilushkin (Dr. (Techn.)), Professor.
Dmitry V. Kolpakov, Postgraduate Student.
Nikolay R. Shtukurov, Postgraduate Student.*

- vatelej mernyh zagotovok v kuznechnom proizvodstve] // Induction heating, 2013. No. 2 (24). P. 15–17. (In Russian).
8. *Nemkov V.S., Demidovich V.B.* Theory and calculation of induction heating devices [Teoriya i raschet ustrojstv indukcionnogo nagreva]. L.: Energoatomizdat, 1988. 280 p. (In Russian).
 9. *Rudnev V.* Handbook of Induction Heating. Second edition. C.R.C. Press. Taylor Francis Group. Boca Raton. London New York, 2017. 657 p.
 10. *Demidovich V.B., Nikitin B.M., Ivanov V.N., Chervinsky V.I., Barankova I.I.* Actual energy-saving technologies of induction heating in metallurgy [Aktual'nye energosberegayushchie tekhnologii indukcionnogo nagreva v metallurgii] // Induction heating, 2008. No. 4. Pp. 20–26. (In Russian).
 11. ELCUT. Modeling of two-dimensional fields by the finite element method. User guide. Version 5.9 [Modelirovanie dvumernyh polej metodom konechnyh elementov. Rukovodstvo pol'zovatelya]. St. Petersburg: Production cooperative TOR, 2009. (In Russian).
 12. *Turbin V.V.* Numerical modeling of the process of induction heating of a metal before plastic deformation [Chislennoe modelirovanie processa prohodnogo indukcionnogo nagreva metalla pered plasticheskoy deformatsiej] // New science: Problems and prospects. 2017. No. 1–2. Pp. 178–180. (In Russian).
 13. *Bazarov A.A.* Modeling of the heat conduction process for the problems of synthesis of control systems in the MATLAB environment [Modelirovanie processa teploprovodnosti dlya zadach sinteza sistem upravleniya v srede MATLAB] // Bulletin of the Samara State Technical University. Series: Technical Sciences, 2005. Issue 33. Pp. 7–11. (In Russian).
 14. *Danilushkin A.I., Kozhemyakin A.V., Mostovoy A.P.* Investigation of the mode of heating of ferromagnetic blanks in a two-frequency discrete-continuous induction heater [Issledovanie rezhima nagreva ferromagnitnyh zagotovok v dvuchastotnom indukcionnom nagrevatele diskretno-neprieryvno deystviya] // Bulletin of the Samara State Technical University. Series: Technical Sciences, 2013. Issue. No. 3 (72). Pp. 111–116. (In Russian).
 15. *Demidovich V.B., Chmilenko F.V., Sitko P.A.* Modeling and optimization of induction heaters for dimensional workpieces in forging [Modelirovanie i optimizaciya indukcionnyh nagrevatelej mernyh zagotovok v kuznechnom proizvodstve] // Induction heating, 2013. No. 2(24). Pp. 15–17. (In Russian).
 16. *Drobenko B., Vankevych P., Ryzhov Y., Yakovlev M.* Rational approaches to high temperature induction heating // International Journal of Engineering Science, 2017. V. 117. P. 34–50.
 17. *Kuvaldin A.B., Lepeshkin A.R.* Investigation of the thermal and thermal stress state of cylindrical blanks with high-speed induction heating [Issledovaniya teplovogo i termonapryazhennogo sostoyaniya tsilindricheskikh zagotovok pri skorostnom induktsionnom nagreve] // Induction heating, 2008. No. 2. P. 4–13. (In Russian).
 18. *Bazarov A.A., Danilushkin A.I., Danilushkin V.A.* Complex modeling and control of the process of continuous induction heating of ferromagnetic blanks [Kompleksnoe modelirovanie i upravlenie processom neprieryvno indukcionnogo nagreva ferromagnitnyh zagotovok] // Bulletin of the Samara State Technical University. Series: Technical Sciences, 2016. No. 2 (50). Pp. 128–139. (In Russian).

УДК 621.365

МЕТОДЫ И УСТАНОВКИ УТИЛИЗАЦИИ МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ ОТСЕВОВ ФЕРРОСПЛАВОВ

*В.Д. Кочкин, А.И. Алиферов, В.В. Золотарев**

Новосибирский государственный технический университет
Россия, 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

E-mail: alif@ngs.ru

Аннотация. На сегодняшний день производство таких ферросплавов, как ферросилиций, ферромарганец, ферросиликомарганец, феррохром высокоуглеродистый, исчисляется тысячами тонн в год. Подготовка ферросплава к продаже подразумевает дробление слитка ферросплава до товарной фракции, в результате которого остаются пылевидные отсевы, которые далее хранятся на складах и наносят вред окружающей среде. Отсев является уже готовым продуктом, аналогичным по составу товарной фракции, размер которой составляет 10–250 мкм. Для применения отсева в технологии получения сталей его необходимо повторно переплавить и отлить в слиток. Полученный слиток дробят повторно, чтобы получить товарную фракцию. Главной проблемой является переплав отсева, так как из-за его размеров и электрофизических свойств возникают различные трудности. В данной статье приведены методы и установки переплава отсева ферросплавов различных марок, а также их сравнение, недостатки и преимущества. Описаны плазменные, индукционные тигельные, а также дуговые установки постоянного и переменного тока, предназначенные для переплава отсева различных ферросплавов фракцией менее 10 мкм. Описаны недостатки и преимущества каждого способа и установки переплава отсева. Приведены различные экспериментальные данные, полученные путем плавки отсева ферросплавов в описанных установках. На основании описанных в статье данных, а также характеристик других установок в заключение предложен метод переплава отсева ферросплавов, который включает преимущества уже существующих методов и исключает их недостатки.

Ключевые слова: отсев ферросплавов, отходы ферросплавного производства, переплав пылевидных отсевов, руднотермические установки, дуговые установки.

Введение

Производство ферросплавов исчисляется в мире сотнями тысяч тонн ежегодно. Мировыми лидерами по производимому объему являются феррохром, ферромарганец, ферросилиций и силикомарганец. Ферросплавы получают в восстановительных печах. Закристаллизовавшийся слиток ферросплавов необходимо подготовить к дальнейшей продаже на рынке. Слитки ферросплава проходят дробление и грохочение с целью формирования кусковой фракции

* Виктор Дмитриевич Кочкин, аспирант кафедры автоматизированных электротехнологических установок.

Александр Иванович Алиферов, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой автоматизированных электротехнологических установок.

Владислав Владимирович Золотарев, аспирант кафедры автоматизированных электротехнологических установок.

размером от 10 до 250 мм. Такой размер фракции определен технологическим процессом получения сталей.

Фракция ферросплавов размером менее 10 мм составляет отсев. Основная часть отсева – пылевидная. Так, для ферросилиция марки 75 размер менее 1 мм составляет 45 % от общего объема отсева [1]. Для ферромарганца и ферросиликомарганца эти показатели еще выше. Процентное соотношение от общего объема отсева этих ферросплавов можно увидеть на рис. 1 [2].

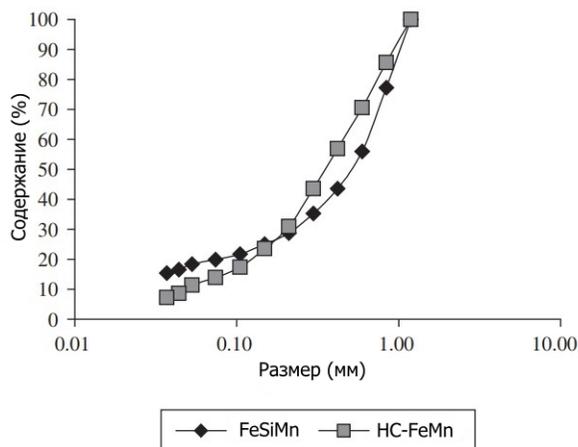


Рис. 1. Размер частиц и процентное соотношение отсева фракцией менее 1 мм [2]

Отсев ферросплавов является по сути уже готовым продуктом, технологическая ценность которого немногим меньше ценности товарного ферросплава. Наиболее простым способом его переработки была бы организация его переплава в руднотермической печи, в которой он был получен, но добавление фракции отсева в рудовосстановительную печь для его переплава в процессе реализации традиционной технологии производства ферросплава приводит к негативным последствиям работы печи, нарушается технологический процесс и электрический режим ее работы. Связано это с тем, что отсев имеет более низкое электросопротивление по сравнению с кусковой рудой, что приводит к изменению электрических параметров ванны, снижению газопроницаемости колошника, повышению содержания СО в объеме колошника, возможности образования свищей. Свищ – это высокотемпературный поток газа, вырывающегося под большим давлением из-под запекшегося верхнего слоя шихты. Свищи приводят к повреждению таких элементов конструкции печи, как кольцо гидроприжима, контактные щетки, водоохлаждаемые экраны и другие конструктивные элементы печи, находящиеся в непосредственной близости от колошника. При этом потери отсева на угар и улет составляют около 30–35 % от общего объема металла. Анализ распределения отсева между продуктами расплава показал, что мелкие и пылевые фракции практически полностью теряются со шламом в газоочистке и с отвальным шлаком. Кроме этого, как показали эксперименты на печах РПЗ-63 и РКГ-75, переплав отсева в печах такого типа оказался нецелесообразным по технико-экономическим параметрам [3].

Ежемесячное получение ферросплавов в России составляет 10–12 тыс. тонн, потери металла в отсев достигают 3–4 тыс. тонн, что приводит к постоянному накоплению отсева на полигонах, ухудшению состояния окружающей среды. При этом отсев ферросплавов является хорошим полуфабрикатом для получения товарного ферросплава. В связи с этим разрабатываются методы и установки для его переплава. Рассмотрим их особенности и характеристики.

Плазменные печи

Плазменные установки, как и руднотермические печи, используются для получения ферросплавов [4]. В отличие от руднотермических печей, в случае плазменной установки размер фракции не влияет на ее работу, что позволяет проводить переплав отсева ферросплавов без нарушения технологического режима получения ферросплава.

На рис. 2 показана установка с плазменной дугой, горящей непосредственно на переплавляемый материал. Данная печь предназначена для производства ферромарганца и переплава его отсева.

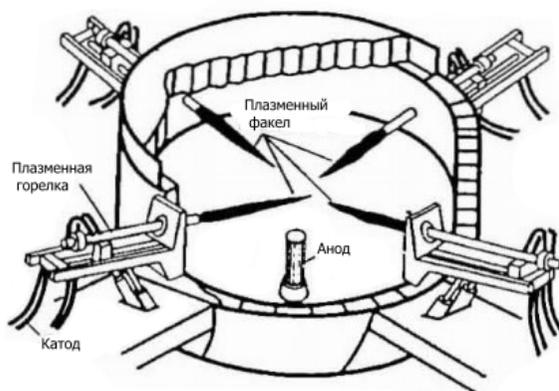


Рис. 2. Плазменная установка для получения ферромарганца и переплава его отсева системы Voest-Alpine [5, 6]

На рис. 3 показана плазменная установка с так называемым перемещаемым факелом, разработанная компанией Tetronics Research and Development для переплава отсева ферромарганца [7].

Загрузка печи производится через труботочки, установленные в своде печи. Особенностью данной печи является вращающийся водоохлаждаемый катод, расположенный в верхней части свода. Скорость вращения катода вокруг вертикальной оси печи влияет на протекание технологического процесса плавки. В печи, изображенной на рис. 3, были проведены контрольные плавки отсева высокоуглеродистого ферромарганца [7]. Мощность печи составила 3 МВА. Удалось достичь скорости подачи сырья в труботочки 1000 кг/ч при вводимой в печь активной мощности, равной 696 кВт на тонну отсева. Напряжение дуги составляло 300 вольт, ток дуги 2100 ампер, температура в печи 1500 °С.

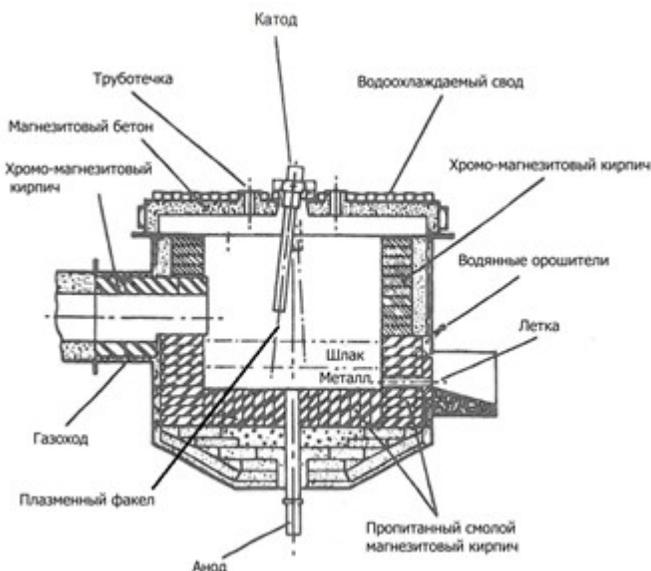


Рис. 3. Плазменная установка с перемещаемым факелом для переплава отсева феррохрома [7]

Плазменно-дуговые установки показали возможность переплава в них отсева различных ферросплавов. Однако из-за отсутствия таких печей большой мощности и емкости, а следовательно, и производительности, а также довольно короткого срока жизни электродов данные печи не нашли большого применения в промышленной технологии переплава ферросплавного отсева.

Индукционные печи

Другими установками, позволяющими производить переплав отсева ферросплавов, являются индукционные тигельные печи (ИТП). Нагрев загрузки в индукционной печи происходит в электромагнитном поле за счет теплового действия вихревых токов, протекающих по нагреваемому материалу. Плавка в индукционных печах становится все более распространенным процессом в литейном производстве и производстве полуфабрикатов с учетом их технического и экономического потенциала. Основные преимущества индукционного метода плавки заключаются в прямом подводе тепла к шихтовым материалам, а также возможности управления интенсивностью перемешивания расплава. Эти свойства обеспечивают необходимую температуру расплава с минимально возможным температурным перепадом по его объему, возможность управления технологическим процессом, низкие потери за счет угара переплавляемого металла, снижение загрязнения окружающей среды, а также высокую стабильность и точность технологического процесса. Сформированная после дробления нетоварная фракция ферросплава может быть переплавлена в индукционной тигельной печи, работающей только с остаточной несливаемой емкостью расплавленного металла, называемого «болотом». Это обеспечивает минимально возможный угар мелкодисперсного отсева. Кроме этого, отсев ферросилиция, например, имеет в своем составе до 15 % вкраплений неметаллических компонентов, таких как SiO_2 и Al_2O_3 (до 15 % объема отсева). Это приводит к образованию большого объема шлака на поверхности расплава. С увеличением объема шлака

он закрывает собой ванну, а подаваемая в печь шихта будет охлаждать шлак, увеличивая его вязкость и затрудняя процесс плавки. Образование очень вязкого шлака приводит к частым перерывам в работе индукционной печи для удаления его с поверхности ванны.

В [8] описана ИТП, работающая на частоте от 60 до 1000 Гц и имеющая геометрию, способствующую оптимальному перемешиванию ванны расплава. Разработанная технология предусматривала добавление шлакообразующих веществ вместе с шихтовым материалом для снижения температуры плавления шлака и его вязкости при рабочей температуре расплава ферросплава. Благодаря этим мерам оказалось возможным начиная с уровня «болота» в 50 % запустить непрерывный процесс плавки без какого-либо промежуточного удаления шлака до тех пор, пока печь не будет загружена до номинальной емкости.

В [9] выполнены экспериментальные исследования для оценки возможности переплава отсева ферросплавов в индукционной тигельной печи без остаточной емкости – «болота». В ходе экспериментальных плавки различных ферросплавов были определены индуктивность системы «индуктор – нагрузка» L и коэффициент добротности Q в зависимости от рабочей частоты тока индуктора (табл. 1). Добротность системы «индуктор – нагрузка» определялась как отношение активной мощности, потребляемой индуктором при наличии нагрузки, к активной мощности, потребляемой индуктором без нагрузки.

Таблица 1

Характеристики системы «индуктор – нагрузка» без нагрузки [9]

Частота, Гц	Характеристики индуктора	
	L (нГн)	Q (добротность)
1 000	12,8	0,9
5 000	12,51	4,3
10 000	12,48	8,3
20 000	12,44	15,5
30 000	12,42	22

Эксперименты показали, что при наличии в составе шихты большого количества частиц фракцией менее 3 мм снижается добротность Q , что влечет за собой уменьшение энергии, выделяемой в расплаве. Добавление в шихту кусков ферросплава размером 25 мм улучшают показатели выделения энергии в объеме шихты. При плавлении только мелкодисперсного отсева получалась добротность, которая была почти идентична добротности индуктора без нагрузки, что указывает на отсутствие выделения мощности в шихте. На основе выполненных исследований была обоснована рабочая частота. Результаты экспериментов приведены в табл. 2.

Время плавления зависит от мощности, вводимой в печь. Масса нагрузки варьировалась от 104 до 114 кг. На рис. 4 представлен график зависимости логарифма энергии от времени, необходимого для расплавления одной тонны отсева.

Обработка методом наименьших квадратов экспериментальных точек, изображенных на рис. 4, дает следующую зависимость:

$$\text{Log}G = 0.049t + 2.98, \frac{\log \frac{\text{Дж}}{\text{т}}}{\text{мин}}$$

Эксперимент показал, что потребление энергии составило 850 кВт на 1 тонну отсева ферросплава. В результате выполненных исследований было установлено, что для расплавления 110 кг мелочи ферросплавов за 45 мин потребуются 140 кВА при частоте тока 1,8–1,9 кГц [9].

Таблица 2

Характеристики системы «индуктор – нагрузка» при различной нагрузке

Частота	Характеристики при различной нагрузке							
	Пыль 0–105 мм		Пыль 0–2 мм		Пыль 0–3 мм		Пыль 0–3 мм с добавками кусков 25 мм	
Гц	L (нГн)	Q	L (нГн)	Q	L (нГн)	Q	L (нГн)	Q
1 000	13,09	0,9	12,78	0,9	12,76	0,9	13,7	0,9
5 000	12,79	4,3	12,82	4,4	12,52	4,4	12,9	4
10 000	12,76	8,4	12,49	8,5	12,49	8,4	12,7	7,1
20 000	12,72	15,7	12,45	15,8	12,45	15,6	12,5	11,94
30 000	12,7	22,2	12,43	22,3	12,42	21,6	12,4	15,73

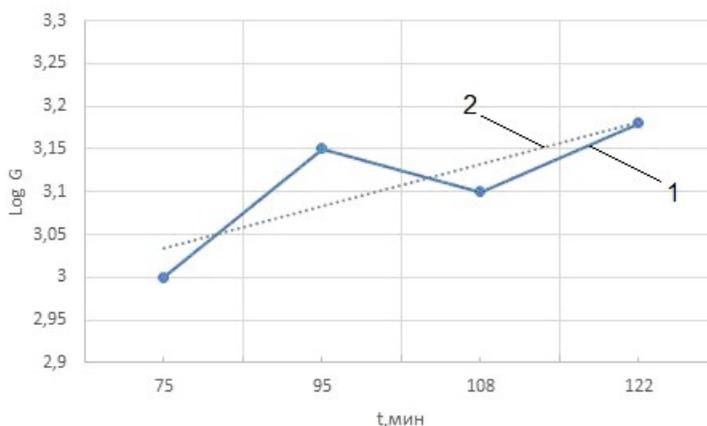


Рис. 4. Зависимость логарифма энергии, необходимой для расплавления одной тонны отсева ферросплава, от времени плавки [9]: 1 – зависимость, построенная по экспериментальным данным; 2 – зависимость, полученная в результате обработки данных эксперимента

Индукционные печи, несмотря на свои преимущества (интенсификация процесса, низкий угар металла, равномерное распределение температуры, быстрая скорость плавки), имеют значительные недостатки (малые объемы переплавляемого отсева в ИПП, дорогие источники питания, необходимость в квалифицированном персонале), которые делают их применение для промышленного переплава отсева ферросплавов нецелесообразным.

Дуговые печи постоянного тока

Переplав отсева ферросплавов также возможен в дуговой печи постоянного тока (ДППТ).

Экспериментальные плавки в ДППТ проводились на базе компании «Сибэлектротерм». Экспериментальная установка имела мощность 140 кВт, диапазоны напряжения и тока составляли 0...140 В и 0...2000 А [1]. Электропечь имела по одному электроду на своде и подине. Печь работала в постоянном режиме плавления без отключения питания. Слив металла проводился без наклона печи через летки, расположенные сбоку ванны. После слива на дне ванны оставалось около 20 % расплава. Плавка производилась в течение 40–50 минут с открытой дугой. Мощность, вводимая в установку, составила 120 кВт, напряжение и ток на электроде составляли 60 В и 2 кА соответственно.

Таблица 3

Химический состав полученного ферросплава [1]

№ образца	Состав шлака, кг		Вес металла, кг	Состав, %					
	Ферросилиций	Флюс		Si	Al	Ca	Mn	Ti	P
1	50,0	2,5	44,9	72,7	1,94	0,63	0,40	0,12	0,03
2	50,0	5,0	46,0	74,6	1,90	0,60	0,38	0,12	0,03

Состав полученного ферросилиция представлен в табл. 3. Полученные результаты удовлетворяют по составу конечной продукции. Удельный расход энергии на 1 тонну ферросилиция 75 % и 50 кг флюса составил 920 кВт·ч. На основе полученных экспериментальных данных были определены параметры ДППТ емкостью 6 т и мощностью 4,5 мВт с расчетной производительностью 88,3 т в сутки или соответственно 32,23 тыс. т в год.

На ферросплавном заводе в Актобе были проведены экспериментальные плавки на дуговой печи постоянного тока мощностью 1,8 МВА. В качестве шихты использовался отсев высокоуглеродистого феррохрома [10]. Как и предыдущая, данная печь также имеет по одному электроду, расположенному на подине футеровки и на своде. Печь работала с открытой дугой. Пуск печи осуществлялся на коксовую постель, которая подкладывалась под электрод. Затем в печь загружали отсев высокоуглеродистого феррохрома. Слив печи производится путем ее наклона.

Главным недостатком ДППТ является то, что переplав отсева производится с открытой дугой, что приводит к большому его угару.

Рудно-термические печи

Сложная проблема повышения уровня извлечения металлической фазы из нестандартного отсева была решена в [3] путем разработки и внедрения технологии, предназначенной для переplавки отсева в существующей электропечи РКЗ-22,5. Печь была реконструирована. В ходе реконструкции были уменьшены диаметр электродов и глубина ванны печи, что позволило увеличить удельную мощность [3].

Загружаемые материалы подавались в печь по загрузочным трубам в центральную часть свода под электроды и по периферии ванны. Шихта из ферросилиций-марганцевого отвального шлака и шлако-металлических отходов в соотношении 0,05 и 0,12 добавляется к отсеvu, чтобы увеличить электрическое со-

противление в ванне печи и обеспечить удовлетворительный электрический режим технологического процесса. В результате исследований установлено, что необходимо вводить различную по фракционности и составу загрузку материалов в центр печи и на ее периферию. Это приводит к понижению вероятности спекания колошника, обеспечивая приемлемые электрические и газовые условия эксплуатации.

В ходе исследований было установлено, что оптимальное значение активной мощности составляет около 10–15 МВт. В рабочем режиме плавки сила тока составляет 45–55 кА. В процессе работы сопротивление под электродами постепенно снижается, сила тока растет, а размер тигля увеличивается. Перед сливом расплава технологические условия начинают ухудшаться – сопротивление под электродом снижается с 1,5 до 0,6–0,9 мОм, сила тока увеличивается до 60–75 кА, а мощность снижается до 7–9 МВт. Слив расплава длится 20–30 минут. Масса расплава составляет 25–35 т металла и 7–15 т шлака. Химический состав металла с точки зрения состава марганца и фосфора соответствует составу отсева в твердой фазе. Концентрация кремния в сплаве находится в стабильном диапазоне 16–17 %. Выход годного металла составил 85 %. Удельный расход электроэнергии составил 767 кВт·ч на тонну полученного расплава и 554 кВт·ч на тонну переплавленной шихты.

Распределение шихты разной проводимости по объему колошника усложняет технологический процесс и его контроль. Несоответствие проводимости ванны печи может привести к потерям большего количества металла и остановке печи. Рост проводимости в конце плавки и резкие скачки тока могут привести к быстрому росту температуры ванны и, соответственно, к увеличению угара отсева и газообразования. Кроме этого, данный процесс переплава отсева ферросплавов сопровождается получением большого объема шлака (до 30–40 % от объема ферросплава), периодически сливаемого из печи.

Самораспространяющийся высокотемпературный синтез

Принципиально иным способом утилизации пылевидных и других отходов ферросплавного производства является предложенный в [11] металлургический самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС-процесс). Новая технология основана на применении различных металлургических сплавов в качестве основного сырья, включая пылевидные отходы производства ферросплавов. При минимальном расходе электроэнергии металлургический СВС-процесс позволяет получать высококачественные композиционные материалы на основе неорганических соединений со связкой из железа и/или сплава на его основе для внедрения в сталеплавильном и доменном производстве. Традиционный СВС-процесс протекает за счет тепла реакций прямого синтеза [11]. В его металлургическом варианте основными реагентами исходной экзотермической шихты являются ферросплавы или их отсева, и процесс реализуется посредством обменных экзотермических реакций. Они близки к металлургическим реакциям. Основным сырьем металлургического СВС-процесса являются сплавы железа: силициды (FeSi , FeSi_2 , MnSi_2), интерметаллиды (VFe , TiFe , $\text{Nb}_{19}\text{Fe}_{21}$), бориды (FeB , FeBN) и различные их сочетания. При реализации СВС-процесса с их участием образуется композиционный материал на основе неорганических соединений (карбидов, боридов, нитридов и т. д.) со связкой из железа и/или сплава на его основе [12].

Перспективным применением переплавляемых отсевов ферросплавного производства является их азотирование в СВС-процессе. Азотирование отсевов ферросилиция приводит к образованию $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-Fe}$, который используется в качестве упрочняющей добавки в неформованных огнеупорах. Азотирование отсева феррованадия позволяет получить два типа нитрида феррованадия: плавленый и спеченный. Первый предназначен для кускового легирования сталей в ковше, второй используется в качестве наполнителя порошковой проволоки для корректировки содержания азота перед разливкой. Нитрид ванадия может быть использован при выплавке различных марок высокопрочных сталей, а также рельсовой и быстрорежущей стали.

Сложность контроля процесса, подготовки сырья, небольшие объемы получаемой продукции указывают на то, что данный метод сейчас не может быть основным при переработке мелкодисперсного отсева ферросплавов.

Выводы

Из рассмотренных методов переработки отсевов каждый имеет свои преимущества и недостатки.

Несмотря на хорошие показатели индукционных тигельных печей по выходу металла и скорости плавки, они имеют ряд недостатков: маленькая емкость печей, наличие источников питания повышенной частоты, которые являются дорогостоящими и сложными в обслуживании. Учитывая объем образующегося ежегодно отсева ферросплавов, можно утверждать, что индукционные тигельные печи не смогут покрыть нужды ферросплавного производства по их переплаву.

Плазменные печи имеют малые объемы рабочей ванны, а также короткий ресурс работы катодов и высокую цену содержания печи.

Метод самораспространяющегося высокотемпературного синтеза не распространен, сложен в реализации и требует специально обученного персонала.

Плавка отсевов в дуговых печах постоянного или переменного тока производится открытыми дугами, что приводит к большому угару шихты и образованию пылегазовой смеси, удаляемой из печи, что снижает выход конечной продукции и наносит вред персоналу и окружающей среде.

Как показывает анализ существующих методов переплава отсева ферросплавного производства, наиболее экономичным по угару мелкодисперсной шихты является режим плавления с остаточной емкостью в индукционных тигельных печах, а по объемам и производительности наиболее приемлемой является технология переплава в трехфазных электродных электропечах. Сочетание достоинств этих методов переплава возможно в технологическом процессе, реализуемом в режиме шлакового переплава отсева ферросплавов в электропечи, конструктивно аналогичной дуговой сталеплавильной печи с тремя графитированными электродами, погруженными в жидкий шлак. При этом эксплуатация трехфазных электродных шлаковых печей значительно проще, чем индукционных тигельных и плазменных печей, а также дуговых сталеплавильных переменного и постоянного тока. Персонал ферросплавного завода имеет навыки работы с подобными установками, что упрощает процесс ввода их в эксплуатацию и обучение персонала. Источники питания переменного тока дешевле и проще в обслуживании, чем постоянного. Все это говорит о том, что трехфазная электродная печь, работающая с выделением тепла в жидкой шлаковой ван-

не, является наиболее приемлемым решением для переработки отсева «больших» ферросплавов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Cherednichenko M.V., Zuev S.P.* Ferroalloy industry waste processing // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Novosibirsk, 2019. P. 021134.
2. *Lucio de Faria G., Gabriel da Silva Araujo F., Batista Vieira C., Leopoldo von Kruger F., Jannotti N.Jr.* Characterization of Manganese Alloy Residues for the Recycling of FeSiMn and High-Carbon FeMn fines // Materials Research. 2008. Vol. 11, no. 4. Pp. 405–408.
3. *Kutsin V.S., Olshansky V.I., Filippov I.Yu., Chumakov A.A., Ganotsky V.G.* The development and introduction of resource saving technology of non-standard manganese ferroalloy fines recycling // Infacon XIV: Energy efficiency and environmental friendliness are the future of the global Ferroalloy industry. Kiev, Ukraine, 2015. Pp. 745–749.
4. *Kumar R., Sanyal D.* Plasma Technology in ferroalloy processing // 4th Refresher Course on Ferro Alloys. Jamshedpur, India, 1994. P. 15.01–15.20.
5. *Mac Rae D.R.* Plasma-arc technology for ferroalloys. Part II // Infacon 6: Proceedings of the 6th International Ferroalloys Congress. Republic of South Africa, 1992. P. 21–35.
6. *Maske K.U., Barcza N.A.* Recent developments in pyrometallurgical plasma technology // Conference: Innovation in processing ores and scrap. Colorado, USA, 1983. P. 10.
7. *Cowx P.M., Heanley C.P.* The melting and refining of metallic ferroalloy fines in the tetronics plasma furnace // ISPC-7. Eindhoven, Nederland, 1985. P. 1201–1207.
8. *Schmitz W., Trauzeddel D.* Latest Developments in Recycling Production Residues Employing Coreless Induction Furnaces // European Metallurgical Conference. Weimer, Germany, 2013. P. 807–820.
9. *Lemire C., Biscaro A.* Induction melting of ferro-alloy fines // Infacon X: Transformation through technology. Cape Town, South Africa, 2004. Pp. 528–533.
10. *Sariev O., Kelamannov B., Zhumangaliyev Ye., Kim S., Abdirashit A., Almagambetov M.* Remelting the high-carbon ferrochrome dust in a direct current arc furnace (DCF) // Metalurgija, 2020. Vol. 59, no. 4. P. 533–536.
11. *Манашев И.П., Гаврилова Т.О., Шатохин И.М., Зиятдинов М.Х., Леонтьев Л.И.* Утилизация дисперсных отходов ферросплавного производства на базе металлургического СВС-процесса // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2020. Т. 63. № 8. С. 591–599.
12. *Shatokhin I.M., Ziatdinov M.Kh., Smirnov L.A., Manashev I.R.* Nitrided Ferroalloy Production By Metallurgical SHS Process: Scientific Foundations and Technology // NIOKR-2018, Ekaterinburg. 2018. Pp. 191–206.

Статья поступила в редакцию 09 декабря 2022 г.

METHODS AND INSTALLATIONS FOR UTILIZATION OF FINE SCREENINGS OF FERROALLOYS

*V.D. Kochkin, A.I. Aliferov, V.V. Zolotarev**

Novosibirsk State Technical University
20, avenu K. Marks, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

E-mail: alif@ngs.ru

Abstract. *To date, the production of such ferroalloys as ferrosilicon, ferromanganese, ferrosilicomanganese, high-carbon ferrochrome amounts to thousands of tons per year. Preparation of the ferroalloy for sale involves crushing the ferroalloy ingot to the commercial fraction, as a result of which there are dust-like screenings, which are further stored in warehouses and harm the environment. The existing sieving is a finished product, which in composition is close to the final fraction, the size of which is 10-250 mm. To apply sieving in steel production technology, it must be re-melted and cast into an ingot. The resulting ingot is repeatedly crushed until a commercial fraction is obtained. The main problem is the remelting of the dropout, since various difficulties arise due to its size and electrophysical properties. This article presents methods and installations for remelting sieving ferroalloys of various brands, as well as their comparison, disadvantages and advantages. The article describes plasma, induction crucible, as well as dual DC and AC installations designed for remelting sieving of various ferroalloys with a fraction less than 10 mm. The disadvantages and advantages of each method and remelting installation are described. Various experimental data obtained during the melting of ferroalloys sieving in the described installations are presented. Based on the data described in the article, as well as relying on other conclusions, in conclusion, a method of remelting with the removal of ferroalloys was proposed, including the advantages of existing ones, as well as excluding their disadvantages.*

Keywords: *ferroalloy screening, waste of ferroalloy production, remelting of pulverized screenings, ore-thermal installations, arc installations.*

REFERENCES

1. *Cherednichenko M.V., Zuev S.P.* Ferroalloy industry waste processing // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Novosibirsk, 2019. P. 021134.
2. *Lucio de Faria G., Gabriel da Silva Araujo F., Batista Vieira C., Leopoldo von Kruger F., Jannotti N.Jr.* Characterization of Manganese Alloy Residues for the Recycling of FeSiMn and High-Carbon FeMn fines // Materials Research. 2008. Vol. 11, no. 4. Pp. 405–408.
3. *Kutsin V.S., Olshansky V.I., Filippov I.Yu., Chumakov A.A., Ganotsky V.G.* The development and introduction of resource saving technology of non-standard manganese ferroalloy fines recycling // Infacon XIV: Energy efficiency and environmental friendliness are the future of the global Ferroalloy industry. Kiev, Ukraine, 2015. Pp. 745–749.
4. *Kumar R., Sanyal D.* Plasma Technology in ferroalloy processing // 4th Refresher Course on Ferro Alloys. Jamshedpur, India, 1994. P. 15.01–15.20.
5. *Mac Rae D.R.* Plasma-arc technology for ferroalloys. Part II // Infacon 6: Proceedings of the 6th International Ferroalloys Congress. Republic of South Africa, 1992. P. 21–35.
6. *Maske K.U., Barcza N.A.* Recent developments in pyrometallurgical plasma technology // Conference: Innovation in processing ores and scrap. Colorado, USA, 1983. P. 10.
7. *Cowx P.M., Heanley C.P.* The melting and refining of metallic ferroalloy fines in the tetronics plasma furnace // ISPC-7. Eindhoven, Nederland, 1985. P. 1201–1207.

* *Victor D. Kochkin, Postgraduate Student.
Alexander I. Aliferov (Dr. (Techn.)), Professor.
Vladislav V. Zolotarev, Postgraduate Student.*

8. *Schmitz W., Trauzeddel D.* Latest Developments in Recycling Production Residues Employing Coreless Induction Furnaces // European Metallurgical Conference. Weimer, Germany, 2013. P. 807–820.
9. *Lemire C., Biscaro A.* Induction melting of ferro-alloy fines // Infacon X: Transformation through technology. Cape Town, South Africa, 2004. Pp. 528–533.
10. *Sariev O., Kelamannov B., Zhumangaliyev Ye., Kim S., Abdirashit A., Almagambetov M.* Remelting the high-carbon ferrochrome dust in a direct current arc furnace (DCF) // *Metalurgija*, 2020. Vol. 59, no. 4. P. 533–536.
11. *Manashev I.R., Gavrilova T.O., SHatohin I.M., Ziatdinov M.H., Leont'ev L.I.* Utilization of dispersed wastes of ferroalloy production based on the metallurgical SHS process [Utilizaciya dispersnyh othodov ferrosplavnogo proizvodstva na baze metallurgicheskogo SVS- processa] // *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Chernaya metallurgiya*, 2020. V. 63, no. 8. Pp. 591–599. (In Russian).
12. *Shatokhin I.M., Ziatdinov M.Kh., Smirnov L.A., Manashev I.R.* Nitrided Ferroalloy Production By Metallurgical SHS Process: Scientific Foundations and Technology // *NIOKR-2018*, Ekaterinburg, 2018. Pp. 191–206.

УДК 621.3.078

АНАЛИЗ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОДШИПНИКОВ ПРИ СМЕЩЕНИИ ЦЕНТРА МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ ОТНОСИТЕЛЬНО ОСИ ВРАЩЕНИЯ И ВАРИАЦИИ НАПРЯЖЕНИЯ ПИТАНИЯ

*А.В. Стариков, В.Д. Костюков**

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: star58@mail.ru, kostyukovvlad@yandex.ru

Аннотация. Поставлена задача снижения потребления электрической энергии электромагнитными подшипниками. Для достижения поставленной цели предложено сместить центр магнитной системы подшипников, осуществляющих компенсацию веса ротора, относительно оси вращения. Величина смещения принята равной половине величины зазора в страховочных подшипниках рассматриваемого агрегата. Приведена математическая модель радиального электромагнитного подшипника, его расчетная схема с учетом смещения центра магнитной системы относительно оси вращения, структурная схема трехконтурной системы управления и формулы для расчета параметров регуляторов. Определены настройки регуляторов для конкретного типа электромагнитных подшипников. Разработана расчетная модель, позволяющая исследовать работу электромагнитного подшипника при смещении центра магнитной системы относительно оси вращения и вариации напряжения питания. Приведены результаты моделирования в программной среде Matlab Simulink процесса всплытия ротора со страховочных подшипников и левитации ротора в смещенном состоянии при различных величинах питающего напряжения. Показано, что снижение напряжения на 16,7 % обеспечивает устойчивую работу электромагнитного подвеса ротора во всех возможных режимах. Следовательно, смещение центра магнитной системы позволяет снизить потребляемую электромагнитными подшипниками мощность на 30 %.

Ключевые слова: электромагнитный подшипник, напряжение питания, потребляемая мощность, энергетическая эффективность.

Введение

В настоящее время электромагнитные подшипники достаточно широко используются на практике. Их применение охватывает ключевые сферы промышленности, такие как транспорт, энергетика, топливно-энергетический комплекс, станкостроение, авиация, космическая отрасль и др. Например, применение электромагнитных подшипников (активных магнитных подшипников) является перспективным направлением в области энергетического машиностроения. Действительно, замена в газоперекачивающих агрегатах и мощных электродвигателях гидростатических подшипников скольжения на электромагнитные по-

* Александр Владимирович Стариков, доктор технических наук, профессор кафедры электропривода и промышленной автоматики.

Владислав Дмитриевич Костюков, аспирант кафедры электропривода и промышленной автоматики.

зволяет исключить маслосистему, снизить механические потери на трение и повысить ресурс работы оборудования [1–11]. При этом происходит снижение потребления электрической энергии, необходимой для функционирования маслосистемы подшипников скольжения. Кроме того, применение электромагнитных подшипников актуально в высокоскоростных электрошпинделях, поскольку наряду с увеличением межремонтного периода позволяет обеспечить высокую жесткость опор [12, 13].

Однако электромагнитные подшипники сами по себе потребляют электрическую энергию, которая идет на поддержание ротора в требуемом положении и нагрев обмоток электромагнитов. Наряду с высокой стоимостью и сложностью конструкции данный аспект также относят к перечню недостатков электромагнитных подшипников. В настоящее время вопросы энергосбережения являются весьма актуальными и учитываются при проектировании и разработке любого электротехнического устройства. В связи с этим целью работы является снижение потребления электроэнергии активными магнитными подшипниками.

Решение поставленной задачи

Для достижения поставленной цели предлагается сместить центр магнитной системы электромагнитных подшипников, компенсирующих вес ротора, относительно оси вращения. Это позволит при одном и том же токе электромагнита за счет уменьшения воздушного зазора увеличить силу притяжения электромагнита, направленную против силы веса.

Рассмотрим случай, когда ротор какого-либо агрегата, оснащенного электромагнитными подшипниками, расположен горизонтально. Тогда компенсацию веса ротора будут производить радиальные электромагнитные подшипники. Расчетная схема одного радиального электромагнитного подшипника с учетом смещения центра магнитной системы относительно оси вращения приведена на рис. 1. Управление токами I_1 и I_3 электромагнитов ЭМ1 и ЭМ3, расположенных по оси x , производится независимо от регулирования токами I_2 и I_4 электромагнитов ЭМ2 и ЭМ4, действующих по оси y .

Если использовать дифференциальный закон управления электромагнитами каждой оси, при котором увеличение тока одного электромагнита приводит к пропорциональному уменьшению тока противоположного электромагнита, то перемещение ротора, например, по оси y описывается следующей системой уравнений [14]:

$$\left. \begin{aligned} U(k_{ШИМ} N_y + 0,5) &= L_2 \frac{dI_2}{dt} + R_2 I_2 + k_{E2} \frac{dy}{dt} + L_{24} \frac{dI_4}{dt}; \\ U(0,5 - k_{ШИМ} N_y) &= L_4 \frac{dI_4}{dt} + R_4 I_4 - k_{E4} \frac{dy}{dt} + L_{42} \frac{dI_2}{dt}; \\ m \frac{d^2 y}{dt^2} &= k_{ЭМ} \left(\frac{I_2}{I_2 + I_4} - 0,5 \right) + k_F y - G_y \pm F_{э}, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где U , $k_{ШИМ}$ и N_y – опорное напряжение, коэффициент передачи и величина сигнала на входе широтно-импульсного модулятора (ШИМ); L_2 , R_2 – индуктивность и активное сопротивление обмотки второго электромагнита ЭМ2; L_4 ,

R_4 – индуктивность и активное сопротивление обмотки третьего электромагнита ЭМ4; L_{24} и L_{42} – коэффициенты взаимной индукции между электромагнитами; k_{E2} и k_{E4} – коэффициенты, связывающие наводимые в соответствующих обмотках электродвижущие силы со скоростью перемещения ротора; m – масса ротора, приходящаяся на один радиальный электромагнитный подшипник; k_F – коэффициент положительной обратной связи по перемещению; $k_{ЭМ}$ – коэффициент, связывающий силу, действующую на ротор, с токами I_2 и I_4 во втором и четвертом электромагнитах; G_y – часть веса ротора, приходящаяся на ось y радиального электромагнитного подшипника; F_{gy} – составляющая внешней возмущающей силы по оси y .

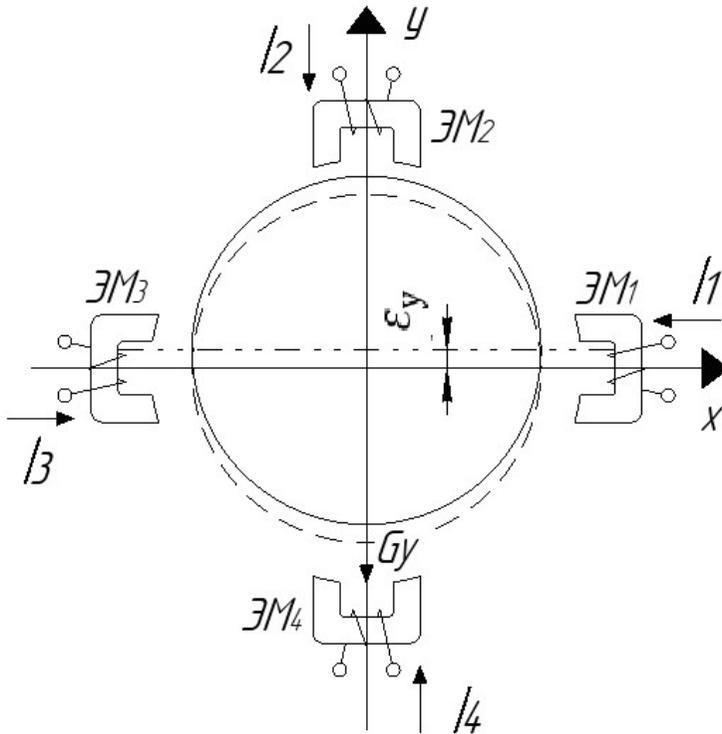


Рис. 1. Расчетная схема радиального электромагнитного подшипника с учетом смещения центра магнитной системы относительно оси вращения

Системе уравнений (1) соответствует следующая передаточная функция радиального электромагнитного подшипника как объекта управления [15]:

$$W_{ov}(p) = \frac{\frac{k_{ШИМ}k_{ЭМ}U(I_{20}R_2 + I_{40}R_4)}{k_F R_2 R_4 (I_{20} + I_{40})^2} \left[\frac{I_{20}(R_2 T_2 + L_{42}) + I_{40}(R_4 T_4 + L_{24})}{I_{20}R_2 + I_{40}R_4} p + 1 \right]}{\frac{m}{k_F} \left(T_2 T_4 - \frac{L_{24} L_{42}}{R_2 R_4} \right) p^4 + \frac{m(T_2 + T_4)}{k_F} p^3 + \left[\frac{m}{k_F} + \frac{k_{ЭМ}}{k_F R_2 R_4} \times \right.} \quad (2)$$

$$\times \frac{I_{20}(k_{E4} R_2 T_2 + k_{E2} L_{42}) + I_{40}(k_{E2} R_4 T_4 + k_{E2} L_{24}) + \frac{L_{24} L_{42}}{R_2 R_4} - T_2 T_4}{(I_{20} + I_{40})^2} \left. \right] p^2 +$$

$$+ \left[\frac{k_{ЭМ}}{k_F R_2 R_4} \frac{I_{20} k_{E4} R_2 + I_{40} k_{E2} R_4}{(I_{20} + I_{40})^2} - (T_2 + T_4) \right] p - 1,$$

где I_{20} и I_{40} – начальные значения токов в рабочей точке; $T_2 = \frac{L_2}{R_2}$ и $T_4 = \frac{L_4}{R_4}$ – постоянные времени обмоток электромагнитов, вызванные собственными индуктивностями L_2 и L_4 .

Основные особенности электромагнитных подшипников как объектов управления заключаются в нестационарности и принципиальной неустойчивости [15]. Нестационарность проявляется в том, что такие параметры электромагнитного подшипника, как L_2 , L_4 , k_F , $k_{ЭМ}$, k_{E2} и k_{E4} , изменяются в функции смещения ротора относительно центра магнитной системы. Неустойчивость связана с наличием положительной обратной связи по перемещению.

При исследовании влияния смещения центра магнитной системы электромагнитных подшипников относительно оси вращения на работу предположим, что управление электромагнитным подшипником по каждой оси осуществляет трехконтурная система управления (рис. 2) [16, 17].

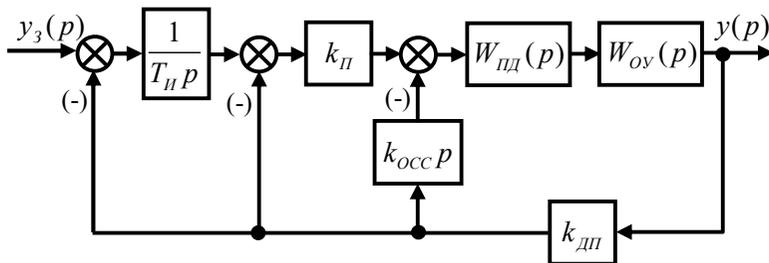


Рис. 2. Структурная схема непрерывного прототипа трехконтурной системы управления электромагнитным подшипником

Она содержит во внутреннем контуре пропорционально-дифференциальный регулятор с передаточной функцией

$$W_{ПД}(p) = k_{ПД}(T_{ПД} p + 1),$$

где $k_{ПД}$ – коэффициент передачи; $T_{ПД}$ – постоянная времени регулятора, который обеспечивает компенсацию основной инерционности объекта.

Во втором и третьем контурах применены соответственно пропорциональный регулятор с коэффициентом передачи $k_{П}$ и интегральный регулятор,

имеющий постоянную времени T_{II} . Эти регуляторы предназначены для придания электромагнитному подшипнику требуемых динамических и статических свойств.

Параметры регуляторов системы управления электромагнитным подшипником рассчитываются для центрального положения ротора относительно магнитной системы подшипника по следующим аналитическим выражениям [17, 18]:

$$\left. \begin{aligned} T_{ПД} &= 3T_{\mathcal{E}}; \\ k_{ПД} &= k_{II}; \\ k_{ОСС} &= 2\xi \sqrt{\frac{m}{3k_{ШИМ}k_{ЭМ}k_{ДП}} - \frac{2m}{9k_{ПД}k_{ШИМ}k_{ЭМ}k_{ДП}T_{\mathcal{E}}}}; \\ T_{II} &= \frac{2,19(-b + \sqrt{b^2 - 4ac})}{a}, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где $T_{\mathcal{E}} = \frac{L_2 - L_{24}}{R_2}$; ξ – задаваемый параметр демпфирования колебаний;

$$\begin{aligned} a &= (k_2 - k_F)(m + k_1 T_{ПД}) \left(\frac{k_{ЭМ} k_E}{U} + k_1 + k_2 T_{ПД} - k_F T_{\mathcal{E}} \right) - m(k_2 - k_F)^2 T_{\mathcal{E}}; \\ b &= k_2 T_{ПД} (m + k_1 T_{ПД}) \left(\frac{k_{ЭМ} k_E}{U} + k_1 + k_2 T_{ПД} - k_F T_{\mathcal{E}} \right) - 2mk_2(k_2 - k_F) T_{ПД} T_{\mathcal{E}} - k_2(m + k_1 T_{ПД})^2; \\ c &= -mT_{\mathcal{E}} k_2^2 T_{ПД}^2; \quad k_1 = k_{ПД} k_{ШИМ} k_{ЭМ} k_{ОСС} k_{ДП}; \quad k_2 = k_{II} k_{ПД} k_{ШИМ} k_{ЭМ} k_{ДП}. \end{aligned}$$

Для оценки влияния смещения центра магнитной системы относительно оси вращения на качество работы и энергопотребление радиального электромагнитного подшипника воспользуемся методом компьютерного моделирования в программе Matlab Simulink. При этом возьмем за основу характеристики электромагнитов, разработанных для электромагнитного подвеса ротора опытного образца турбоагнетателя 6ТК-Э дизеля локомотива [19, 20].

В рассматриваемом агрегате масса ротора, приходящаяся на один электромагнитный подшипник, составляет $m = 18$ кг, а опорное напряжение широтно-импульсного преобразователя – $U = 60$ В. При центральном положении ротора электромагниты характеризуются следующими параметрами: $L_2 = L_4 = 2,54$ Гн; $R_2 = R_4 = 96,6$ Ом; $L_{24} = L_{42} = 0,0033$ Гн; $k_E = k_{E2} = k_{E4} = 1544$ Вс/м; $k_{ЭМ} = 1272$ Н; $k_F = 1424000$ Н/м.

Принимая в качестве коэффициента передачи широтно-импульсного модулятора $k_{ШИМ} = 0,0001221$, что соответствует 12-разрядному ШИМ, при $\xi = 0,216$ по формулам (3) найдем требуемые настройки регуляторов системы управления электромагнитным подшипником: $T_{ПД} = 0,079$ с; $k_{ПД} = k_{II} = 2$; $k_{ОСС} = 0,0008$ с; $T_{II} = 0,008$ с.

Теперь проверим работоспособность радиального электромагнитного подшипника при смещении центра магнитной системы от оси y вращения ротора на величину $\varepsilon_y = 0,000125$ м. При этом учтем, что параметры электромагнитов

изменяться и станут равными: $L_2 = 3,05$ Гн; $L_4 = 2,15$ Гн; $k_{E2} = 2174$ Вc/м; $k_{E4} = 913$ Вc/м; $k_{ЭМ} = 1361$ Н; $k_F = 1360000$ Н/м.

Расчетная модель цифровой системы управления электромагнитным подшипником (ЭМП) при периоде дискретизации $T = 0,0002$ с приведена на рис. 3. Она содержит объект управления (рис. 4), учитывающий приведенные выше параметры, а также ограничения силы электромагнитов на уровне 732 Н и перемещений в диапазоне $\pm 0,00025$ м.

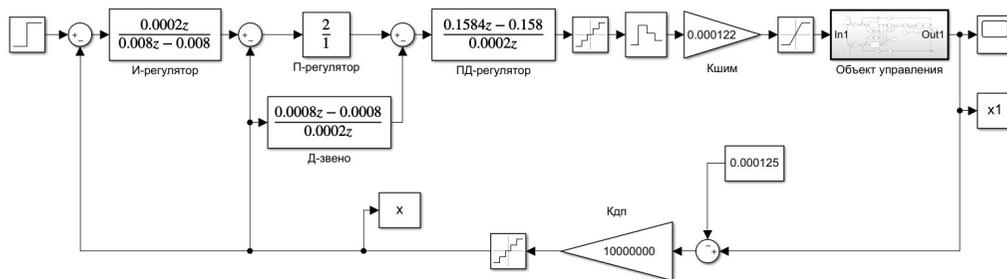


Рис. 3. Расчетная модель цифровой системы управления электромагнитным подшипником

Расчетная модель позволяет построить график перемещения ротора из нулевого относительно центра магнитной системы положения в координату $y = 0,000125$ м (рис. 5). Он показывает, что при выбранных настройках регуляторов система управления электромагнитным подшипником работает устойчиво и при смещении центра магнитной системы относительно оси вращения ротора.

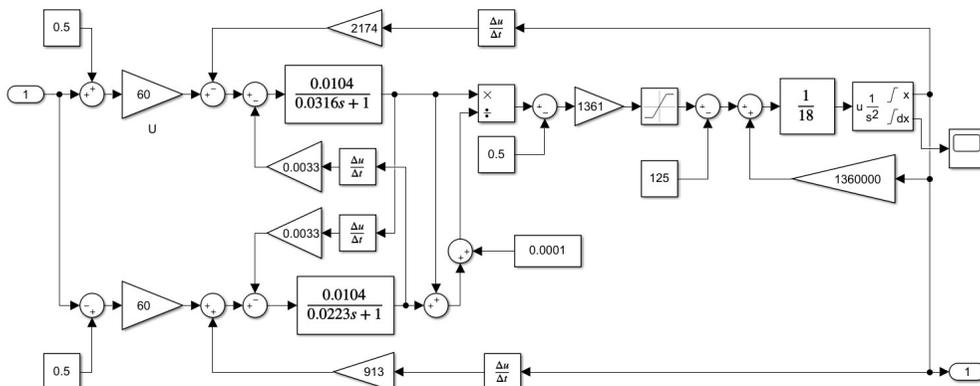


Рис. 4. Расчетная модель электромагнитного подшипника как объекта управления при напряжении питания $U = 60$ В и смещении оси вращения на $\epsilon_y = 0,000125$ м относительно центра магнитной системы

Попытаемся теперь уменьшить опорное напряжение ШИМ до $U = 50$ В. Компьютерное моделирование показывает, что при уменьшении напряжения питания обмоток электромагнитов получается переходный процесс, аналогичный графику, приведенному на рис. 5. Так же ведет себя радиальный электромагнитный подшипник и при опорном напряжении ШИМ, равным 40 и 30 В.

Однако при включении системы управления электромагнитным подвесом изначально ротор находится на страховочных подшипниках.

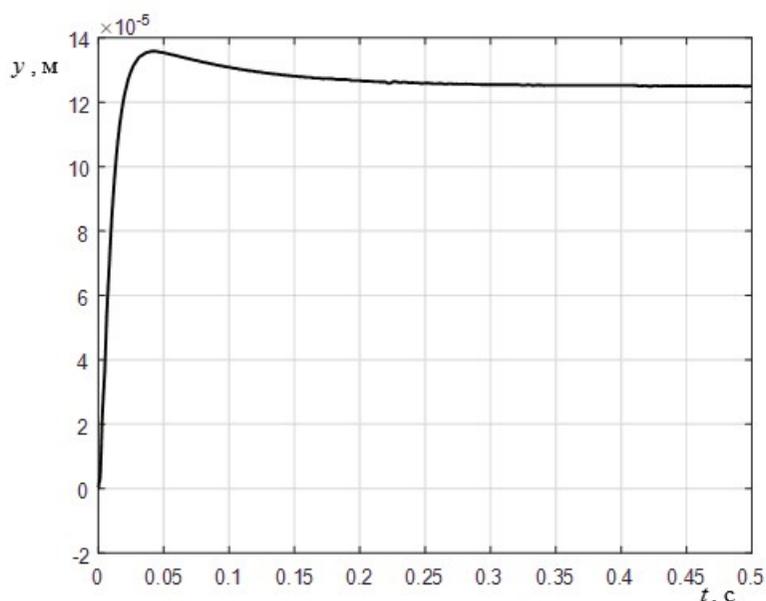


Рис. 5. Переходный процесс перемещения ротора из нулевого относительно центра магнитной системы положения в координату $y = 0,000125$ м при $U = 60$ В

Если считать, что зазор в страховочных подшипниках рассматриваемого агрегата составляет $0,00025$ м, то в момент включения электромагнитного подвеса ротор находится в координате $y = -0,000125$ м относительно центра магнитной системы. При этом параметры электромагнитов при $U = 50$ В имеют следующие значения [19, 20]: $L_2 = 1,83$ Гн; $L_4 = 3,2$ Гн; $k_{E2} = 760$ Вс/м; $k_{E4} = 1026$ Вс/м; $k_{ЭМ} = 443$ Н; $k_F = 511100$ Н/м.

Моделирование показывает, что с такими параметрами и при $U = 50$ В ротор турбоагнетателя уверенно всплывает со страховочных подшипников (рис. 6).

При дальнейшем снижении питающего напряжения стабильность функционирования снижается. Так, при напряжении $U = 40$ В ротор турбоагнетателя не может подняться со страховочных подшипников, а при $U = 45$ В всплытие ротора существенно затягивается.

Тем не менее проведенное исследование показывает, что при смещении центра магнитной системы на $\varepsilon_y = 0,000125$ м относительно оси вращения ротора нагнетателя напряжение питания электромагнитов можно снизить до 50 В. Это приведет к повышению энергетической эффективности электромагнитного подшипника за счет снижения потребляемой мощности пропорционально квадрату отношения напряжений, то есть на 30 %. Кроме того, снижение напряжения питания обеспечивает уменьшение температуры нагрева обмоток электромагнитов, что упрощает требования к их охлаждению.

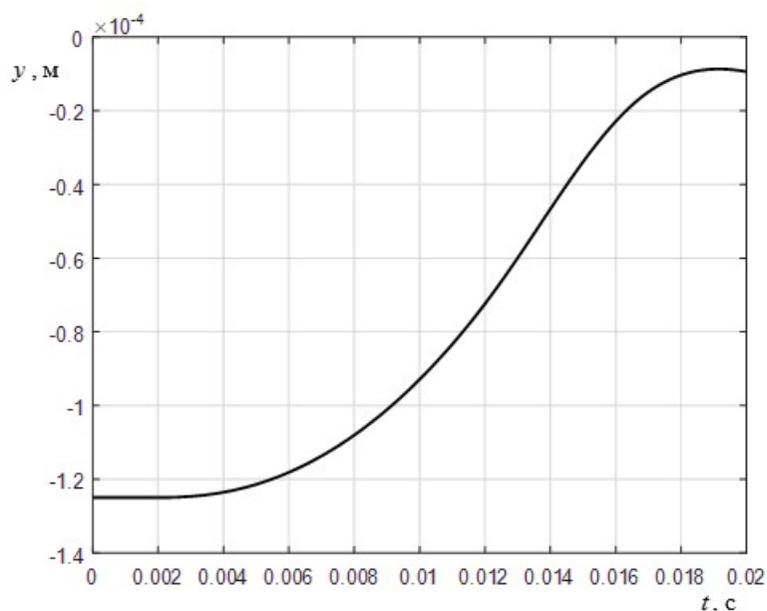


Рис. 6. Процесс всплытия ротора со страховочных подшипников при $U = 50$ В

Выводы

1. Смещение центра магнитной системы электромагнитных подшипников, компенсирующих вес ротора, относительно оси вращения является эффективным методом снижения напряжения питания обмоток электромагнитов.
2. Снижение напряжения питания электромагнитов приводит к повышению энергетической эффективности электромагнитных подшипников и уменьшению температуры нагрева обмоток.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Богданов Д.Н., Верецагин В.П. Структура системы управления электромагнитными подшипниками // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. М., 2010. Т. 114. С. 9–14.
2. Верецагин В.П., Рогоза А.В., Савинова Т.Н. Методика проектирования электромагнитных подшипников // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. М., 2009. Т. 113. С. 3–12.
3. Верецагин В.П., Рогоза А.В., Савинова Т.Н. Методика поверочного расчета электромагнитных подшипников // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. М., 2010. Т. 117. С. 3–12.
4. Верецагин В.П., Клабуков В.А. Математическая модель магнитного подшипника // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. М., 2009. Т. 112. С. 17–22.
5. Сарычев А.П. Разработка электромагнитных подшипников для серии компрессоров газоперекачивающих агрегатов // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. М., 2009. Т. 110. С. 3–10.
6. Сарычев А.П. Особенности и опыт создания электромагнитных подшипников для серии компрессоров газоперекачивающих агрегатов // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. М., 2009. Т. 112. С. 3–10.
7. Сарычев А.П., Абдурагимов А.С., Носков А.В. Опыт применения магнитных подшипников в компрессорах ГПА // Труды 15-го Международного симпозиума «Потребители-производители компрессоров и компрессорного оборудования». СПб., 2010. С. 122–128.

8. *Сарычев А.П., Вейнберг Д.М.* Опыт разработки электромагнитных подшипников для газовых компрессоров // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. М., 2001. Т. 100. С. 275 – 282.
9. *Сарычев А.П., Верецагин В.П.* Электромагнитные подшипники для Газпрома // Электротехника. М., 1996. № 5. С. 29–31.
10. *Журавлёв Ю.Н.* Активные магнитные подшипники: теория, расчет, применение. СПб.: Политехника, 2003. 206 с.
11. *Никаноров В.В., Таганов Р.С., Сальников С.В., Москалев А.В., Витковский Д.В., Веремеев В.Е., Макаричев Ю.А., Стариков А.В.* Цифровая система управления электромагнитными подшипниками центробежных компрессоров // Газовая промышленность. 2014. № 10. С. 57–62.
12. *Никитина Л.Г.* Исследование электромагнитных опор для высокоскоростных шпиндельных узлов // Машиностроение и безопасность жизнедеятельности. 2011. № 3. С. 65–68.
13. *Востоков В.С., Горбунов В.С., Кодочигов Н.Г., Лебедева С.В., Ходыкин А.В.* Обоснование устойчивости полного электромагнитного подвеса // Известия РАН. Теория и системы управления. 2007. С. 28–32.
14. *Макаричев Ю.А., Стариков А.В., Стариков С.А.* Математическая модель электромагнитного подшипника как объекта управления с учетом непостоянства его параметров // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2012. № 4. С. 31–34.
15. *Стариков А.В.* Методология синтеза многосвязной системы электромагнитных подшипников с повышенными жесткостными характеристиками энергетических объектов: дис. ... докт. техн. наук. Самара: СамГТУ, 2013. 354 с.
16. Патент России № 2395150. Система управления электромагнитным подвесом ротора / *А.В. Стариков, С.А. Стариков* (Россия) // Оpubл. 20.07.2010, Бюл. № 20.
17. *Стариков А.В., Стариков С.А.* Параметрический синтез регуляторов многоконтурной системы управления электромагнитным подвесом ротора // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2011. № 1 (29). С. 192–200.
18. *Стариков А.В.* Синтез финитного регулятора для системы управления электромагнитным подшипником // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2012. № 3 (35). С. 240–243.
19. *Макаричев Ю.А.* Методы анализа и синтеза активных электромагнитных подшипников: дис. ... докт. техн. наук. Самара: СамГТУ, 2013. 350 с.
20. *Макаричев Ю.А., Стариков А.В.* Статический изгибающий момент осевого электромагнитного подшипника при одностороннем смещении ротора в радиальной опоре // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2011. № 4 (32). С. 134–139.

Статья поступила в редакцию 29 ноября 2022 г.

ANALYSIS OF THE OPERATION OF ELECTROMAGNETIC BEARINGS IN THE DIFFERENCE OF THE CENTER OF THE MAGNETIC SYSTEM RELATIVE TO THE AXIS OF ROTATION AND VARIATIONS OF THE SUPPLY VOLTAGE

*A.V. Starikov, V.D. Kostukov**

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya str., Samara, 443100, Russian Federation

E-mail: star58@mail.ru, kostyukovvlad@yandex.ru

Abstract. *The article sets the task of reducing the consumption of electrical energy by electromagnetic bearings. To achieve this goal, it is proposed to shift the center of the magnetic system of bearings that compensate for the weight of the rotor relative to the axis of rotation. The displacement value is assumed to be equal to half the clearance value in the safety bearings of the unit under consideration. A mathematical model of a radial electromagnetic bearing, its design scheme, taking into account the displacement of the center of the magnetic system relative to the axis of rotation, a block diagram of a three-loop control system and formulas for calculating the parameters of regulators are presented. Regulator settings for a specific type of electromagnetic bearings are determined. A calculation model has been developed that makes it possible to study the operation of an electromagnetic bearing when the center of the magnetic system is displaced relative to the axis of rotation and the supply voltage is varied. The results of simulation in the Matlab Simulink software environment of the process of rotor ascent from safety bearings and rotor levitation in a displaced state at different values of the supply voltage are given. It is shown that the voltage reduction by 16.7% ensures stable operation of the electromagnetic suspension of the rotor in all possible modes. Therefore, shifting the center of the magnetic system can reduce the power consumption of electromagnetic bearings by 30%.*

Keywords: *electromagnetic bearing, supply voltage, power consumption, energy efficiency.*

REFERENCES

1. Bogdanov D.N., Vereshchagin V.P. The structure of the control system for electromagnetic bearings [Struktura sistemy upravleniya elektromagnitnymi podshipnikami] // Voprosy elektromekhaniki. Proceedings of NPP VNIIEМ. M., 2010. Vol. 114. Pp. 9–14. (In Russian).
2. Vereshchagin V.P., Rogoza A.V., Savinova T.N. Methodology for designing electromagnetic bearings [Metodika proektirovaniya elektromagnitnyh podshipnikov] // Voprosy elektromekhaniki. Proceedings of NPP VNIIEМ. M., 2009. Vol. 113. Pp. 3–12. (In Russian).
3. Vereshchagin V.P., Rogoza A.V., Savinova T.N. Methods of verification calculation of electromagnetic bearings [Metodika poverochnogo raschyota elektromagnitnyh podshipnikov] // Voprosy elektromekhaniki. Proceedings of NPP VNIIEМ. M., 2010. Vol. 117. Pp. 3–12. (In Russian).
4. Vereshchagin V.P., Klabukov V.A. Mathematical model of magnetic bearing [Математическая модель магнитного подшипника] // Questions of electromechanics. Proceedings of NPP VNIIEМ. M., 2009. Vol. 112. Pp. 17–22. (In Russian).
5. Sarychev A.P. Development of electromagnetic bearings for a series of compressors for gas pumping units [Razrabotka elektromagnitnyh podshipnikov dlya serii kompressorov

* Alexander V Starikov, (Dr. (Techn.)), Professor.
Vladislav D. Kostukov, Postgraduate Student.

- gazoperekachivayushchih agregatov] // Voprosy elektromekhaniki. Proceedings of NPP VNIEM. M., 2009. Vol. 110. Pp. 3–10. (In Russian).
6. *Sarychev A.P.* Features and experience of creating electromagnetic bearings for a series of compressors for gas-pumping units [Osobennosti i opyt sozdaniya elektromagnitnyh podshipnikov dlya serii kompressorov gazoperekachivayushchih agregatov] // Voprosy elektromekhaniki. Proceedings of NPP VNIEM. M., 2009. Vol. 112. P. 3–10. (In Russian).
 7. *Sarychev A.P., Abduragimov A.S., Noskov A.V.* Experience of using magnetic bearings in GPU compressors [Opyt primeneniya magnitnyh podshipnikov v kompressorah GPA] // Proceedings of the 15th International Symposium "Consumers-Manufacturers of Compressors and Compressor Equipment". SPb., 2010. Pp. 122–128. (In Russian).
 8. *Sarychev A.P., Weinberg D.M.* Experience in the development of electromagnetic bearings for gas compressors [Opyt razrabotki elektromagnitnyh podshipnikov dlya gazovyh kompressorov] // Voprosy elektromekhaniki. Proceedings of NPP VNIEM. M., 2001. Vol. 100. P. 275–282. (In Russian).
 9. *Sarychev A.P., Vereshchagin V.P.* Electromagnetic bearings for Gazprom [Elektromagnitnye podshipniki dlya Gazproma] // Elektrotehnika. M., 1996. No. 5. Pp. 29–31. (In Russian).
 10. *Zhuravlev Yu.N.* Active magnetic bearings: theory, calculation, application [Aktivnye magnitnye podshipniki: teoriya, raschyot, primenenie]. St. Petersburg: Politehnika, 2003. 206 p. (In Russian).
 11. *Nikanorov V.V., Taganov R.S., Salnikov S.V., Moskalev A.V., Vitkovsky D.V., Veremeev V.E., Makarichev Yu.A., Starikov A.V.* Digital control system for electromagnetic bearings of centrifugal compressors [Cifrovaya sistema upravleniya elektromagnitnymi podshipnikami centrobeznyh kompressorov] // Gas industry. 2014. No. 10. Pp. 57–62. (In Russian).
 12. *Nikitina L.G.* Investigation of electromagnetic supports for high-speed spindle units [Issledovanie elektromagnitnyh opor dlya vysokoskorostnyh shpindel'nyh uzlov] // Engineering and life safety. 2011. No. 3. Pp. 65–68. (In Russian).
 13. *Vostokov V.S., Gorbunov V.S., Kodochigov N.G., Lebedeva S.V., Khodykin A.V.* Justification of the stability of the full electromagnetic suspension [Obosnovanie ustojchivosti polnogo elektromagnitnogo podvesa] // Izvestiya RAN. Theory and control systems. 2007. Pp. 28–32. (In Russian).
 14. *Makarichev Yu. A., Starikov A. V., Starikov S. A.* Mathematical model of an electromagnetic bearing as a control object, taking into account the variability of its parameters [Matematicheskaya model' elektromagnitnogo podshipnika kak ob'ekta upravleniya s uchetom nepostoyanstva ego parametrov] // Izv. universities. Elektromekhanika. 2012. Pp. 31–34. (In Russian).
 15. *Starikov A.V.* Methodology for the synthesis of a multiply connected system of electromagnetic bearings with increased rigidity characteristics of power facilities [Metodologiya sinteza mnogosvyaznoj sistemy elektromagnitnyh podshipnikov s povyshennymi zhestkostnyimi harakteristikami energeticheskikh ob'ektov]: dis. ... doc. tech. Sciences. Samara: SamGTU, 2013. 354 pp. (In Russian).
 16. Patent of Russia No. 2395150. Control system for the electromagnetic suspension of the rotor [Sistema upravleniya elektromagnitnym podvesom rotora] / *A.V. Starikov, S.A. Starikov* (Russia) // Publ. 20.07.2010, Bull. No. 20. (In Russian).
 17. *Starikov A.V., Starikov S.A.* Parametric synthesis of regulators of a multi-circuit control system for the electromagnetic suspension of the rotor [Parametricheskij sintez regulyatorov mnogokonturnoj sistemy upravleniya elektromagnitnym podvesom rotora] // Bulletin of the Samara State Technical University. Series: Technical Sciences. 2011. No. 1 (29). Pp. 192–200. (In Russian).
 18. *Starikov A.V.* Synthesis of a Finite Regulator for an Electromagnetic Bearing Control System [Sintez finitovogoregulyatora dlya sistemy upravleniya elektromagnitnym podshipnikom] // Bulletin of the Samara State Technical University. Series: Technical sciences. 2012. No. 3 (35). Pp. 240–243. (In Russian).
 19. *Makarichev Yu.A.* Methods of analysis and synthesis of active electromagnetic bearings [Metody analiza i sinteza aktivnyh elektromagnitnyh podshipnikov]: dis. ... doc. tech. Sciences. Samara: SamGTU, 2013. 350 pp. (In Russian).
 20. *Makarichev Yu.A., Starikov A.V.* Static bending moment of an axial electromagnetic bearing with one-sided displacement of the rotor in a radial bearing [Sticheskiy izgibayushchij moment oseвого elektromagnitnogo podshipnika pri odnostoronnem smeshchenii rotora v radial'noj opore] // Bulletin of the Samara State Technical University. Series: Technical Sciences. 2011. No. 4 (32). Pp. 134–139. (In Russian).

ПОДПИСКА – 2023

на январь-декабрь

**В «каталоге «Газеты и журналы – 2023»,
на сайте «ООО Урал-Пресс Округ»**

<http://www.ural-press.ru/>

Уважаемые читатели!

**Обратите внимание, что с 1 сентября 2022 г. проводится
подписная кампания на журналы
Самарского государственного технического
университета на 2023 год**

**18106 Вестник Самарского государственного технического уни-
верситета. Серия «Технические науки»**

**18108 Вестник Самарского государственного технического уни-
верситета. Серия «Физико-математические науки»**

70570 Градостроительство и архитектура

**18107 Вестник Самарского государственного технического уни-
верситета. Серия «Психолого-педагогические науки»**

**41340 Вестник Самарского государственного технического уни-
верситета. Серия «Философия»**

***Условия оформления подписки Вы найдете
на сайте <http://www.ural-press.ru/>***

Учебная литература, изданная в СамГТУ

ПОДПИСКА

на сайте «ООО Урал-Пресс Округ»

<http://www.ural-press.ru/>

- 014827** **Технология производства смазочных масел и спецпродуктов:** Учебное пособие / Тыщенко В.А., Агафонов И.А., Пимерзин А.А., Томина Н.Н., Антонов С.А., Жилкина Е.О. – 2014. – 240 с.
- 014828** **Номограммы, графики и табличные данные для технологических расчетов процессов переработки нефти и газа:** Справочное пособие / Власов В.Г., Агафонов И.Г., Пимерзин А.А., Максимов Н.М., Вишневская Е.Е., Ишутенко Д.И. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2017. – 91 с.
- 014829** **Проектирование установки ЭЛОУ-АВТ:** Учебно-методическое пособие / В.Г. Власов, Агафонов И.А. – Изд. 2-е, испр. и доп. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2018. – 159 с.: ил.
- 014832** **Химия и технология вторичных процессов переработки нефти:** Учебное пособие / Л.И. Заботин. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2017. – 332 с.: 86 ил.
- 014833** **Каталитический риформинг:** Учебно-методическое пособие / Л.И. Заботин. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2016. – 166 с.: ил.
- 014834** **Проектирование нефтеперерабатывающих заводов:** Учебное пособие / Л.И. Заботин, А.А. Пимерзин, А.В. Можяев. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2018. – 129 с.
- 014835** **Методы очистки нефтяных фракций:** Учебное пособие / Н.Н. Томина, Н.М. Максимов, А.А. Пимерзин. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2014. – 293 с.
- 014837** **Катализ в химической промышленности:** Учебное пособие / Н.Н. Томина, П.А. Никульшин, Н.М. Максимов, А.А. Пимерзин. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2017. – 374 с.
- 014839** **Процессы нефтехимического синтеза в нефтепереработке:** Учебное пособие / В.А. Пильщиков, Ал.А. Пимерзин, А.А. Пимерзин. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2017. – 207 с.
- 014840** **Подготовка и первичная переработка нефти. Проектирование установок ЭЛОУ-АВТ:** Учебно-методическое пособие / В.Г. Власов, И.А. Агафонов. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2015. – 327 с.: ил.
- 014841** **Каталитический кретинг:** Учебно-методическое пособие / Л.И. Заботин. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2020. – 97 с.: ил.
- 014842** **Синтетические моторные масла и присадки:** Учебное пособие / В.А. Тыщенко, С.В. Котов, А.А. Пимерзин. – Самара: Самар. гос.

техн. ун-т, 20120. – 260 с.

014843 Алкилирование спиртов олефинами. Получение топливных оксигенатов: Учебное пособие / В.А. Пильщиков, Ал.А. Пимерзин, А.А. Пимерзин. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2020. – 115 с.

014844 Методы очистки нефтяных фракций. Ч. 1: Учебное пособие / Н.Н. Томина, Н.М. Максимов, В.А. Тыщенко, А.А. Пимерзин. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2014. – 293 с.