

Информатика, вычислительная техника и управление

УДК 629.7.01

МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИММЕРСИВНОГО ТРЕНАЖЕРА ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЙ ПОДГОТОВКИ ОПЕРАТОРОВ ЭРГАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ*

А.Е. Глазырин, Л.А. Стешина, И.В. Петухов

Поволжский государственный технологический университет
Россия, 424000, Республика Марий Эл, г. Йошкар-Ола, пл. Ленина, 3

E-mail: railot116@gmail.com, SteshinaLA@volgatech.net, Petuhoviv@volgatech.net

Аннотация. Представлена методика проектирования иммерсивного тренажера с использованием интеллектуального алгоритма автоматизации сценариев для профессиональной подготовки операторов эргатических систем управления. Методика включает два этапа – низкоуровневое и высокоуровневое проектирование. На низком уровне определяются простейшие акты операторской деятельности, которая может быть оценена с помощью психофизиологических тестов. На высоком уровне подбираются соответствующие метрики производительности, учитывающие соблюдение технологического регламента и временные показатели операторской работы. На каждом уровне проектирования формируются модели нечеткого логического вывода, которые включают унифицированную базу правил на основе параметров производительности оператора и реакции обучающей среды в виде изменения степени сложности текущего сценария. Отличительной особенностью высокоуровневого проектирования является рост базы правила из-за увеличения количества параметров среды, влияющих на степень сложности текущего сценария. Для решения этой проблемы используется генетический алгоритм, который осуществляет эвристический комбинаторный поиск оптимального правила для нечеткого логического вывода. На основе предложенной методики проектирования был разработан тренажер для обучения операторов транспортно-технологических машин. Экспериментальные данные показали прирост производительности в части погрузки сортимента на 11,6 %, уменьшение времени выполнения одного технологического цикла на 10,2 % и уменьшение количества ошибок на 80 %. Таким образом, показана целесообразность использования методики проектирования в промышленности для подготовки операторов эргатических систем управления.

* Результаты исследования получены при поддержке гранта Министерства образования и науки РФ № 25.1095.2017/4.6.

Глазырин Андрей Евгеньевич, аспирант.

Стешина Людмила Александровна (к.т.н., доц.), доцент кафедры «Проектирование и производство электронно-вычислительных средств».

Петухов Игорь Валерьевич (д.т.н., проф.), профессор кафедры «Проектирование и производство электронно-вычислительных средств».

***Ключевые слова:** интеллектуальная система, имитационная среда, нечеткая модель, генетический алгоритм, эргатическая система управления, человеко-машинное взаимодействие, человеко-машинная система.*

Введение

К сожалению, сохраняется положительная динамика числа аварий на сложных технических объектах по вине человеческого фактора [1]. В связи с этим современный подход в обеспечении надежной работы сложных технических объектов неразрывно связан с эргатическими системами управления (ЭСУ), которые учитывают психофизиологические аспекты человека [2].

На сегодняшний день ЭСУ широко распространены и находят свое применение там, где вмешательство человека в контур управления является необходимым условием эксплуатации сложных технических объектов.

Соответственно профилактика техногенной безопасности зависит от своевременного выявления профессиональной компетенции в соответствующей области деятельности в форме профессионально важных качеств (ПВК), а также повышения уровня требуемых навыков при использовании тренажеров и симуляторов для профессиональной подготовки.

Необходимо отметить, что процесс подготовки операторов на специализированных аппаратно-программных комплексах в виде тренажеров или симуляторов существенно повышает качество подготовки персонала, несет экономические выгоды, снимает проблемы безопасности [3], не говоря уже о достоинствах, связанных с заложенной итеративной имитационной моделью [4].

Проектирование и автоматизация тренажеров встречают ряд трудностей. Тренажерные проекты – одни из самых сложных в автоматизации производства, поскольку затрагивают широкий круг разнообразных технологий, реализуются на специализированных инструментальных средствах и объединяют специалистов различного профиля [5].

Как правило, в сценариях имитационной модели заложены различные математические алгоритмы [6], учитывающие сложные технологические режимы, внешние факторы и другие важные детали реальных условий работы оператора. Как правило, за рамки реализации тренажера выносятся другие немаловажные детали. Это относится к выработке индивидуальной программы обучения, автоматизации степени сложности сценариев и другим аспектам, связанным с более тесной интеграцией человека-оператора (ЧО) в симуляционную среду.

Методика проектирования автоматизированной системы управления для профессиональной подготовки человека-оператора

На сегодняшний день современные тренажеры используют иммерсивные технологии [7–14]. Данные технологии повышают реалистичность ситуационного реагирования и улучшают деятельность оператора за счет эффекта погружения [15]. Погружение представляет собой внутреннее субъективное переживание, которое заключается в блокировании восприятия физического мира [16] путем замещения его виртуальной средой (ВС) [17].

Существуют различные подходы в проектировании иммерсивной среды (ИС) для профессиональной подготовки в зависимости от предметной области и специфики взаимодействия со средой [18]. Исходя из особенностей ЭСУ наиболее интересными подходами в проектировании ИС для ЧО можно считать пользовательско-ориентированные подходы, учитывающие психомоторные аспекты взаимодействия человека и ВС [19].

Основные компоненты пользовательско-ориентированных систем таковы: логический интерфейс, физический интерфейс и отображение. Физический интерфейс (совокупность устройств ВР) под воздействием моторной программы человека влияет на логический интерфейс (производит визуализацию среды) через позиционирование, которое исключает противоречие субъективного опыта и реализованного зрительно-моторного сценария в ИС [20].

В то же время показан приоритет выполнения определенных задач в ВС [21], а также модель обработки информации, которая предлагает рассматривать работу оператора через сетевую очередность деятельности на основе группирования задач, выполняемых оператором через перцептивные, когнитивные и моторные функции [22].

Если обратить внимание на сенсомоторную связь пользовательско-ориентированных систем и сетевую модель очередности деятельности, то можно сформировать замкнутый контур человеко-машинной системы (ЧМС), представленный на рис. 1. Ключевой особенностью предложенного контура ЧМС является синхронизация субъективного опыта ЧО через автоматизацию совокупности имитационных сценариев для насыщения базы знаний ЧО.

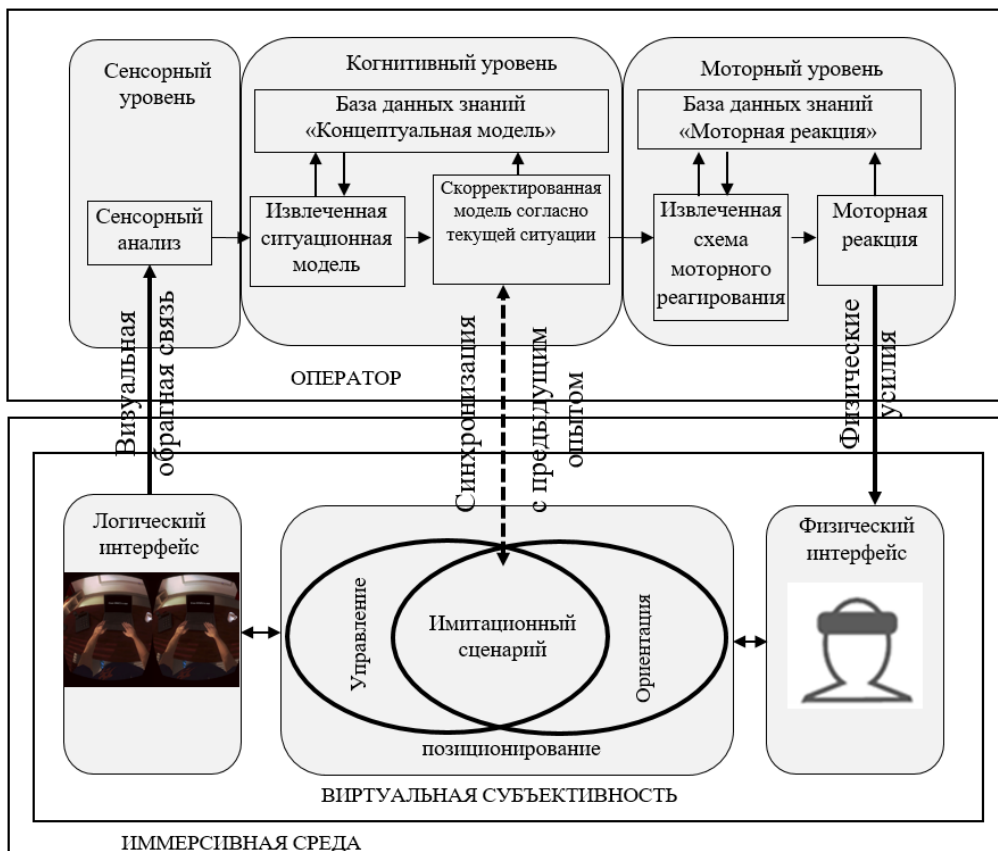


Рис. 1. Модель управления и обработки информации ЧМС в ИС

В свою очередь, когнитивное восприятие имитационного сценария осуществляется через взаимодействие физического и логического интерфейсов, с которыми работает человек. Представить данное взаимодействие можно на основе решаемых задач, которые могут быть обобщены в две группы: управление

(когнитивный уровень) и ориентация (сенсорный уровень), как показано на рис. 2.

Предлагаемая методика проектирования реализуется в два этапа: низкоуровневое и высокоуровневое проектирование. На низком уровне формируется перечень простейших сенсорных, моторных задач, от которых зависит эффективность работы оператора. Для этих задач определяются психофизиологические модели, которые могут быть представлены в виде специальных тестов.

Структурно-функциональное проектирование	Высокоуровневое	Предметное и информационно-коммуникативное моделирование			
		Выполнение задачи: Имитация технологических процессов с задействованием различных сценариев и наиболее важных компонентов производительности			
		Определение метрик оператора		Поведение и реакция среды	
		Выбор объектов производительности		Автоматизация подготовки	
		Логический интерфейс (корректный рендеринг как обратная связь от физического интерфейса)			
	Низкоуровневое	Пользовательско-ориентированное моделирование			
		Ориентация (сенсорный уровень)		Управление (моторный уровень)	
		Позиционирование (когнитивный уровень)			
		Распознавание	Зрительное распознавание	Контроль состояния	Крупная моторика
		Локализация объектов	Зрительно-моторное слежение	Манипуляция рабочим органом	Мелкая моторика
		Медиа обеспечение			
		Освещение		Светочувствительность	
		Звук		Звуковое восприятие	
		Физический интерфейс (манипуляция шлем ВР, виртуальные перчатки, трекинг, джойстики и т.д.)			

Рис. 2. Схема проектирования ИС в качестве тренажера

Таким образом, полученные результаты тестов можно использовать для количественной оценки реализованной автоматизированной системы управления ЧМС. В то же время контроль насыщения базы знаний оператора происходит с использованием объективных средств контроля когнитивной нагрузки ЧО, например с помощью электроэнцефалографа (ЭЭГ). Подтверждением целесообразности перехода на высокий уровень проектирования будем считать условие, при котором когнитивная нагрузка на этапе обучения будет выше, чем на этапе контроля.

На высоком уровне подбираются метрики производительности и параметры обучающей среды, которые влияют на степень сложности сценария подготовки. В отличие от низкого уровня полностью учитывается предметная область. Реализуется прототип тренажера, учитывающий специфику технологического процесса, и АСУ для подготовки оператора на основе подбора сценариев, учитывающих индивидуальные психофизиологические параметры ЧО.

Алгоритм автоматизации генерации сценариев профессиональной подготовки операторов (на примере транспортно-технологических машин)

Для оценки эффективности деятельности оператора или определения сложности режимов и условий выполнения задачи, которые могут описываться неточными и многозначными понятиями, такими как «сложно», «легко», «медлен-

но», подходят «мягкие вычисления», или нечеткие модели.

На низком уровне в зависимости от выбранных тестов – T_1, T_2, \dots, T_t , где t – количество тестов, определяются входные переменные, для конкретного теста T_l результаты выполнения тестов обозначим r_1, r_2, \dots, r_l , где l – количество результатов тестов, и выходные переменные, которые влияют на уровень сложности прохождения тестов – w_1, w_2, \dots, w_h , где h – количество переменных, влияющих на уровень сложности.

Таким образом, для каждой входной и выходной переменных зададим нечеткое множество:

$$R_l = \{ (\mu_{R_l}(r), r) \}, \forall r \in R,$$

$$W_h = \{ (\mu_{W_h}(w), w) \}, \forall w \in W$$

Пространство входных r и выходных w параметров разделяется на $2N+1$ областей. При этом натуральное целочисленное значение N подбирается для каждой нечеткой модели индивидуально, а полученные области могут иметь разную длину [23]. Отдельные области обозначим: L_N (Левый N), ..., L_1 (Левый 1), S_N (Средний N), R_1 (Правый 1), ..., R_N (Правый N).

Для L_N областей используем μ_L функцию принадлежности (ФП) следующего вида, где $b \neq 0$ и $a \neq b$:

$$\mu_L(x, a, b) = \begin{cases} 0, & x \leq a, \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b, \\ 1, & x \geq b. \end{cases}$$

Для R_N используем μ_R , где $a \neq 0$ и $a \neq b$:

$$\mu_R(x, a, b) = \begin{cases} 1, & x \leq a, \\ \frac{b-x}{b-a}, & a \leq x \leq b, \\ 0, & x \geq b. \end{cases}$$

Для S_N используем μ_S , где $b \neq 0$, $c \neq b$:

$$\mu_S(x, a, b, c) = \begin{cases} \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b, \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c, \\ 0, & x \leq a \cup x \geq c. \end{cases}$$

Выбор указанных ФП в части исследования психофизиологических особенностей оператора предложен и обоснован в работе [24]. Конкретные интервальные значения для построения ФП на примере операторов транспортно-технологических машин представлены в работе [25].

Для обеспечения нечеткого логического вывода формируется база правил следующего вида:

ПРАВИЛО^(с): IF (r_1 это R_1^c **AND** r_2 это R_2^c ... **AND** r_l это R_l^c) **THEN** (w_1 это W_1^c **AND** w_2 это W_2^c ... **AND** w_h это W_h^c), где c – количество нечетких правил и $l \neq h$.

Для реализации алгоритма нечеткого логического вывода использовалась методика Мамдани, которая зарекомендовала себя с положительной стороны для моделирования систем оценивания профессионально важных качеств оператора.

На высокоуровневом проектировании вводятся метрики производительности оператора: временные показатели выполнения операции и нарушение технологического регламента (ТР).

Для реализации метрики нарушения ТР произведем декомпозицию m -задачи из общего количества технологических операций K на e подзадач (этапов реализации) с общим количеством E подзадач. Выполнение каждой подзадачи можно представить в виде вероятности несовместимых событий:

$$P(A_e^{(m)}) = \sum_{m=1}^K \sum_{e=1}^E \frac{n_{A_e}^{(m)}}{N_e^{(m)}}.$$

Здесь n_{A_e} – число успешных исходов выполнения A_e подзадачи;

N_e – число реализаций e -подзадачи.

Типичный транспортно-технологический цикл включает три основные задачи $m = 3$ (наведение рабочего органа, захват и погрузка сортимента) и может быть представлен в следующем виде:

$$P(A_e^{(m)}) = \sum_{m=1}^3 \sum_{e=1}^E \frac{n_{A_e}^{(m)}}{N_e^{(m)}} = \sum_{e=1}^E \frac{n_{A_e}^{(1)}}{N_e^{(1)}} + \sum_{e=1}^E \frac{n_{A_e}^{(2)}}{N_e^{(2)}} + \sum_{e=1}^E \frac{n_{A_e}^{(3)}}{N_e^{(3)}}.$$

В зависимости от специфики выполнения технологической операции на каждый этап могут налагаться соответствующие линейные ограничения. На рис. 3. для наглядности представлен пример изменения допустимых границ для угла поворота ротора α при переходе от одного этапа к другому.

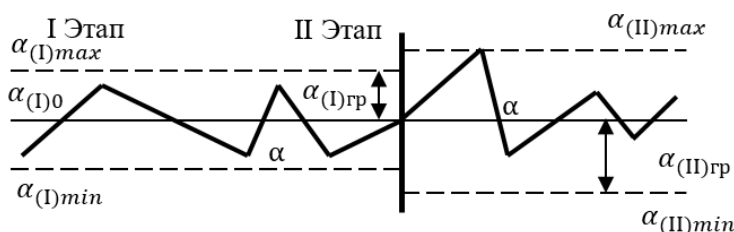


Рис. 3. Пример граничных условий для параметра α при переходе от этапа I к этапу II

На e -этапе для каждого k -кинематического параметра θ_k^e определены граничные условия в виде $\theta_{min}^e, \theta_{max}^e$. Таким образом, число успешных исходов n_{A_e} при выполнении A_e задачи должно удовлетворять следующим условиям: $\theta_{min}^e \leq \theta_{A_e}^e \leq \theta_{max}^e$. Соответственно, используя вышеизложенный подход, можно реализовать оценку количества нарушений ТР в форме соответствующего параметра для нечеткой модели.

На рис. 4 представлен нечеткий логический вывод на основе сформированных правил.

На этапе высокоуровневого проектирования определяются следующие входные нечеткие переменные: x = «количество нарушений ТР», y = «затраченное время» и z = «динамичность среды». Каждая переменная задается кортежем из трех лингвистических переменных – <«низкое», «среднее», «высокое»> с соответствующими ФП μ_L – для «низкое», μ_S – для «среднее», μ_R – для «высокое».

Если входные переменные x и y описывают производительность работы оператора, то z определяет реакцию среды на основе показателей производительности оператора. Будем полагать, что чем выше значение «динамичность среды», тем больше параметров среды будут изменять свои характеристики. В свою очередь, это будет влиять на сложность выполнения соответствующей задачи.

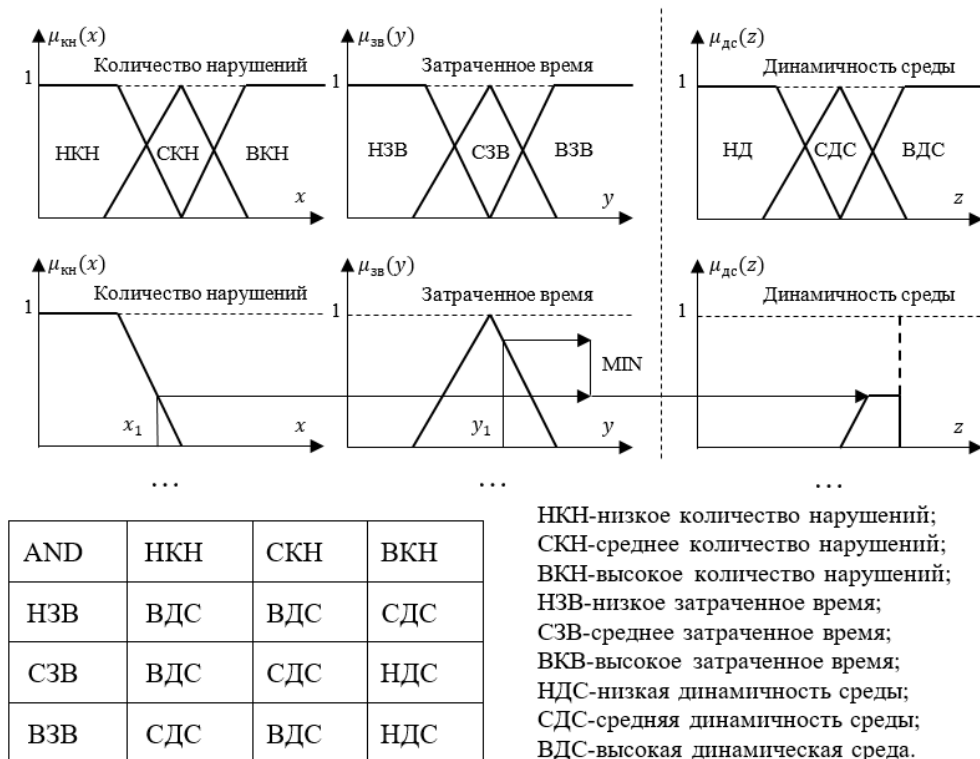


Рис. 4. Реализация нечеткого логического вывода на основе предложенной базы правил

Введем следующие нечеткие переменные: p_n = «параметр_n» для учета параметров среды, которые влияют на степень сложности операторской работы, где n – количество таких параметров. Каждый p_n -параметр представлен кортежем из трех лингвистических переменных – <«L», «S», «R»> по уровню вклада трудоемкости при реализации технологической операции (L – низкий вклад, S – средний вклад, R – высокий вклад).

Соответственно, справедлива нечеткая связь между параметрами z и p , потому что каждый из них задает степень сложности реализации операторской задачи. Зададим связь в виде следующего соответствия: $Q = \{<z, p>, <\mu_Q(z, p)>\}$, что может указывать на зависимость лингвистических переменных для «НДС»: «L», «СДС»: «S», «ВДС»: «R».

Таким образом, используя совокупность p_n и выходной параметр z , можно сформировать следующую базу правил:

ПРАВИЛО^(s): **IF** (p_1 это P_1^s **AND** p_2 это P_2^s ... **AND** p_n это P_n^s) **THEN** (z_n^s это $\mu_{ДС}(z_n^s)$), где s – количество нечетких правил для параметров среды.

Существенным недостатком нечеткого моделирования является увеличение базы правил с ростом числа параметров p_n : $\text{Base}=3^n$. Кроме этого, большое количество правил может увеличивать вычислительную нагрузку. Для преодоления этой проблемы используем генетический алгоритм (ГА) с целью подбора оптимального правила на каждой технологической итерации.

При реализации ГА производится кодирование ФП для входных параметров p_n в порядке возрастания вклада трудоемкости от меньшего к большему для формирования j -столбца и i -строки матрицы D . Пример реализации кодирования и операции начальной инициализации ГА приведен на рис. 5.

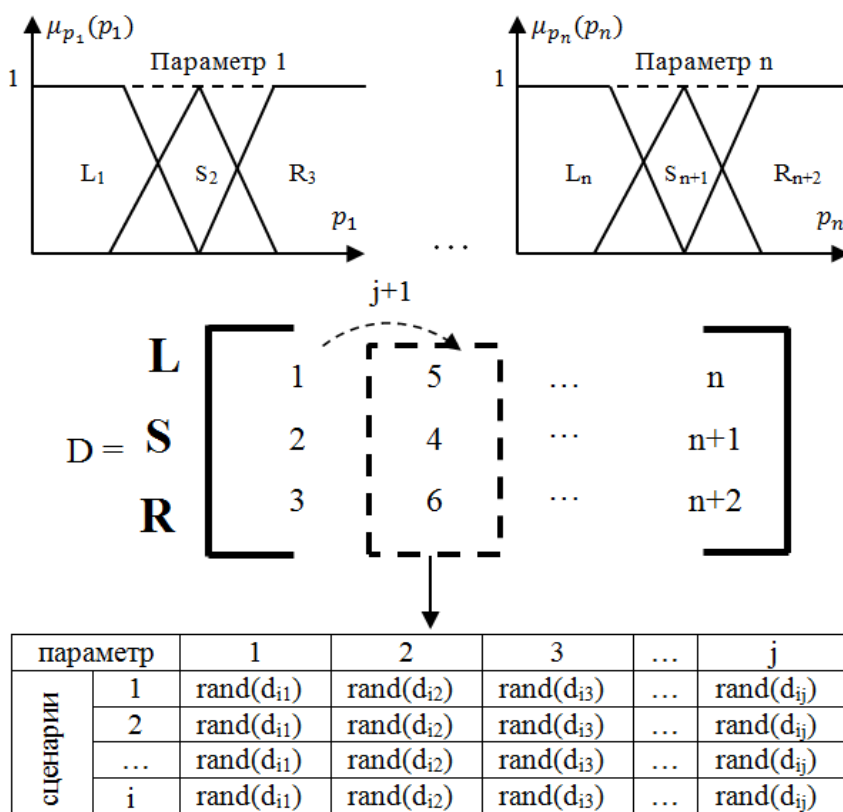


Рис. 5. Реализация кодирования и получение набора потенциальных сценариев с использованием ГА

На этапе инициализации алгоритма сканируются столбцы $(j + 1)$ матрицы D с последующим случайным выбором закодированного параметра для получения вектора потенциального сценария i число раз.

В качестве целевой функции (обозначим за $ЦФ$) используется подсчет «попаданий» (обозначим за Re_i для i -строки матрицы D) элементов матрицы d_{ij} в область определения соответствующей ФП для выходной нечеткой переменной z_n («динамичность среды»):

$$Re_i(z_n, d_{ij}) = \begin{cases} 1, & z_n \text{ есть НДС} \wedge d_{ij} \in L, \\ 1, & z_n \text{ есть СДС} \wedge d_{ij} \in S, \\ 1, & z_n \text{ есть ВДС} \wedge d_{ij} \in R, \\ 0, & \text{в остальных случаях.} \end{cases}$$

Целевая функция для i -строки матрицы D определяется как сумма «попаданий» Re_i в соответствующую область определения для каждого элемента d_{ij} :

$$ЦФ = \sum_{i=1}^j Re_i.$$

Реализация оператора выбора оптимальных потенциальных сценариев осуществляется с использованием метода «рулетки». Аккумуляция полезных признаков осуществляется с помощью оператора одноточечного кроссинговера. Предотвращение преждевременной сходимости алгоритма осуществляется с использованием оператора мутации с вероятностью 0,3.

В конечном итоге вычисляется сценарий, состоящий из наборов признаков, которые представляются в виде нечеткого правила с последующей дефаззификацией для каждого входного параметра p_n .

Полученные результаты реализации алгоритма автоматизации генерации сценариев в тренажере для подготовки операторов транспортно-технологических машин

Для проверки целесообразности использования предложенного алгоритма для подготовки оператора был разработан тренажер, имитирующий работу трактора для лесозаготовительных работ, – форвардер марки John Deere 1910E. Общий вид программного интерфейса представлен на рис. 6.



Рис. 6. Тренажер для подготовки операторов транспортно-технологических машин. Момент захвата сортимента в трехмерном пространстве

В качестве параметров среды, определяющих трудоемкость технологического процесса, были определены: шумоизоляция, видимость, диаметр сортимента, длина сортимента, горизонтальный угол наклона машины, вертикальный угол наклона машины. Допустимые границы кинематических параметров машины при выполнении соответствующей задачи устанавливались в соответствии с требованиями по эксплуатации трелевочного трактора и по минимизации производительных движений.

Для оценки эффективности подготовки курсантов были реализованы три программные модификации тренажера. Первая не включала разработанный алгоритм, тогда как вторая включала. Третья модификация не включала алгоритм, но реализовывала сценарий повышенной сложности с использованием параметров среды, вносящих высокую степень трудоемкости при реализации операторской задачи. На первой программной модификации обучалась контрольная группа, на второй – экспериментальная. После обучения обе группы оценивались на третьей программной модификации тренажера. Полученные результаты сведены в таблицу.

Результаты экспериментальных исследований реализованного алгоритма*

Погружение сортимента			
Обучение (группы)		Оценка (группы)	
Контрольная	Экспериментальная	Контрольная	Экспериментальная
$M_{x(k)} = 6,3428$	$M_{x(э)} = 6,4571$	$M_{x(k)} = 7,62857$	$M_{x(э)} = 8,51428$
$M_{x(k)} - M_{x(э)} = 0,1143(1\% \uparrow)$		$M_{x(k)} - M_{x(э)} = 0,88571(11,6\% \uparrow)$	
Количество нарушений технологического регламента			
Обучение (группы)		Оценка (группы)	
Контрольная	Экспериментальная	Контрольная	Экспериментальная
$M_{x(k)} = 5,11428$	$M_{x(э)} = 9,68571$	$M_{x(k)} = 10,05714$	$M_{x(э)} = 2$
$M_{x(k)} - M_{x(э)} = 4,57143(89\% \uparrow)$		$M_{x(k)} - M_{x(э)} = 8,05714 (80\% \downarrow)$	
Среднее время за единицу операции (в сек.)			
Обучение (группы)		Оценка (группы)	
Контрольная	Экспериментальная	Контрольная	Экспериментальная
$M_{x(k)} = 46,38685$	$M_{x(э)} = 47,181428$	$M_{x(k)} = 52,069857$	$M_{x(э)} = 46,7711428$
$M_{x(k)} - M_{x(э)} = 0,1143(0,2\% \uparrow)$		$M_{x(k)} - M_{x(э)} = 5,298708 (10,2\% \downarrow)$	

* $M_{x(k)}$ – среднее значение для контрольной группы, $M_{x(э)}$ – среднее значение для экспериментальной группы.

Полученные результаты для контрольной и экспериментальной групп различаются на высоком уровне статистической значимости. На этапе обучения показатели производительности снижались у экспериментальной группы в части количества нарушений ТР, а также среднего времени выполнения технологического цикла. На этапе оценки наблюдался прирост производительности в части погрузки сортимента, времени выполнения операции и снижение количества нарушений ТР на 80 % для экспериментальной группы.

Для подтверждения гипотезы о насыщении базы знаний оператора было проведено ЭЭГ-исследование, результаты которого представлены на рис. 7.

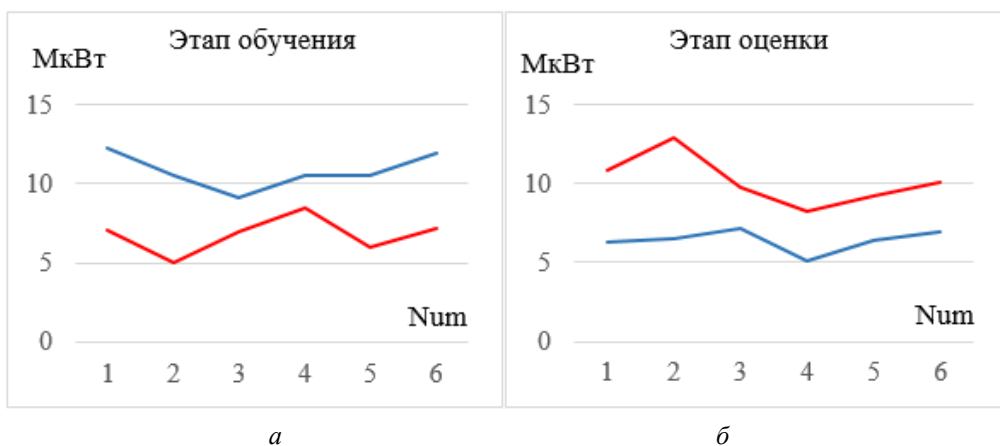


Рис. 7. Результаты ЭЭГ-исследований спектра мощности:
 а – этап обучения, б – этап оценки; Num – номер испытуемого;
 красная линия – контрольная группа;
 синяя линия – экспериментальная группа

Из графиков видно, что на этапе обучения спектр мощности у экспериментальной группы выше, а на этапе оценки – ниже по сравнению с контрольной группой. Это может быть связано с интенсификацией подготовки через автоматизацию генерации сценариев операторского реагирования и принятий решений. После оптимального проигрывания возможных ситуаций с точки зрения адаптации среды к психофизиологическим способностям курсанта снижается когнитивная нагрузка на этапе оценки для экспериментальной группы. Данное предположение, по крайней мере, не отвергает эффективность реализованного алгоритма и может объяснить прирост производительности на этапе оценки производительности обучаемых.

Заключение

Разработана методика проектирования иммерсивного тренажера с использованием интеллектуального алгоритма автоматизации сценариев для профессиональной подготовки операторов транспортно-технологических машин:

- разработанная методика учитывает очередность обработки и восприятия информации оператором на сенсорном, когнитивном и моторном уровнях, позволяет связать операторские задачи в иммерсивной среде с указанными уровнями восприятия информации оператором;

- проектирование обучающей среды осуществляется в два этапа: на низком уровне выбираются простейшие акты операторской деятельности и подбираются психофизиологические модели для оценки производительности работы оператора; на высоком уровне выбираются метрики производительности и параметры имитационной среды, влияющие на сложность выполнения задачи. На основе выбранных параметров реализуется алгоритм автоматической генерации сценариев;

- разработан алгоритм автоматической генерации сценариев, который показал свою целесообразность на основе полученных результатов экспериментальных исследований: прирост производительности в части понижения времени выполнения операции на 10,2 %, снижение количества нарушений ТР на 80 %, увеличение количества погруженного сортамента на 11,6 %.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Ложкин Г.В., Повакель Н.И.* Практическая психология в системах «человек – техника». – 2003.
2. *Петухов И.В., Стешина Л.А.* Эргатические системы: техногенная безопасность. – 2012.
3. *Назин В.А.* Автоматизированные системы обучения персонала технологических установок // Автоматизация в промышленности. – 2006. – № 6.
4. *Соркин Л.Р.* Имитационное моделирование для обучения операторов и оптимизации производства // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2008. – № 8.
5. *Дозорцев В.М.* Разработка тренажера для обучения операторов технологических процессов: основные участники, их роли и взаимодействия // Автоматизация в промышленности. – 2009. – № 5. – С. 10–12.
6. *Симонов С.Н., Частихин А.А.* Особенности образовательного процесса в инженерных вузах ВВС и роль психофизической подготовки курсантов // Образование в регионе. – 2006. – № 18. – С. 34–38.
7. *Gunn T. et al.* The use of virtual reality simulation to improve technical skill in the undergraduate medical imaging student // Interactive Learning Environments. – 2017. – P. 1–8.
8. *Everson T. et al.* Astronaut training using virtual reality in a neutrally buoyant environment // DesTech 2017: Proceedings of the 2017 International Conference on Design and Technology. – Knowledge E., 2017. – P. 319–327.
9. *Greenwald S. et al.* Technology and applications for collaborative learning in virtual reality. – 2017.
10. *Berg L.P., Vance J.M.* Industry use of virtual reality in product design and manufacturing: a survey // Virtual reality. – 2017. – Vol. 21. – № 1. – P. 1–17.
11. *Neumann D.L. et al.* A systematic review of the application of interactive virtual reality to sport // Virtual Reality. – 2017. – P. 1–16.
12. *Prasolova-Førland E. et al.* Preparing for International Operations and Developing Scenarios for Inter-cultural Communication in a Cyberworld: A Norwegian Army Example // Transactions on Computational Science XXIII. – Springer, Berlin, Heidelberg, 2014. – P. 118–138.
13. *Zyda M.* From visual simulation to virtual reality to games // Computer. – 2005. – Vol. 38. – № 9. – P. 25–32.
14. *Lin C.H., Hsu P.H.* Integrating Procedural Modelling Process and Immersive VR Environment for Architectural Design Education // MATEC Web of Conferences. – EDP Sciences, 2017. – Vol. 104. – P. 03007.
15. *Tichon J., Burgess-Limerick R.* A review of virtual reality as a medium for safety related training in mining // Journal of Health & Safety Research & Practice. – 2011. – Vol. 3. – № 1. – P. 33–40.
16. *Gander P.* Two myths about immersion in new storytelling media. – Lund University, 1999. Immersion and Emotion: Their Impact on the Sense of Presence.
17. *Baños R.M. et al.* Immersion and emotion: their impact on the sense of presence // CyberPsychology & Behavior. – 2004. – Vol. 7. – № 6. – P. 734–741.
18. *Petukhov I., Steshina L., Glazyrin A.* Application of virtual environments in training of ergatic system operators // Journal of Applied Engineering Science. – 2018. – Т. 16. – № 3. – С. 398–403.
19. *Latta J.N., Oberg D.J.* A conceptual virtual reality model // IEEE Computer Graphics and Applications. – 1994. – Т. 14. – № 1. – P. 23–29.
20. *Parés N., Parés R.* Towards a model for a virtual reality experience: the virtual subjectiveness // Presence: Teleoperators and Virtual Environments. – 2006. – Vol. 15. – № 5. – P. 524–538.
21. *Jerald J.* The VR book: Human-centered design for virtual reality. – Morgan & Claypool, 2015.
22. *Liu Y.* Queuing Network-Model Human Processor (QN-MHP): A Computational Architecture for Multitask Performance in Human-Machine Systems / Y. Liu, R. Feyen, O. Tsimhoni // ACM Transactionson Computer-Human Interaction. – 2006. – Vol. 13. – No 1. – P. 37–70.
23. *Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л.* Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы. – Горячая линия–Телеком, 2013.
24. *Петухов И.В.* Моделирование успешности профессиональной деятельности оператора эргатических систем // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер. Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2012. – № 1. – С. 51–59.

25. Курасов П.А. Обоснование параметров и режимов работы учебных тренажеров лесозаготовительных машин: дис. ... канд. техн. наук. – Йошкар-Ола: ПГТУ, 2018.

Статья поступила в редакцию 1 апреля 2019 г.

TECHNIQUE OF DESIGNING IMMERSIVE SIMULATOR FOR AUTOMATION OF PROFESSIONAL TRAINING FOR OPERATORS

A.E. Glazyrin, L.A. Steshina, I.V. Petukhov

Volga State University of Technology
3, lenina sq., Yoshkar-Ola, Mari El Republic, 424000, Russian Federation

Abstract. *The technique of immersive simulator designing is presented. It is based on the smart training automation algorithm for operators professional training in ergatic control systems. The technique consists of two levels: low and high level designing. The low-level designing defines the simplest operator's activities which can be evaluated by means of psychophysiological tests. The high-level designing defines the performance selection metrics: time costs and operating procedure. At each design level, models of fuzzy inference are formed. They include a unified set of rules based on the operator's performance parameters and the learning environment feedback as difficulty degree changes of the present scenario. The specific feature of the high-level designing is the growing of the rules set because of the increasing number of the environment parameters influencing the difficulty degree of the present scenario. For solving this problem, a genetic algorithm is used, which is a heuristic combinatorial search for the optimal rule for fuzzy inference. Based on the proposed design methodology, a simulator was developed for training transport-technological machine operators. Experimental data showed an increase in productivity in terms of loading the assortment by 11.6%, a decrease in the time to complete one technological cycle by 10.2% and a decrease in the number of errors by 80%. Thus, the feasibility of using the design methodology in industry for training operators was shown.*

Keywords: *intellectual system, simulation environment, fuzzy model, genetic algorithm, ergatic control systems, human-machine interaction, human-machine system.*

REFERENCES

1. *Lozhkin G.V., Povykel N.I.* Practical psychology in the systems of "man-technician". – 2003.
2. *Petukhov I.V., Steshina L.A.* Ergatic systems: technological safety. – 2012.
3. *Nazin V.A.* Automated systems of personnel training of technological installations // Automation in industry. 2006. № 6.
4. *Sorkin L.R.* Simulation modeling for operator training and production optimization // Industrial control systems and controllers. 2008. № 8.
5. *Dozortsev V. M.* Development of a simulator for training technological process operators: the main participants, their roles and interactions // Automation in industry. – 2009. – no. 5. – p. 10–12.
6. *Simonov S.N.* Features of the educational process in engineering universities of the Air Force and the role of psychophysical training of cadets / Simonov S.N., Chastikhin A.A. // Education

*Andrey E. Glazyrin, Postgraduate Student.
Lyudmila A. Steshina (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.
Igor V. Petukhov (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.*

- in the region. – 2006. – No. 18. – S. 34–38.
7. *Gunn T. et al.* The use of virtual reality simulation to improve technical skill in the undergraduate medical imaging student // *Interactive Learning Environments*. – 2017. – P. 1.
 8. *Everson T. et al.* Astronaut training using virtual reality in a neutrally buoyant environment // *DesTech 2017: Proceedings of the 2017 International Conference on Design and Technology*. – Knowledge E., 2017. – P. 319–327.
 9. *Greenwald S. et al.* Technology and applications for collaborative learning in virtual reality. – 2017.
 10. *Berg L.P., Vance J.M.* Industry use of virtual reality in product design and manufacturing: a survey // *Virtual reality*. – 2017. – Vol. 21. – № 1. – P. 1–17.
 11. *Neumann D.L. et al.* A systematic review of the application of interactive virtual reality to sport // *Virtual Reality*. – 2017. – P. 1–16.
 12. *Prasolova-Førland E. et al.* Preparing for International Operations and Developing Scenarios for Inter-cultural Communication in a Cyberworld: A Norwegian Army Example // *Transactions on Computational Science XXIII*. – Springer, Berlin, Heidelberg, 2014. – P. 118–138.
 13. *Zyda M.* From visual simulation to virtual reality to games // *Computer*. – 2005. – Vol. 38. – № 9. – P. 25–32.
 14. *Lin C.H., Hsu P.H.* Integrating Procedural Modelling Process and Immersive VR Environment for Architectural Design Education // *MATEC Web of Conferences*. – EDP Sciences, 2017. – Vol. 104. – P. 03007.
 15. *Tichon J., Burgess-Limerick R.* A review of virtual reality as a medium for safety related training in mining // *Journal of Health & Safety Research & Practice*. – 2011. – Vol. 3. – № 1. – P. 33–40.
 16. *Gander P.* Two myths about immersion in new storytelling media. – Lund University, 1999. Immersion and Emotion: Their Impact on the Sense of Presence.
 17. *Baños R.M. et al.* Immersion and emotion: their impact on the sense of presence // *CyberPsychology & Behavior*. – 2004. – Vol. 7. – № 6. – P. 734–741.
 18. *Petukhov I., Steshina L., Glazyrin A.* Application of virtual environments in training of ergonomic system operators // *Journal of Applied Engineering Science*. – 2018. – T. 16. – № 3. – C. 398–403.
 19. *Latta J.N., Oberg D.J.* A conceptual virtual reality model // *IEEE Computer Graphics and Applications*. – 1994. – T. 14. – № 1. – P. 23–29.
 20. *Parés N., Parés R.* Towards a model for a virtual reality experience: the virtual subjectiveness // *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*. – 2006. – Vol. 15. – № 5. – P. 524–538.
 21. *Jerald J.* The VR book: Human-centered design for virtual reality. – Morgan & Claypool, 2015.
 22. *Liu Y.* Queuing Network-Model Human Processor (QN-MHP): A Computational Architecture for Multitask Performance in Human-Machine Systems / Y. Liu, R. Feyen, O. Tsimhoni // *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*. – 2006. – Vol. 13. – No 1. – P. 37–70.
 23. *Rutkovskaya D., Pilinsky M., Rutkovsky L.* Neural networks, genetic algorithms and fuzzy systems. – Hotline–Telecom, 2013.
 24. *Petukhov I.V.* Modeling the success of the professional activity of the operator of ergonomic systems // *Bulletin of the Volga State Technological University. Series: Radio engineering and infocommunication systems*. – 2012. – № 1. – p. 51–59.
 25. *Kurasov P.A.* Justification of the parameters and modes of operation of training simulators for forest machines: dis. ... Candidate / Can. those. sciences. PGTU, Yoshkar-Ola, 2018.

УДК 519.876.5

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОДЯНОГО ТРАКТА ПАРОВОГО КОТЛА***И.А. Данилушкин, С.А. Колпащиков**Самарский государственный технический университет
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Аннотация. Рассматривается опыт разработки динамической модели водяного тракта парового котла для построения компьютерного тренажера. Тренажер служит для обучения и оценки действий оперативного персонала котельного цеха при выполнении основных технологических операций в процессе эксплуатации котла. Сложность задачи заключается в моделировании технологических параметров объекта на всех режимах функционирования – от заполнения барабана питательной водой и растопки до функционирования с номинальной нагрузкой. Модель описывает изменение температуры и давления в барабане котла в зависимости от расхода питательной воды, непрерывной и периодической продувок, расхода острого пара и расхода газа. Модель учитывает нагрев питательной воды в топочных экранях и водяном экономайзере, а также температуру питательной воды, поступающей на вход водяного экономайзера. Сохранение энергетического баланса в модели реализуется за счет проведения всех промежуточных расчетов относительно энтальпии теплоносителя. Такая реализация позволяет корректно учитывать изменение физических параметров воды в процессе нагрева и роста давления, обеспечивает линейное поведение модели даже с учетом перехода теплоносителя из одного агрегатного состояния в другое. Модель учитывает основные технологические операции, выполняемые оперативным персоналом котельного цеха в процессе растопки котла. Идентификация модели выполнена по данным системы автоматизированного управления паровым котлом, полученным при растопке. В статье приводятся экспериментальные данные, структурные схемы основных подсистем модели, результаты компьютерного моделирования. Обосновываются допущения, которыми руководствовались авторы при разработке модели, а также описываются ограничения, возникшие при ее реализации.

Ключевые слова: динамическая модель, паровой котел, пароводяной тракт, энтальпия, идентификация, компьютерный тренажер.

Введение

Компьютерные тренажеры для обучения и контроля действий оператора при управлении сложными технологическими процессами обеспечивают получение оператором необходимых навыков. Тренажер должен позволять оператору отработать правильную последовательность выполнения технологических операций, «почувствовать» динамические свойства процесса, а также увидеть результаты своих действий, в том числе и неправильных [1]. Самые длительные и многоопе-

* Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ №№ 18-08-00048, 18-08-00506, 18-08-00565.

Данилушкин Иван Александрович (к.т.н., доц.), доцент кафедры «Автоматика и управление в технических системах».

Колпащиков Сергей Александрович (к.т.н., доц.), доцент кафедры «Автоматика и управление в технических системах».

рациональные мероприятия, выполняемые при управлении паровым котлом, – подготовка к пуску и растопка котла. При выполнении растопки параметры теплоносителя меняются в широком диапазоне: от 60 °С при атмосферном давлении до 340 °С при давлении 150 кгс/см². Модель парового котла должна обеспечивать адекватное поведение на всем диапазоне изменения параметров теплоносителя и при этом обладать достаточным быстродействием, чтобы реализовывать циклический пересчет параметров модели в режиме реального и ускоренного времени.

Общие принципы моделирования и этапы создания теплогидравлических моделей оборудования электрических станций рассмотрены в монографиях [2, 3]. Модели должны базироваться на трех законах: сохранения вещества, сохранения энергии, сохранения количества движения. Эти принципы используются во многих работах, посвященных разработке моделей паровых котлов. В [3] приведен список наиболее известных программных пакетов для моделирования статических и динамических режимов функционирования теплоэнергетического оборудования, а также результаты моделирования в некоторых из них.

В зависимости от области применения моделей разработчики предъявляют к ним различные требования. В работе [4] приведены результаты моделирования парового котла низкого давления. Модель носит качественный характер: статья иллюстрирует принципиальную возможность реализации модели парового котла с помощью пакета Matlab Simulink. В работах [5, 6] целью моделирования являлось определение энергоэффективности котла и основной акцент сделан на реализацию модели многоточечного приближения [2] тепловых процессов, протекающих в топочных экранах парового котла. Оценка поведения моделей проводилась в обоих случаях для работающего парового котла в широком диапазоне изменения его производительности. В статье [7] обсуждаются результаты использования нечетких вычислений для оценки неопределенности значений коэффициентов модели парового котла. Для определения оптимальных режимов работы парового котла используются методы статистического анализа и регрессионные модели [8]. Исследовательское моделирование паровых котлов [9–11] базируется на известных системах уравнений [2, 3], определение параметров моделей осуществляется исходя из физических и конструктивных параметров поверхностей нагрева. В публикациях, посвященных разработке автоматических систем управления паровыми котлами, моделирование осуществляется в окрестностях установившегося режима работы оборудования [12–17]. Модель котла описывается системой передаточных функций, коэффициенты которых получены по реакции объекта на ступенчатое изменение входных параметров. В подобных публикациях используются линеаризованные модели, что вполне оправдано решаемыми задачами.

Описание технологического процесса

Математическая модель водяного тракта парового котла разрабатывается в рамках создания компьютерного тренажера основного технологического оборудования ТЭЦ. В качестве энергообъекта-прототипа выступает паровой котел ТГМ-84 (Е420/140ГМ ТКЗ) [18], водяной тракт которого состоит из водяного экономайзера, барабана котла, водоопускных труб и топочных экранов. Во время работы котла питательная вода с температурой около 230 °С поступает в водяной экономайзер, расположенный в шахте топки. Водяной экономайзер подогревается уходящими газами. В нем вода нагревается и поступает в барабан котла. Из барабана вода по водоопускным трубам за счет естественной циркуляции по-

ступает к нижним коллекторам топочных экранов. Нагреваясь в топочных экранах, вода поднимается в барабан котла, где происходит разделение пароводяной смеси. Насыщенный пар поступает в пароперегреватель.

При подготовке котла к пуску барабан котла заполняется питательной водой с температурой 60 °С при атмосферном давлении. Растопка начинается при полностью закрытом регулирующем питательном клапане (РПК). Во время растопки последовательно разжигаются горелки котла, начинают нагреваться топочные экраны, а также змеевики водяного экономайзера. Чтобы не произошло перегрева металла, открывается задвижка на линии рециркуляции водяного экономайзера, подающей воду из барабана в нижние коллекторы водяного экономайзера. Нагрев воды в водяном экономайзере приводит к циркуляции за счет конвективного переноса.

Расход пара из барабана котла определяется перепадом давлений в барабане и на выходе из пароперегревателя. До подключения к паропроводу острого пара станции пар из пароперегревателя поступает в растопочную редуцирующе-охлаждающую установку (РРОУ). С помощью РРОУ регулируется расход пара из пароперегревателя при наращивании давления в барабане котла до номинального значения.

В процессе растопки из-за уменьшения плотности воды поднимается уровень в барабане котла. По достижении определенного давления пара в барабане котла выполняется продувка нижних коллекторов топочных экранов (при давлении 3–5, 20–30, 50–70 кгс/см²). За счет продувки уровень в барабане котла снижается. Уровень снижается и за счет парообразования и ухода пара из котла в пароперегреватель. На начальном этапе растопки периодическое восстановление уровня осуществляется с помощью РПК. На время подпитки задвижка на линии рециркуляции водяного экономайзера закрывается, по окончании – открывается снова. При увеличении расхода пара подпитка котла переводится в непрерывный режим и линия рециркуляции водяного экономайзера закрывается. С этого момента можно считать, что котел работает в штатном режиме. По достижении номинального давления пара на выходе котла производится переключение с РРОУ на паропровод острого пара. Растопка завершена.

Разработка модели

Компьютерный тренажер должен с максимальной достоверностью воспроизводить автоматизированное рабочее место (АРМ) оператора. Поэтому было принято решение в качестве интерфейса использовать существующую реализацию АРМ на SCADA-системе, заменив нижний уровень автоматизированной системы управления – контроллеры, датчики, исполнительные устройства – и сам паровой котел компьютерными моделями. Входными переменными модели парового котла выступают положения исполнительных механизмов, выходными параметрами модели являются параметры, отображаемые на мнемосхемах АРМ. Модель парового котла должна реализовывать адекватное поведение при проведении всех технологических операций, присущих растопке котла: выполнение продувок, переключение линии подачи воды в водяной экономайзер и т. п.

Алгоритмическое представление модели должно обеспечивать возможность ее реализации в современных пакетах компьютерного моделирования динамических систем (Simulink, VisSim, SimInTech и т. п.).

Требования, предъявляемые к точности моделирования, определялись исходя из экспертной оценки поведения модели технологического процесса: насколько значительным может быть отклонение поведения модели от прототипа, чтобы

оператор не почувствовал разницы? Были приняты следующие численные параметры: отклонение параметров модели от показателей энергообъекта-прототипа в установившемся режиме – не более 5 %, в динамическом – не более 25 %. Поскольку 25 % – это некоторое усредненное требование, основные параметры должны моделироваться с большей точностью, вспомогательные могут моделироваться с меньшей точностью.

Контроль процессов сгорания топлива в топке котла осуществляется оператором по следующим параметрам: расход газа, разряжение в топке котла, содержание кислорода в уходящих газах, температура уходящих газов перед водяным экономайзером. Производительность котла определяется расходом газа, необходимое количество воздуха для сгорания газа оценивается опосредованно, по содержанию кислорода в уходящих газах, нормальный режим работы дутьевых вентиляторов и дымососов, степень открытия их направляющих аппаратов – по разряжению в топке. Исходя из этого моделирование процессов, протекающих в топке котла, может быть сведено к вычислению функциональной зависимости количества тепла, отданного в процессе сгорания газа экранам топки котла, от соотношения расходов газа и воздуха. Более сложные условия могут учитывать неравномерность распределения расхода газа по горелкам, в частности по горелкам первого и второго яруса, влияние скорости потока уходящих газов на распределение теплоисточников по объему шахты.

Нагрев воды в водяном экономайзере тоже может быть сведен к вычислению зависимости теплоотдачи от расхода газа, но из-за того, что вода, поступающая на его вход, может иметь разные источники – вода из барабана, питательная вода, водяной экономайзер должен моделироваться отдельно.

Зависимости расходов воды и пара от степени открытия регулирующих клапанов и перепадов давлений рассчитываются исходя из экспериментальных данных и могут быть заданы в виде таблиц либо аналитическими выражениями.

При моделировании водяного тракта в широком диапазоне изменения параметров необходимо учитывать зависимость физических характеристик воды от температуры и давления. Сложность заключается в учете затрат энергии на фазовый переход из жидкого состояния в газообразное. В разработанной модели для того, чтобы исключить этот вопрос, используются значения энтальпии теплоносителя. Расчет энтальпии осуществляется по методике, изложенной в [19]. Пространство параметров «давление – температура» разбивается на несколько соприкасающихся областей, и для каждой области задается полиномиальная зависимость энтальпии от давления и температуры. Были разработаны алгоритмы расчета следующих функциональных зависимостей:

– расчет значения энтальпии в зависимости от давления и температуры теплоносителя, $f_H(P, \theta)$;

– расчет значения температуры в зависимости от давления и энтальпии теплоносителя, $f_T(P, H)$;

– расчет значений энтальпии для воды и пара при заданном значении температуры насыщения, $f_{Hw}(\theta)$ и $f_{Hs}(\theta)$ соответственно;

– расчет значения давления и температуры в зависимости от значения энтальпии и доли воды в пароводяной смеси, $f_{P\gamma}(H, \gamma)$, $f_{\theta\gamma}(H, \gamma)$.

Поскольку вода в барабане котла находится в состоянии кипения, то энтальпия пароводяной смеси будет находиться в интервале между энтальпией воды при кипении и температурой насыщенного пара. Одно и то же значение энталь-

пии может соответствовать различным парам значений давления и температуры воды. Чтобы однозначно определить положение точки (P, θ) , было принято решение задаться соотношением воды и пара в пароводяной смеси.

Модель водяного экономайзера

Уравнение энергетического баланса для водяного экономайзера может быть записано в виде

$$\frac{\partial H_{BЭ}(x, t)}{\partial t} + v_{BЭ}(t) \frac{\partial H_{BЭ}(x, t)}{\partial x} = Q_{BЭ}(t), \quad 0 < x < L_{BЭ}, \quad t > 0, \quad (1)$$

где $H_{BЭ}(x, t)$ – распределение энтальпии по длине теплообменника;
 $Q_{BЭ}(t)$ – количество тепла, отданного теплоносителю уходящими газами;
 $v_{BЭ}(t)$ – скорость потока теплоносителя;
 $L_{BЭ}$ – длина теплообменного аппарата.

Отношение длины теплообменного аппарата к скорости потока определяет время нахождения элементарного объема теплоносителя внутри аппарата:

$$\tau_{BЭ}(t) = L_{BЭ} / v_{BЭ}(t). \quad (2)$$

Решение задачи (1) реализуется с помощью звена переменного транспортного запаздывания.

Закон сохранения вещества для водяного экономайзера учитывается в уравнении (1) с помощью пересчета расхода воды на входе в линейную скорость потока. Тогда выражение для времени запаздывания $\tau_{BЭ}(t)$ принимает вид

$$\tau_{BЭ}(t) = \rho_{BЭ} V_{BЭ} / F_{BЭ}(t), \quad (3)$$

где $\rho_{BЭ}$ – плотность воды в водяном экономайзере;
 $V_{BЭ}$ – объем водяного экономайзера;
 $F_{BЭ}(t)$ – массовый расход.

Плотность воды в водяном экономайзере принимается постоянной, что приводит к выполнению закона сохранения импульса.

Приращение энтальпии $\Delta H_{BЭ}(t)$ в водяном экономайзере рассчитывается исходя из текущего расхода газа $F_{Г}(t)$ и расхода воды на вход водяного экономайзера $F_{BЭ}(t)$:

$$\Delta H_{BЭ}(t) = k_{BЭ} F_{Г}(t) / F_{BЭ}(t), \quad (4)$$

где коэффициент $k_{BЭ}$ определяет количество тепла, отдаваемого уходящими газами в водяном экономайзере при сгорании одного кубического метра газа.

Структурная схема модели водяного экономайзера представлена на рис. 1. Давление $P_{BЭ1}(t)$ и температура $\theta_{BЭ1}(t)$ используются для расчета текущего значения энтальпии воды на входе водяного экономайзера $H_{BЭ1}(t)$:

$$H_{BЭ1}(t) = f_H(P_{BЭ1}(t), \theta_{BЭ1}(t)). \quad (5)$$

Значение энтальпии на выходе водяного экономайзера $H_{BЭ2}(t)$ рассчитывается с учетом (4) и (1) по формуле

$$H_{BЭ2}(t) = H_{BЭ1}(t - \tau_{BЭ}(t)) + \Delta H_{BЭ}(t - \tau_{BЭ}(t)). \quad (6)$$

Полученное значение используется для расчета температуры воды после водяного экономайзера. Мгновенный приток тепла в барабан котла с подпиточной водой из водяного экономайзера определяется выражением

$$q_{BЭ2}(t) = H_{BЭ2}(t) F_{BЭ}(t). \quad (7)$$

Функция ограничения минимального расхода воды на водяной экономайзер (рис. 1, блок «Огр») обеспечивает защиту от деления на нуль в случае отсутствия расхода, а также фактически определяет расход воды на рециркуляцию водяного экономайзера.

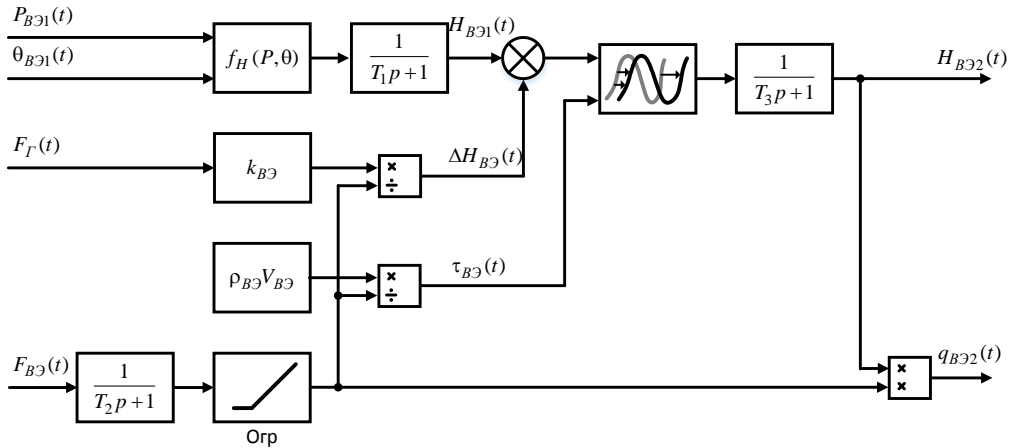


Рис. 1. Структурная схема модели водяного экономайзера

В модели было принято допущение, что этот расход постоянен и равен минимальному $F_{BЭ}^{\min}$. Для более точного моделирования необходима оценка скорости потока через водяной экономайзер при конвективном переносе в зависимости от перепада температур на входе и выходе. Аperiodические звенья первого порядка с постоянными временами T_1, T_2, T_3 служат для снижения влияния резких изменений значений параметров на выходы модели. Их величины выбираются в процессе идентификации модели. Физический смысл – инерционность процесса нагрева теплоносителя из-за наличия массивного аккумулятора тепла в виде стенок змеевиков водяного экономайзера.

Модель параметров теплоносителя в барабане котла

Мгновенный приток тепловой энергии в барабан котла, $q_B(t)$, зависит от следующих величин:

- приток тепла от сгорания газа в топке, $q_T(t)$;
- приток энергии с питательной водой, $q_{BЭ2}(t)$;
- потери тепла с водой на непрерывную и периодические продувки, $q_{np}(t)$;
- отток тепла с водой на рециркуляцию водяного экономайзера, $q_{BЭ1}(t)$;
- отток тепла с паром из барабана котла, $q_{II}(t)$;

- расход тепла на нагрев металла, $q_M(t)$;
- потери тепла в окружающую среду, $q_{ном}(t)$.

Приток тепла от сгорания газа в топке определяется выражением

$$q_T(t) = k_T F_T(t). \quad (8)$$

Поступление энергии с питательной водой рассчитывается в модели водяного экономайзера (7). Потери тепла с водой на продувку определяются температурой воды в барабане котла, $\theta_B(t)$, и расходами воды на непрерывную, $F_{HP}(t)$, и периодическую, $F_{ПП}(t)$, продувки:

$$q_{np}(t) = f_{Hw}(\theta_B(t))(F_{HP}(t) + F_{ПП}(t)). \quad (9)$$

Расход на периодическую продувку введен в модель как сумма всех потерь теплоносителя в жидкой фазе из барабана и экранов топки, а также потерь при аварийном сливе воды при перепитке котла. Измерения расходов на периодическую продувку не производятся. Их учет в модели полезен для моделирования неправильных действий оператора при эксплуатации котла – например, учет потерь через оставленные открытыми дренажи экранов.

При включении рециркуляции вода из котла с расходом $F_{BЭ}^{min}$ поступает на вход водяного экономайзера, обеспечивая отток тепла из барабана:

$$q_{BЭ1}(t) = f_{Hw}(\theta_B(t)) F_{BЭ}^{min} s_{PEЦ}(t), \quad (10)$$

где $s_{PEЦ}(t)$ – признак открытия задвижки на линии рециркуляции, $s_{PEЦ} \in \{0,1\}$.

Насыщенный пар из барабана котла поступает в пароперегреватель, определяя отток тепла из барабана. Дополнительно потери пара из барабана котла могут возникнуть из-за открытия клапана аварийного сброса давления, а также из-за открытия дренажей коллекторов пароперегревателя:

$$q_{П}(t) = f_{Hs}(\theta_B(t))(F_{OP}(t - \tau_{OP}) + F_{нар}^{nom}(t)), \quad (11)$$

где $F_{OP}(t)$ – массовый расход острого пара на выходе пароперегревателя;

$F_{нар}^{nom}(t)$ – расход насыщенного пара на потери;

τ_{OP} – время запаздывания, определяющее задержку между изменением расхода острого пара на выходе и изменением расхода насыщенного пара из барабана котла.

В данной модели время запаздывания принято постоянным. Повышение точности модели может быть достигнуто за счет учета его зависимости от давления насыщенного пара и расхода острого пара.

Расход тепла на нагрев металла $q_M(t)$ зависит от изменения температуры воды в барабане котла. При постоянном значении температуры потери тепла на нагрев металла пренебрежимо малы. При росте температуры часть тепла аккумулируется в металлических стенках опускных и перепускных труб, коллекторах, экранах, стенках барабана. При снижении температуры воды аккумулированное тепло возвращается теплоносителю. Поведение величины $q_M(t)$ в зависимости от температуры в барабане котла может быть определено в операторной форме:

$$q_M(t) = \frac{K_M p}{T_M^2 p^2 + 2T_M p + 1} \theta_B(t) = W_M(p) \theta_B(t), \quad (12)$$

где $p \equiv d/dt$ – операция дифференцирования [20]. Коэффициент K_M определяет количество тепла, аккумулируемого в металле при увеличении температуры теплоносителя на один градус. С помощью постоянной времени T_M определяется длительность процесса нагрева металла.

Часть тепла теряется в окружающую среду. Потери пропорциональны разности температуры теплоносителя в барабане котла и температуры окружающей среды. Благодаря эффективной футеровке всех перепускных труб и барабана котла эти потери имеют настолько малое удельное значение, что могут быть приняты равными нулю при моделировании растопки и работы котла. Их учет необходим для адекватного поведения модели при выводе котла в резерв. Если их не учесть, котел не будет остывать.

С учетом (8)–(12) приток тепловой энергии в барабан котла определяется выражением

$$q_B(t) = q_T(t) + q_{B \rightarrow 2}(t) - q_{np}(t) - q_{B \rightarrow 1}(t) - q_{II}(t) - q_M(t) - q_{ном}(t). \quad (13)$$

С его помощью может быть определена энергия, накопленная теплоносителем в объеме барабана котла:

$$Q_B(t) = \int_0^t q_B(\xi) d\xi. \quad (14)$$

Энтальпия пароводяной смеси в барабане котла будет определяться соотношением тепловой энергии (14) и массы теплоносителя, заполняющего объем барабана и экранов топки:

$$H_B(t) = \frac{Q_B(t)}{V_B \rho_B} = \frac{1}{T_B} Q_B(t), \quad (15)$$

здесь масса определена как произведение водяного объема барабана V_B и плотности теплоносителя ρ_B в этом объеме. Плотность принята постоянной, что приводит к увеличению погрешности модели, но упрощает реализацию.

Величина энтальпии $H_B(t)$ используется для расчета давления $P_B(t)$ и температуры $\theta_B(t)$ в барабане котла:

$$P_B(t) = f_{P\gamma}(H_B(t), \gamma_B(\theta_B(t))); \quad (16)$$

$$\theta_B(t) = f_{\theta\gamma}(H_B(t), \gamma_B(\theta_B(t))), \quad (17)$$

где γ_B – доля воды в пароводяной смеси объема барабана. Значение γ_B зависит от температуры $\theta_B(t)$, и задано линейной аппроксимацией отношения плотности воды и пара для разных значений температуры насыщения. В диапазоне от 100 до 350 °С это значение меняется от 1 до 0,8. Чтобы в (17) избежать решения функционального уравнения, при моделировании в функцию подставляется значение температуры на предыдущем цикле расчета модели.

На рис. 2 представлена упрощенная структурная схема модели водяного тракта парового котла.

Блок ВЭ реализует модель водяного экономайзера (см. рис. 1). На схеме не отображены дополнительные аperiodические звенья, которые использовались для получения инерционности, присущей реальному объекту. Отсутствуют элементы задержки, необходимые для предотвращения появления алгебраических петель.

Корректное использование предложенной схемы предполагает дополнительное ограничение на поведение сигналов $s_{PEЦ}(t)$ и $F_{BЭ}(t)$: когда $s_{PEЦ}(t) = 1$, расход на водяной экономайзер $F_{BЭ}(t)$ должен устанавливаться в нуль. По этому же условию должны переключаться источники сигналов давления и температуры на входе модели водяного экономайзера (см. рис. 2).

Изменение уровня воды в барабане котла, а также учет влияния этого изменения на давление в барабане в данной работе не приводятся. Изменение уровня легко рассчитывается исходя из материального баланса и геометрических характеристик барабана котла. Влияние уровня на давление принято пренебрежимо малым.

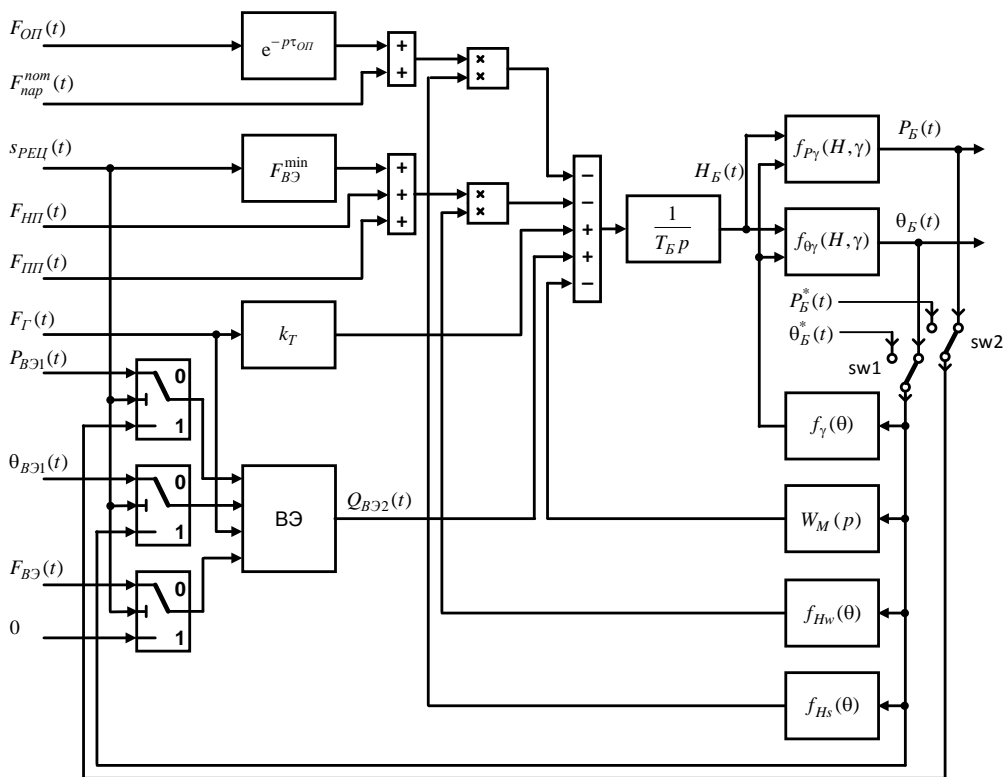


Рис. 2. Структурная схема модели водяного тракта парового котла

Идентификация модели

При разработке модели поставлена задача минимизировать количество настроечных параметров для упрощения процесса ее последующей идентификации. Поведение модели (см. рис. 1, 2) определяется следующими параметрами:

- коэффициент тепловыделения в топке котла k_T ;
- коэффициент тепловыделения водяного экономайзера $k_{BЭ}$;
- доля воды в пароводяной смеси на выходе водяного экономайзера $\gamma_{BЭ}$;
- расход конвективного потока в водяном экономайзере при включенной рециркуляции $F_{BЭ}^{\min}$;
- время задержки влияния изменения расхода острого пара на расход насыщенного пара из барабана котла $\tau_{ОП}$;
- объем водяного экономайзера $V_{BЭ}$;
- водяной объем барабана котла V_B ;
- величина аккумуляции тепла в металле K_M ;
- постоянные времени динамических звеньев.

Объемы экономайзера и барабана могут быть оценены исходя из геометрических размеров конструкции котла.

Идентификация модели выполняется поэтапно. На первом этапе по экспериментальным данным установившегося режима рассчитываются значения коэффициентов k_T , $k_{BЭ}$ и $\gamma_{BЭ}$. Исходя из энергетического баланса для установившегося режима справедливы следующие отношения:

$$k_{BЭ} F_{Г}^{ycm} + F_{BЭ}^{ycm} f_H(P_{ПВ}^{ycm}, \theta_{ПВ}^{ycm}) = F_{BЭ}^{ycm} (\gamma_{BЭ} f_{Hw}(\theta_{BЭ2}^{ycm}) + (1 - \gamma_{BЭ}) f_{Hs}(\theta_{BЭ2}^{ycm})), \quad (18)$$

$$(k_T + k_{BЭ}) F_{Г}^{ycm} + F_{BЭ}^{ycm} f_H(P_{ПВ}^{ycm}, \theta_{ПВ}^{ycm}) = F_{НП}^{ycm} f_{Hw}(\theta_B^{ycm}) + F_{ОП}^{ycm} f_{Hs}(\theta_B^{ycm}). \quad (19)$$

Верхний индекс «уст» говорит о том, что значения параметров соответствуют установившемуся режиму, при котором все давления, температуры и расходы не меняются во времени. Если вода в процессе нагрева в водяном экономайзере не нагревается до кипения, т. е. $\theta_{BЭ2}^{ycm} < \theta_B^{ycm}$, то $\gamma_{BЭ} = 1$. Если экономайзер кипящего типа, $\theta_{BЭ2}^{ycm} = \theta_B^{ycm}$, то для идентификации трех параметров необходимо использовать сведения о нескольких установившихся режимах.

На втором этапе по экспериментальным данным растопки котла с учетом оценок коэффициентов k_T и $k_{BЭ}$ рассчитывается энергетический небаланс модели и с его помощью рассчитывается величина коэффициента K_M .

Подставляя в (8)–(11) экспериментальные данные по расходам газа $F_{Г}^*(t)$, воды на подпитку котла $F_{BЭ}^*(t)$ и на непрерывную продувку $F_{НП}^*(t)$, острого пара на выходе котла $F_{ОП}^*(t)$, температурам питательной воды $\theta_{BЭ1}^*(t)$ и воды в барабане котла $\theta_B^*(t)$ и принимая в (13) равными нулю расход тепла на нагрев металла и потери в окружающую среду, по формуле (14) можно рассчитать модельное значение тепла, накопленного теплоносителем в барабане котла $Q_B^M(t_{кон})$. Здесь $t_{кон}$ – время окончания растопки, выбирается равным моменту выхода на установившейся режим после растопки. По экспериментальным дан-

ным температуры в барабане котла $\theta_B^*(t_{кон})$ рассчитывается значение тепла $Q_B^*(t_{кон})$, накопленного на момент $t_{кон}$ в барабане парового котла:

$$Q_B^*(t_{кон}) = T_B \left(f_{Hw}(\theta_B^*(t_{кон})) \gamma_B(\theta_B^*(t_{кон})) + f_{Hs}(\theta_B^*(t_{кон})) (1 - \gamma_B(\theta_B^*(t_{кон}))) \right). \quad (20)$$

Тогда коэффициент K_M может быть определен как

$$K_M = \frac{(Q_B^M(t_{кон}) - Q_B^*(t_{кон}))}{\theta_B^*(t_{кон}) - \theta_B^*(0)}. \quad (21)$$

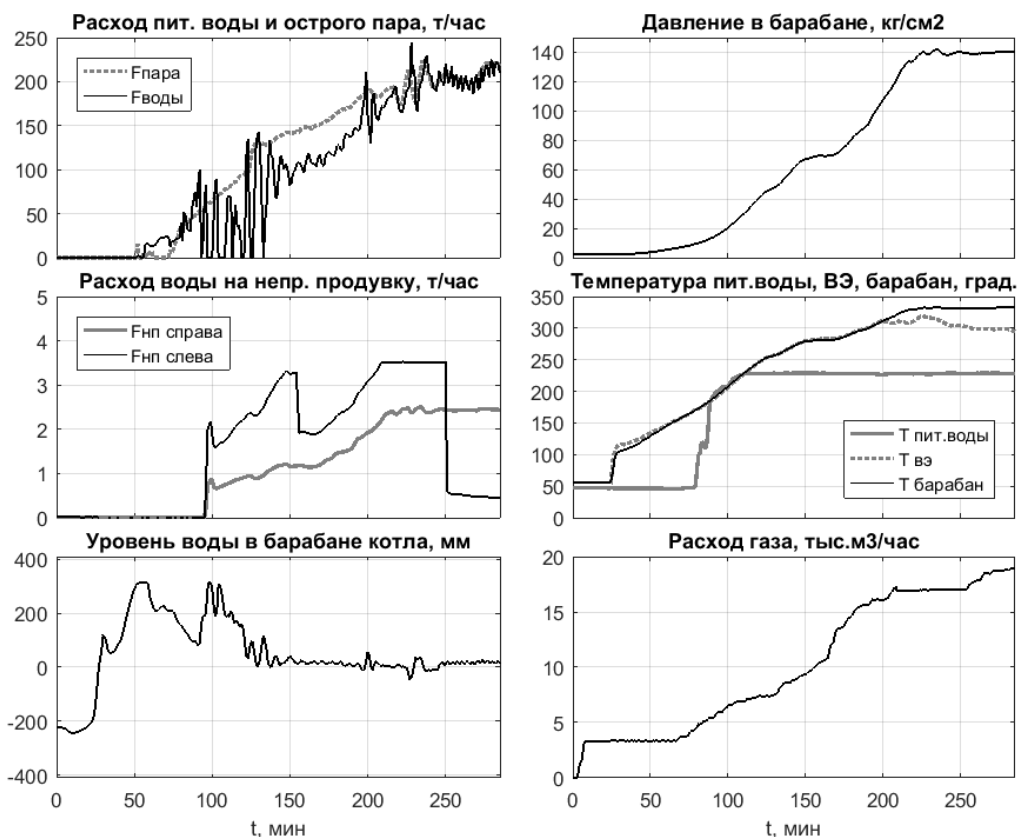


Рис. 3. Исходные данные

На третьем этапе переключатели sw1, sw2 структурной схемы модели (см. рис. 2) разрывают обратные связи и на вход модели поступают экспериментальные данные растопки котла для определения постоянных времени динамических звеньев, параметров $\tau_{оп}$ и $F_{вэ}^{min}$. Момент переключения задвижки на линии рециркуляции водяного экономайзера определяется по условию

$$s_{PEЦ}(t) = \begin{cases} 1, & \text{при } F_{BЭ}(t) > F_{BЭ}^{\min}; \\ 0, & \text{при } F_{BЭ}(t) \leq F_{BЭ}^{\min}. \end{cases} \quad (22)$$

Четвертый этап – окончательная проверка модели. Ключи sw1, sw2 замыкают обратные связи по модельным значениям температуры и давления в барабане котла. На данном этапе возможна дополнительная корректировка постоянных времени динамических звеньев.

Изложенный алгоритм применен для идентификации модели водяного тракта парового котла ТГМ-84. Значения параметров были получены из архивной информации автоматизированной системы управления паровым котлом. Данные архивируются с периодом в одну минуту. Графики изменения параметров в процессе растопки котла представлены на рис. 3.

По графикам видно, что на первом этапе, при подаче газа, температура в барабане котла не растет (до $t = 25$ мин) – практически все тепло аккумулируется в металле. На втором этапе происходит нагрев воды до температуры кипения при текущем давлении ($t \in [25, 30]$ мин). Затем – снижение скорости роста температуры и начало роста давления в барабане. С этого момента температура в барабане котла соответствует температуре насыщенного пара при текущем давлении. На втором этапе заметен рост уровня воды в барабане котла при отсутствии расхода на подпитку. Он объясняется температурным расширением воды. Дальнейший нагрев также приводит к росту уровня, и оператор котла поддерживает уровень в заданном диапазоне за счет периодической продувки нижних коллекторов топочных экранов.

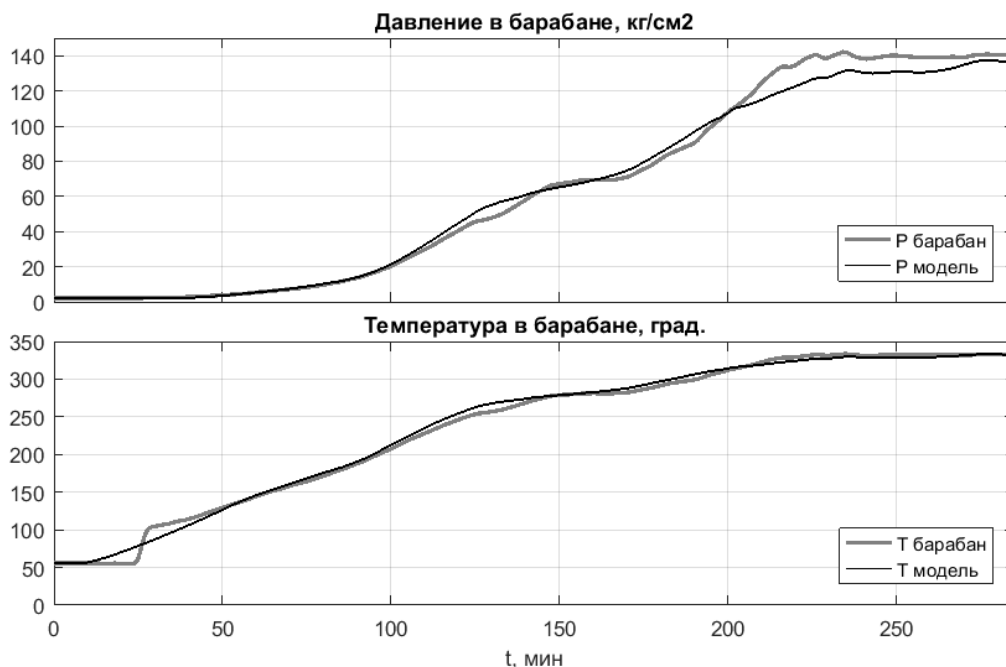


Рис. 4. Результаты моделирования

В течение первых двух часов растопки подпитка котла осуществляется эпизодически, что заметно по сильной неравномерности расхода питательной воды и колебаниям уровня, затем включается автоматический регулятор уровня. С этого момента уровень стабилизируется и расход воды становится непрерывным.

Анализ графиков изменения температуры показал, что в процессе растопки вода в водяном экономайзере нагревается до кипения. При выходе на режим ($t > 200$ мин) большой расход воды на подпитку и большая разность температур теплоносителя в барабане и питательной воды на входе водяного экономайзера приводят к тому, что вода в водяном экономайзере до кипения не нагревается.

На рис. 4 представлены графики изменения давления и температуры в барабане, полученные в результате идентификации модели (см. рис. 2) по данным, представленным на рис. 3.

В процессе идентификации рассчитаны значения коэффициентов $k_{BЭ}$, k_T . Водяной экономайзер потребляет 10 % от полной энергии сгорания газа, топочные экраны – 44,8 %. Оценка для топочных экранов согласуется, например, с [6], где доля теплового потока в топочные экраны от всей энергии, полученной при сгорании топлива, составляет 42 %. Коэффициент аккумуляции тепла в металле принят равным 200 МДж/°С. Расход воды через водяной экономайзер при рециркуляции равен 30 т/час. Время запаздывания для расчета расхода насыщенного пара по расходу острого пара составляет 60 с.

Заключение

Принятые при разработке модели решения обеспечили соответствие модели заданным критериям. Переход к расчету теплоэнергетических показателей через энтальпию обеспечил возможность использования линейных дифференциальных уравнений при описании процесса фазового перехода теплоносителя без потери точности, что значительно упростило реализацию модели. Смена режимов функционирования водяного экономайзера реализована за счет переключения структуры модели по внешнему сигналу положения задвижки.

Использование модели в компьютерном тренажере и ее испытание опытными операторами показали, что отличие динамических характеристик модели от реального объекта на человеческом уровне восприятия не ощущается. Нарекание вызывает лишь неправильное поведение температуры в барабане котла на начальном этапе нагрева, $t \in [10, 40]$ мин (см. рис. 4). Температура на выходе модели плавно растет, в то время как в реальности отсутствие изменения температуры сменяется последующим ее быстрым ростом до температуры кипения. Это связано с тем, что расход на рециркуляцию водяного экономайзера принят постоянным, в то время как на начальном этапе при холодных стенках водяного экономайзера конвективный перенос воды отсутствует. Аналогичная ситуация складывается и в топочных экранах: пока не появится некоторая разность температур между стенками и водой, движения воды не происходит. При конкретной реализации тренажера ситуация была исправлена с помощью добавления логического условия, обеспечивающего задержку начала растопки от момента розжига горелок.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Колпаициков С.А.* Обобщенная структура компьютерного тренажера оператора технологического процесса // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2010. – Вып. 3 (28). – С. 221–224.
2. Теплогидравлические модели оборудования электрических станций / Под общ. ред. Г.А. Филиппова, Ф.Ф. Пашенко. – М.: Физматлит, 2013. – 448 с.
3. *Alobaid F., Mertens N., Starkloff R., Lanz T., Heinze C., Epple B.* Progress in dynamic simulation of thermal power plants // Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 59, 2017, P. 79–162.
4. *Haq E.E.U., Rahman E.T.U., Ahad E.A., Ali E.F., Ijaz E.M.* Modeling and Simulation of an Industrial Steam Boiler // International Journal of Computer Engineering and Information Technology, Vol. 8, no. 1, 2016, pp. 7–10.
5. *Sunil P.U., Barve Jayesh, Nataraj P.S.V.* Boiler model and simulation for control design and validation // IFAC Proceedings Volumes, Vol. 47, Issue 1, 2014, pp. 936–940.
6. *Tong Yu, Jingqi Yuan.* Evaporation system modeling of the utility boiler aiming at real-time estimation of the heat flux into water walls // IFAC Proceedings Volumes, Vol. 46, Issue 13, 2013, pp. 581–584.
7. *Mohamad W.M. Wan, Ahmad T., Karim N.A. Ab, Ashaari A.* Fuzzy arithmetical modeling of a steam turbine and a boiler system // Mathematical Modelling and Analysis, Vol. 23, no. 1, 2018, pp. 101–116.
8. *Chandrasekharan S., Panda R.C., Swaminathan B.N.* Statistical modeling of an integrated boiler for coal fired thermal power plant // Heliyon, 4, 2018, e00322.
9. *Беднаржевский В.С.* Разработка математических моделей и программных средств для проектирования энергетических котлоагрегатов: Автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.13.18. – Барнаул: Алтайск. гос. ун-т, 2004. – 36 с.
10. *Усов С.В., Кудинов А.А.* Разработка математической модели ПГУ-200 Сызранской ТЭЦ в программном комплексе Thermolib // Теплоэнергетика. – 2016. – № 4. – С. 23–30.
11. *Livshits M.Yu., Elnur Mohammad A.H.* Nonlinear dynamic model of steam boiler furnace // MATEC Web Conf. 110, 01051. 2017.
12. *Клюев А.С., Товарнов А.Г.* Наладка систем автоматического регулирования котлоагрегатов. – М.: Энергия, 1970. – 280 с.
13. *Клюев А.С., Лебедев А.Т., Новиков С.И.* Наладка систем автоматического регулирования барабанных паровых котлов. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 279 с.
14. *Косицын В.Ю., Рыбалев А.Н., Теличенко Д.А.* Система управления тепловой нагрузкой котла // Теплоэнергетика. – 2013. – № 2. – С. 54–60.
15. *Пикуль З.Д.* Имитационное моделирование барабанного котла в типовых режимах функционирования // Ученые заметки ТОГУ. – 2016. – Т. 7, № 2. – С. 344–349.
16. *Rominus Valsalam S., Anish S., Raja Singh B.* Boiler Modelling and Optimal Control of Steam Temperature in Power Plants // IFAC Proceedings Volumes, Vol. 42, Issue 9, 2009, pp. 125–130.
17. *Kozáková A., Bucz Š.* Multiloop control of a drum boiler // Journal of Electrical Systems and Information Technology, Vol. 1, Issue 1, 2014, pp. 26–35.
18. Конструкция и работа котла ТГМ-84: Метод. указ. / Самар. гос. техн. ун-т; Сост. *М.В. Калмыков.* – Самара, 2006. – 12 с.
19. IAPWS R7-97(2012). Revised Release on the IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam. August 2007. <http://www.iapws.org/relguide/IF97-Rev.html> (page updated May 29, 2018).
20. *Бесекецкий В.А., Попов Е.П.* Теория систем автоматического управления. – СПб.: Профессия, 2004. – 752 с.

Статья поступила в редакцию 20 января 2019 г.

SIMULATION OF THE WATER FLOW SYSTEM OF A STEAM BOILER

I.A. Danilushkin, S.A. Kolpashchikov

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

Abstract. *The paper discusses the experience of developing a dynamic model of a steam boiler water path for creating a computer simulator. The simulator is used to train and evaluate the operating personnel actions of the boiler house when they performs basic technological operations during the working of the boiler. The challenge is to simulate the technological parameters of the plant in all operational modes: from filling the drum with feed water and starting, to working with a nominal load. The model describes the changes in temperature and pressure in the boiler drum, depending on the flow of feed water, continuous and periodic purging, flow of direct steam and gas flow. The model takes into account the heating of the feed water in the furnace walls and the water economizer, as well as the temperature of the feed water entering to the water economizer. The conservation of the energy balance in the model is realized by carrying out all intermediate calculations with respect to the enthalpy of the heat-carrying agent. This implementation allows to correctly take into account the change in the physical parameters of water during heating and pressure growing, ensures the linear behavior of the model, even taking into account the transit of the heat-carrying agent from one state of aggregation to another. The model takes into account the basic technological operations performed by the operating personnel of the boiler house during the boiler starting process. The model identified according to data of the automated control system of a steam boiler obtained during boiler starting. The paper presents experimental data, block diagrams of the main systems of the model, the computer simulation results. It justifies the assumptions that guided the authors in developing the model and describes the limitations that have arisen during its implementation.*

Keywords: *dynamic model, steam boiler, steam-water flow system, boiler circuit, enthalpy, identification, computer simulator.*

REFERENCES

1. *Kolpashchikov S.A.* Obobshchennaya struktura komp'yuternogo trenazhera operatora tekhnologicheskogo protsessa [Generalized structure of computer simulator of process operator] // Vestn. Samar. Gos. Tekhn. Un-ta. Ser. Tekhn. Nauki, 2017. no. 3(28). Pp. 221–224. (In Russian)
2. Teplogidravlicheskiye modeli oborudovaniya elektricheskikh stantsiy [Thermohydraulic models of power plants equipment] / Pod obshch. redaktsiyey G.A. Filippova, F.F. Pashchenko. Moscow, FIZMATLIT, 2013. 448 pp. (In Russian)
3. *Alobaid F., Mertens N., Starkloff R., Lanz T., Heinze C., Eppe B.* Progress in dynamic simulation of thermal power plants // Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 59, 2017. Pp. 79–162.
4. *Haq E.E.U., Rahman E.T.U., Ahad E.A., Ali E.F., Ijaz E.M.* Modeling and Simulation of an Industrial Steam Boiler // International Journal of Computer Engineering and Information Technology, Vol. 8, no. 1, 2016. Pp. 7–10.
5. *Sunil P.U., Barve Jayesh, Nataraj P.S.V.* Boiler model and simulation for control design and validation // IFAC Proceedings Volumes, Vol. 47, Issue 1, 2014. Pp. 936–940.
6. *Tong Yu, Jingqi Yuan.* Evaporation system modeling of the utility boiler aiming at real-time estimation of the heat flux into water walls // IFAC Proceedings Volumes, Vol. 46, Issue 13, 2013. Pp. 581–584.
7. *Mohamad W.M. Wan, Ahmad T., Karim N.A. Ab, Ashaari A.* Fuzzy arithmetical modeling of a steam turbine and a boiler system // Mathematical Modelling and Analysis, Vol. 23, no. 1, 2018. Pp. 101–

*Ivan A. Danilushkin (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.
Sergey A. Kolpashchikov (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.*

8. *Chandrasekharan S., Panda R.C., Swaminathan B.N.* Statistical modeling of an integrated boiler for coal fired thermal power plant // *Heliyon*, 4, 2018, e00322.
9. *Bednarzhevskiy V.S.* Razrabotka matematicheskikh modeley i programmnykh sredstv dlya proyektirovaniya energeticheskikh kotloagregatov: Diss. ... dokt. tekhn. nauk. Barnaul, ASU, 2004. 36 s. (In Russian)
10. *Usov S.V., Kudinov A.A.* Development of the CCP-200 mathematical model for Syzran CHPP using the Thermolib software package // *Thermal Engineering*. 2016. Vol. 63. no 4. Pp. 253–259.
11. *Livshits M.Yu., Mohammad A.H. Elnur.* Nonlinear dynamic model of steam boiler furnace // *MATEC Web Conf.* 110, 01051. 2017.
12. *Klyuyev A.S., Tovarnov A.G.* Naladka sistem avtomaticheskogo regulirovaniya kotloagregatov [Adjustment of automatic control systems of boilers]. Moscow, Energiya, 1970. 280 p. (In Russian)
13. *Klyuyev A.S., Lebedev A.T., Novikov S.I.* Naladka sistem avtomaticheskogo regulirovaniya barabannykh parovykh kotlov [Adjustment of automatic control systems of drum steam boilers]. Moscow, Energoatomizdat, 1985, 279 p. (In Russian)
14. *Kositsyn V.Y., Rybalev A.N., Telichenko D.A.* A system for controlling the boiler heat load // *Thermal Engineering*. 2013. Vol. 60. no. 2. Pp. 130–136.
15. *Pikul Z.D.* Imitatsionnoye modelirovaniye barabannogo kotla v tipovykh rezhimakh funktsionirovaniya [Simulation of drum boiler in typical mode of functioning] // *Uchenyye zametki TOGU*. 2016, T. 7, no 2. Pp. 344–349. (In Russian)
16. *Rominus Valsalam S., Anish S., Raja Singh B.* Boiler Modelling and Optimal Control of Steam Temperature in Power Plants // *IFAC Proceedings Volumes*, Vol. 42, Issue 9, 2009. Pp. 125–130.
17. *Kozáková A., Bucz Š.* Multiloop control of a drum boiler // *Journal of Electrical Systems and Information Technology*, Vol. 1, Issue 1, 2014, pp. 26–35.
18. *Konstruktsiya i rabota kotla TGM-84: Metod. ukaz.* [Design and operation of the boiler TGM-84: Method. instr.] / Sost. M.V. Kalmykov. Samara, SSTU, 2006. 12 p. (In Russian)
19. IAPWS R7-97(2012). Revised Release on the IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam. August 2007. <http://www.iapws.org/relguide/IF97-Rev.html> (page updated May 29, 2018).
20. *Besekerskiy V.A., Popov Ye.P.* Teoriya sistem avtomaticheskogo upravleniya [Theory of automatic control systems]. Saint-Petersburg: Professiya, 2004. 752 p. (In Russian).

УДК 681.5

ОПТИМАЛЬНОЕ ПО БЫСТРОДЕЙСТВИЮ УПРАВЛЕНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫМ ПРОЦЕССОМ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ С КОМБИНИРОВАННЫМИ ВНЕШНИМИ ВОЗДЕЙСТВИЯМИ ПО ГРАНИЧНЫМ УСЛОВИЯМ*

Н.А. Ильина, Э.Я. Рапопорт

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

E-mail: ilina.natalyaa@yandex.ru; edgar.rapoport@mail.ru

Аннотация. *Предлагается постановка и метод решения задачи оптимального по быстродействию управления процессом нагрева бесконечной пластины с двумя внешними воздействиями по граничным условиям, в качестве одного из которых рассматривается граничное сосредоточенное управление по величине внешнего теплового потока, а в роли второго фигурирует тепловой поток, определяемый заданной температурой окружающей среды. Решение задачи производится в условиях заданной точности равномерного приближения конечного температурного распределения по толщине пластины к заданному. Применяется метод конечных интегральных преобразований для поиска вход-выходной характеристики объекта с распределенными параметрами с двумя внешними граничными воздействиями. Предлагаемый подход к решению данной задачи использует предварительную параметризацию управляющих воздействий на основе аналитических условий оптимальности в форме принципа максимума Понтрягина и последующую редукцию к задаче полубесконечной оптимизации, решение которой находится с помощью альтернансного метода. Альтернансные свойства конечного результирующего температурного состояния в конце оптимального процесса приводят к базовой системе соотношений, которая при наличии дополнительной информации о форме кривой температурного распределения сводится к системе уравнений, разрешаемой относительно всех искомым неизвестных. Приводится представляющий самостоятельный интерес пример решения задачи оптимального по быстродействию управления температурным полем неограниченной пластины с двумя граничными воздействиями.*

Ключевые слова: *оптимальное управление, альтернансный метод, задача полубесконечной оптимизации, процесс нестационарной теплопроводности.*

Для повышения эффективности технологических процессов ставится задача оптимизации режимов нагрева металлических полуфабрикатов перед последующими операциями пластической деформации в производственных комплексах перед обработкой металла давлением [1].

Решение этой проблемы требует использования методов теории управления объектами с распределенными параметрами.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (проект 18-08-00048а).

*Ильина Наталья Андреевна, магистрантка.
Рапопорт Эдгар Яковлевич (д.т.н., проф.), профессор кафедры «Автоматика и управление в технических системах».*

Постановка задачи оптимального управления

В качестве объекта управления рассматривается процесс нагрева неограниченной пластины. Температурное поле пластины $Q(x, t)$ описывается в зависимости от пространственной координаты x и времени t линейным пространственно-одномерным однородным уравнением теплопроводности следующего вида [2]:

$$\frac{\partial Q(x, t)}{\partial t} = a \frac{\partial^2 Q(x, t)}{\partial x^2}, \quad x \in [0, R]; t \in [0, T]. \quad (1)$$

Здесь a – коэффициент температуропроводности; R – толщина пластины.

Начальное распределение принимается равномерным по всему объему пластины и, в частности, равным нулю:

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

Типовые граничные условия для модели объекта (1)–(2) в общем случае имеют вид [3]

$$\alpha_0 Q(0, t) + \beta_0 \frac{\partial Q(0, t)}{\partial x} = g_{01}(t), \quad t > 0; \quad (3)$$

$$\alpha_1 Q(R, t) + \beta_1 \frac{\partial Q(R, t)}{\partial x} = g_{11}(t), \quad t > 0, \quad (4)$$

где $\alpha_0, \alpha_1, \beta_0, \beta_1$ – заданные коэффициенты для левой и правой границ пластины;

$g_{01}(t), g_{11}(t)$ – сосредоточенные внешние воздействия на левой и правой границе.

Если принять в (3), (4) $\alpha_0 = \alpha_1 = 0, \beta_0 = -\lambda, \beta_1 = \lambda$, то получим:

$$\begin{aligned} -\lambda \frac{\partial Q(0, t)}{\partial x} &= g_{01}(t); \\ \lambda \frac{\partial Q(R, t)}{\partial x} &= g_{11}(t), \end{aligned} \quad (5)$$

где λ – коэффициент теплопроводности.

Соотношения (5) соответствуют граничным условиям 2-го рода [2]. Если в роли $g_{01}(t), g_{11}(t)$ рассматриваются сосредоточенные управляющие воздействия, то задача (1), (2), (5) описывает процесс управления температурным полем неограниченной пластины с двуканальным граничным управлением по величине внешнего теплового потока на ее поверхностях. Математическая постановка задачи оптимального по быстродействию управления объектом вида (1), (2), (5) и метод ее решения представлены в [4].

В случае, когда в (3), (4) $\alpha_0 = 0, \alpha_1 = \alpha, \beta_0 = -\lambda, \beta_1 = \lambda, g_{11}(t) = Q_n(t) = 0$, получим вместо (5):

$$-\lambda \frac{\partial Q(0, t)}{\partial x} = g_{01}(t); \quad \alpha Q(R, t) + \lambda \frac{\partial Q(R, t)}{\partial x} = 0, \quad (6)$$

что соответствует граничным условиям 2-го и 3-го рода на различных поверхно-

стях пластины с одним граничным управлением $g_{01}(t)$, сосредоточенным в точке $x = 0$, и тепловыми потерями на границе $x=R$ по закону конвективного теплообмена с коэффициентом теплопередачи α в окружающую среду с заданной температурой $Q_n(t) = 0$ (рис. 1).

Граничное управляющее воздействие $g_{01}(t)$ изменяется в заранее заданных пределах:

$$g_{01\min} \leq g_{01}(t) \leq g_{01\max}. \quad (7)$$

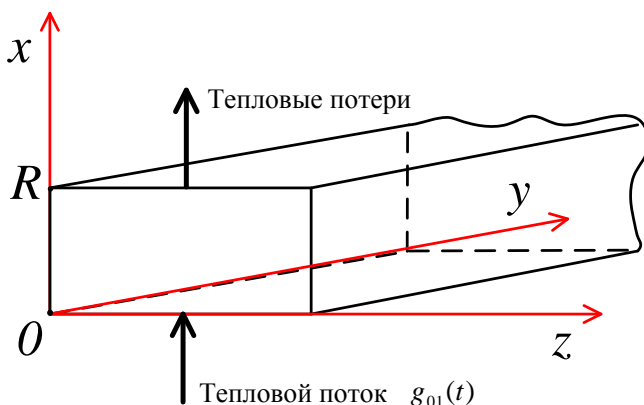


Рис. 1. Иллюстрация граничных воздействий

В момент T окончания процесса управления требуется обеспечить заданную точность ε равномерного приближения конечного распределения температуры $Q(x, T)$ к заданному $Q^*(x) = Q^* = const > Q_0$.

$$\max_{x \in [0, R]} |Q(x, T) - Q^*| \leq \varepsilon. \quad (8)$$

В качестве критерия оптимальности выступает величина T в виде следующего интегрального функционала качества:

$$I = \int_0^T dt = T \rightarrow \min_{g_{01}(t)}. \quad (9)$$

Метод конечных интегральных преобразований [3, 5–6] приводит к описанию температурного поля $Q(x, t)$ в зависимости от пространственной координаты $x \in [0, R]$ и времени $t \in [0, T]$ в форме его разложения в сходящийся ряд по собственным функциям $\phi(\mu_n, x)$ начально-краевой задачи (1), (2), (6), где μ_n^2 – собственные числа с коэффициентами, в роли которых выступают временные моды $\bar{Q}_n(\mu_n, t)$ функции $Q(x, t)$:

$$Q(x, t) = \sum_{n=0}^{\infty} \bar{Q}_n(\mu_n, t) \phi(\mu_n, x). \quad (10)$$

Выражение для $Q(x, t)$ в форме (10) находится в явном виде по следующему

алгоритму [3]:

1. Определяются путем решения задачи Штурма – Лиувилля

$$\begin{cases} a \frac{d^2 \phi(\mu, x)}{dx^2} = -\mu^2 \phi(\mu, x); \\ \frac{d\phi(\mu, 0)}{dx} = 0; \\ \frac{d\phi(\mu, R)}{dx} + \frac{\alpha}{\lambda} \phi(\mu, R) = 0 \end{cases} \quad (11)$$

ортонормированные собственные функции модели объекта (1), (2), (5):

$$\varphi_n(\mu_n, x) = \frac{1}{E_n} \cdot \cos\left(\eta_n \frac{x}{R}\right), \quad n = 1, 2, \dots, \quad (12)$$

где собственные числа μ_n^2 , нормирующие множители $\frac{1}{E_n}$ и числа η_n , определяются соотношениями

$$\eta_n \cdot \operatorname{tg} \eta_n - Bi = 0; \quad Bi = \frac{\alpha \cdot R}{\lambda}; \quad \mu_n = \frac{\sqrt{a}}{R} \eta_n; \quad (13)$$

$$E_n = \sqrt{\frac{a}{R} \cdot \frac{2 \eta_n}{\eta_n + \sin \eta_n \cos \eta_n}}, \quad n = 1, 2, \dots$$

2. Находится весовая функция конечного интегрального преобразования:

$$r(x) = \frac{1}{a}. \quad (14)$$

3. Составляется бесконечная система дифференциальных уравнений для временных мод $\bar{Q}_n(\mu_n, t)$:

$$\frac{d\bar{Q}_n(\mu_n, t)}{dt} = -\mu_n^2 \bar{Q}_n(\mu_n, t) + \frac{1}{\lambda E_n} g_{01}(t), \quad n = 1, 2, \dots; \quad (15)$$

$$\bar{Q}_n(\mu_n, 0) = \bar{Q}_0(\mu_n) = 0, \quad (16)$$

решение которой имеет следующий вид:

$$\bar{Q}_n(\mu_n, t) = \int_0^t V(\mu_n, \tau) G_n^*(\mu_n, t - \tau) d\tau, \quad n = 1, 2, \dots \quad (17)$$

4. Определяется функция $v(\mu_n, t)$ в (17), учитывающая граничные условия (5), и функция Грина $G_n^*(\mu_n, t)$, представляющая собой решение каждого из уравнений (15) на воздействие $g_{01}(t)$ вида δ -функции при нулевых начальных (16) и однородных граничных условиях:

$$V(\mu_n, t) = \frac{1}{\lambda} g_{01}(t) \varphi(\mu_n, x), \quad n = 1, 2, \dots; \quad (18)$$

$$G_n^*(\mu_n, t) = \exp\left(-\eta_n^2 \frac{a}{R^2} t\right).$$

Подставляя (12), (13), (17), (18) в (10), получаем итоговую зависимость температурного поля от внешних воздействий по граничным условиям:

$$Q(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \overline{Q}_n(\mu_n, t) \varphi(\mu_n, x) = \sum_{n=1}^{\infty} \varphi(\mu_n, x) \int_0^t V(\mu_n, \tau) G_n^*(\mu_n, (t - \tau)) d\tau =$$

$$= \sum_{n=1}^{\infty} \frac{a}{\lambda \cdot R} \cdot \frac{2\eta_n}{\eta_n + \sin \eta_n \cos \eta_n} \cos\left(\eta_n \frac{x}{R}\right) \int_0^t g_{01}(\tau) e^{-\eta_n^2 \frac{a}{R^2}(t-\tau)} d\tau. \quad (19)$$

Выражение (19) определяет в форме свертки по времени выходное температурное распределение, реализуемое за счет управляющего воздействия $g_{01}(t)$ по граничным условиям (5) с конвективными тепловыми потерями в окружающую среду с нулевой температурой.

Таким образом, может быть сформулирована следующая задача оптимального по быстродействию управления. Требуется найти такое программное управляющее воздействие $g_{01}^*(t)$, стесненное ограничением (7), которое переводит объект управления (15) из заданного начального состояния (16) в требуемое конечное согласно (8), где $Q(x, t)$ определяется выражениями (13)–(19), при минимальном значении критерия оптимальности (9).

Параметризация управляющих воздействий и редукция к задаче полубесконечной оптимизации

Предварительная параметризация управляющих воздействий позволяет получить их параметрическое представление с точностью до вектора искомых параметров.

Согласно технологии принципа максимума Понтрягина [7–9], распространяемого на бесконечномерный объект управления (15), (16), вводится функция Понтрягина:

$$H = \sum_{n=0}^{\infty} \psi_n(t) f_n(Q, g_{01}, t) = \psi_0(t) f_0(Q, g_{01}, t) + \sum_{n=1}^{\infty} \psi_n(t) f_n(Q, g_{01}, t), \quad (20)$$

где f_0 – подынтегральная функция критерия оптимальности (9), равная 1;

$f_n(Q, g_{01}, t)$ – правые части уравнений модели объекта (15);

$\psi_0(t)$ – сопряженная переменная, которая принимается равной -1 ;

$\psi_n(t)$ – сопряженные переменные, которые должны удовлетворять сопряженной системе уравнений:

$$\frac{d\psi_j}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial Q_j}, \quad j = 1, 2, \dots \quad (21)$$

На основании (9), (15) функция Понтрягина (20) принимает следующий вид:

$$H = -1 + \sum_{n=1}^{\infty} \psi_n(t) \left[-\mu_n^2 \bar{Q}_n(\mu_n, t) + \frac{1}{\lambda E_n} g_{01}(t) \right]. \quad (22)$$

Функция Понтрягина, рассматриваемая как функция одной переменной g_{01} , при соответствующих оптимальному процессу значениях $\bar{Q}_1^*(t), \dots, \bar{Q}_{N_0}^*(t)$ и сопряженных переменных $\psi_1^*(t), \dots, \psi_{N_0}^*(t)$ достигает своего максимума по этой переменной именно при оптимальном управлении в любой момент времени [7–9]:

$$\max_{g_{01}(t) \in [g_{01 \min}, g_{01 \max}]} H(\bar{Q}, \psi^*, g_{01}, t) = H(\bar{Q}, \psi^*, g_{01}^*, t).$$

Найдем решение сопряженной системы (21), которая принимает следующий вид:

$$\frac{d\psi_n}{dt} = \mu_n^2 \psi_n(t), \quad n = 1, 2, \dots, \quad (23)$$

независимый от $g_{01}(t)$ и $\bar{Q}_n(\mu_n, t)$.

Матрица постоянных коэффициентов этой системы является диагональной, и каждое из уравнений разрешается независимо от других, что определяет в итоге сопряженные переменные в виде экспоненциальных функций времени:

$$\psi_n(t) = \psi_n^* e^{-\mu_n^2(T-t)}, \quad n = 1, 2, \dots, \quad (24)$$

где $\psi_n^* = \psi_n(T)$ – конечные значения сопряженных переменных.

Подставляя (24) в (22), получим линейную относительно управляющего воздействия функцию Понтрягина, условие достижения максимума которой на оптимальном управлении приводит к его определению в форме релейной функции времени, попеременно принимающей свои допустимые значения в (7):

$$g_{01}^*(t) = \frac{g_{01 \max} + g_{01 \min}}{2} \pm \frac{g_{01 \max} - g_{01 \min}}{2} \text{sign} M_1(t), \quad (25)$$

где $M_1(t) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{\lambda E_n} g_{01}(t) \cdot \psi_n^* \cdot \exp(-\mu_n^2(T-t))$, и бесконечная сумма экспонент в выражении для $M_1(t)$ нигде тождественно не равна нулю [8].

В соответствии с (25) $g_{01}^*(t)$ определяется в параметризованной форме $g_{01}^*(\Delta^{(N_0)}, t)$ с точностью до вектора $\Delta^{(N_0)} = (\Delta_i^{(N_0)})$, $i = \overline{1, N_0}$ длительностей $\Delta_i^{(N_0)}$ интервалов постоянства, общее число которых равно N_0 :

$$g_{01}^*(\Delta_0^{(N_0)}, t) = \frac{g_{01_{max}} + g_{01_{min}}}{2} + (-1)^{j+1} \frac{g_{01_{max}} - g_{01_{min}}}{2};$$

$$\sum_{i=0}^{j-1} \Delta_i^{(N_0)} < t < \sum_{i=0}^j \Delta_i^{(N_0)}, j = 1, N_0, \Delta_0^{(N_0)} = 0. \quad (26)$$

В пределах первого интервала постоянства согласно ограничениям (7) здесь и далее принимается $g_{01}^*(t) = g_{01_{max}}$ в рассматриваемой задаче нагрева пластины до температуры $Q^* > Q_0$. Релейный характер двухинтервального оптимального по быстродействию управления представлен на рис. 2.

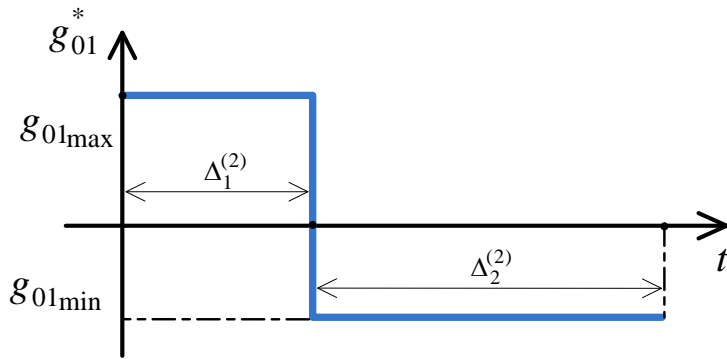


Рис. 2. Вид оптимального по быстродействию управления при $N_0 = 2$

В соответствии с параметризованной формой управляющего воздействия вида (26) выражение (19) также будет иметь параметризованную форму представления конечного температурного состояния $Q(x, \Delta_1^{(2)}, \Delta_2^{(2)})$ после подстановки (26) в (19) и вычисления интегралов при $t = T$.

В частности, ограничиваясь здесь и далее широко распространенным на практике случаем двухинтервального управления при $N_0 = 2$, будем иметь в результате:

$$Q(x, \Delta_1^{(2)}, \Delta_2^{(2)}) = \frac{R}{\lambda} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\eta_n^2} \cdot \frac{2\eta_n}{\eta_n + \sin \eta_n \cos \eta_n} \cdot \cos\left(\eta_n \frac{x}{R}\right) \times$$

$$\times \left[g_{01_{max}} \left(\exp\left(-\eta_n^2 \frac{a}{R^2} \Delta_2\right) - \right. \right. \quad (27)$$

$$\left. \left. - \exp\left(-\eta_n^2 \frac{a}{R^2} (\Delta_1 + \Delta_2)\right) \right) + g_{01_{min}} \left(1 - \exp\left(-\eta_n^2 \frac{a}{R^2} \Delta_2\right) \right) \right]$$

При полученном параметрическом представлении искомых управляющих воздействий можно представить критерий оптимальности (9) в виде простой суммы длительностей отдельных интервалов постоянства оптимального управления:

$$I = \Delta_1^{(2)} + \Delta_2^{(2)} \rightarrow \min, \quad (28)$$

а условие (8) оценки конечного распределения температур будет иметь вид

$$\Phi(\Delta_1^{(2)}, \Delta_2^{(2)}) = \max_{x \in [0, R]} \left| Q(x, \Delta_1^{(2)}, \Delta_2^{(2)}) - Q^* \right| \leq \varepsilon, \quad \varepsilon > 0. \quad (29)$$

Здесь $Q(x, \Delta_1^{(2)}, \Delta_2^{(2)})$ определяется по формуле (27). Условие (29) означает, что абсолютные отклонения от требуемого состояния температуры пластины оказываются либо строго меньшими ε , либо строго равными ε в отдельных точках на отрезке $[0, R] \ni x$.

Таким образом, производится точная редукция исходной задачи к задаче полубесконечной оптимизации (ЗПО) на минимум целевой функции (28) конечного числа переменных $\Delta_j^{(2)}, j = 1, 2$ с бесконечным числом ограничений (29), порожаемых требованием обеспечения заданной точности равномерного приближения во всех точках $x \in [0, R]$ [10].

Решение задачи полубесконечной оптимизации альтернансным методом

Задача (28)–(29) разрешима в условиях $N_0 = 2$ не при всех ε , а только для $\varepsilon \geq \varepsilon_{\min}^{(2)}$ в (29), где $\varepsilon_{\min}^{(2)}$ – минимально достижимая величина ε в рассматриваемом классе граничных управлений:

$$\varepsilon_{\min}^{(2)} = \min_{\Delta_1^{(2)}, \Delta_2^{(2)}} \left\{ \max_{x \in [0, R]} \left| Q(x, \Delta_1^{(2)}, \Delta_2^{(2)}) - Q^* \right| \right\}. \quad (30)$$

Решение $\Delta_j^{(2)}, j = 1, 2$ задачи (28)–(29) при достаточно малостеснительных допущениях обладает базовыми альтернансными свойствами [8, 10–11].

Основное свойство заключается в том, что число точек $x_j^0 \in [0, R], j = 1, R_x$, в которых достигаются предельно допустимые абсолютные отклонения $Q(x, \Delta_1^{(2)}, \Delta_2^{(2)})$ от Q^* , равные ε , всегда оказывается равным числу всех неизвестных в ЗПО (28), (29). В качестве неизвестных фигурируют длительности интервалов постоянства $\Delta_1^{(2)}, \Delta_2^{(2)}$ оптимального управления и величина минимакса $\varepsilon_{\min}^{(2)}$ в случае $\varepsilon = \varepsilon_{\min}^{(2)}$ в (29).

Таким образом, на искомом решении $\Delta^{(2)} = (\Delta_1^{(2)}, \Delta_2^{(2)})$ задачи быстродействия выполняются R_x равенств вида

$$\left| Q(x_j^0, \Delta_1^{(2)}, \Delta_2^{(2)}) - Q^* \right| = \varepsilon, \quad j = \overline{1, R_x}, \quad (31)$$

где

$$R_x = \begin{cases} s, & \varepsilon > \varepsilon_{\min}^{(2)}; \\ s + 1, & \varepsilon = \varepsilon_{\min}^{(2)}. \end{cases} \quad (32)$$

Здесь s – число свободно варьируемых параметров в составе $\Delta_j^{(N_0)}$, $j = 1, 2$. В условиях двухинтервального характера управления при $N_0 = 2$ имеем $s = 2$ в предельном случае $\varepsilon = \varepsilon_{\min}^{(2)}$. Следовательно, при $\varepsilon = \varepsilon_{\min}^{(2)}$ число уравнений (31) будет равно

$$R_x = s + 1 = 3 \quad (33)$$

при наличии трех неизвестных $\Delta_1^{(2)}$, $\Delta_2^{(2)}$, $\varepsilon_{\min}^{(2)}$, а при заранее фиксированной величине $\varepsilon > \varepsilon_{\min}^{(2)}$ это число сокращается до двух при двух неизвестных $\Delta_1^{(2)}$, $\Delta_2^{(2)}$.

Таким образом, соотношения (31) с учетом (32)–(33) оказываются замкнутыми относительно всех параметров процесса управления, что указывает на возможность решения исходной задачи оптимального управления.

Основное затруднение теперь состоит в том, что равенствам (31) формально соответствует множество вариантов по форме кривой пространственного распределения $Q(x, \Delta_1^{(2)}, \Delta_2^{(2)})$. Для однозначного определения вида этой кривой нужно установить знаки разностей $Q(x_j^0, \Delta_1^{(2)}, \Delta_2^{(2)}) - Q^*$ в каждом из уравнений (31) и найти координаты точек x_j^0 . Эта задача может быть решена только при известной конфигурации кривой температурного распределения $Q(x_j^0, \Delta_1^{(2)}, \Delta_2^{(2)}) - Q^*$ на отрезке $[0, R] \ni x$ при двухинтервальном граничном управлении, устанавливаемой на основании физических закономерностей процессов нестационарной теплопроводности в зависимости от величины ε .

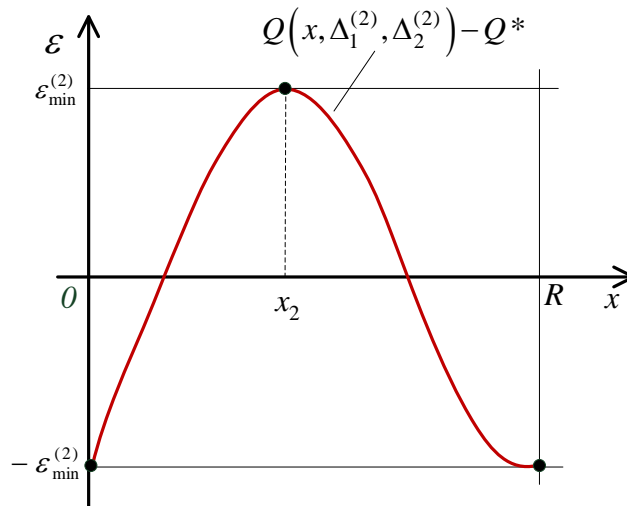


Рис. 3. Форма кривой результирующего температурного распределения при $\varepsilon = \varepsilon_{\min}^{(2)}$

Анализ этих закономерностей [10] приводит к однозначно фиксируемому варианту по форме кривой $Q(x_j^0, \Delta_1^{(2)}, \Delta_2^{(2)}) - Q^*$ в условиях $\varepsilon = \varepsilon_{\min}^{(2)}$ в (31), представленному на рис. 3.

Приведенной форме кривой результирующего температурного распределения, указанной на рис. 3, отвечает система уравнений (34), составляемая на основании равенств (31) и дополняемая условиями существования экстремума функции $Q(x_j^0, \Delta_1^{(2)}, \Delta_2^{(2)}) - Q^*$ во внутренней точке x_2^0 отрезка $[0, R]$ для определения ее координат.

$$\begin{aligned} Q(0, \Delta_1^{(2)}, \Delta_2^{(2)}) - Q^* &= -\varepsilon_{\min}^{(2)} ; \\ Q(x_2^0, \Delta_1^{(2)}, \Delta_2^{(2)}) - Q^* &= \varepsilon_{\min}^{(2)} ; \\ Q(R, \Delta_1^{(2)}, \Delta_2^{(2)}) - Q^* &= -\varepsilon_{\min}^{(2)} ; \\ \frac{\partial Q(x_2^0, \Delta_1^{(2)}, \Delta_2^{(2)})}{\partial x} &= 0. \end{aligned} \quad (34)$$

В этом случае максимально допустимые отклонения $\varepsilon_{\min}^{(2)}$ оказываются знакопередающимися в последовательно расположенных точках $x_j^0 \in [0, R]$, $j = 1, R_x$, образующих чебышевский альтернанс [8].

Система (34) четырех уравнений решается стандартными численными методами относительно четырех неизвестных $\Delta_1^{(2)}, \Delta_2^{(2)}, \varepsilon_{\min}^{(2)}, x_2^0$.

Численные результаты решения системы уравнений (34), полученные в программной среде MATLAB [12–15] для исходных данных, указанных в табл. 1, приведены в табл. 2 и на рис. 4.

Таблица 1

Исходные данные для расчета

Материал	Титановый сплав
Толщина пластины R , м	0,2
Начальная температура Q_0 , °C	0
Требуемая конечная температура Q^* , °C	460
Коэффициент теплопроводности титанового сплава λ , Вт / м ² · °C	35
Коэффициент температуропроводности a , м ² / с	$4,34 \cdot 10^{-6}$
Коэффициент теплопередачи α , Вт / м ² · °C	260
Максимальная величина теплового потока $g_{01_{\max}}$, Вт / м ²	416000
Минимальная величина теплового потока $g_{01_{\min}}$, Вт / м ²	-124800

Расчетные результаты

$\Delta_1^{(2)}, \text{с}$	$\Delta_2^{(2)}, \text{с}$	$\varepsilon_{\min}^{(2)}, ^\circ\text{C}$	$x_2^0, \text{М}$
1336	871	57,7	0,0785

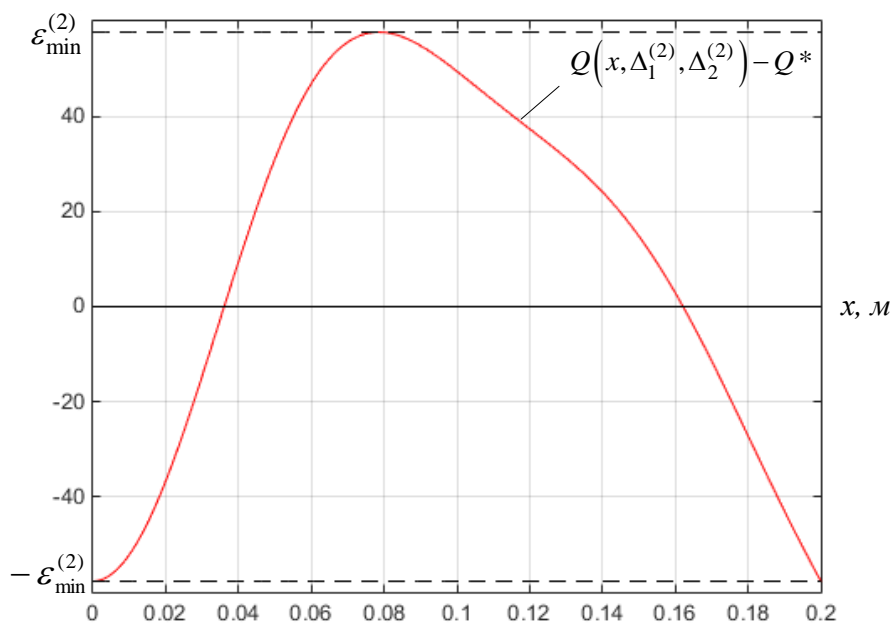


Рис. 4. Кривая температурного распределения при $\varepsilon = \varepsilon_{\min}^{(2)}$, полученная при расчетах

Решение систем уравнений производилось с учетом первых 10 членов бесконечного ряда в (20).

Как видно из рис. 4, температурное распределение в конце оптимального процесса соответствует предположению на рис. 3.

Теперь, когда величина $\varepsilon_{\min}^{(2)}$ найдена, вернемся к случаю, когда $\varepsilon > \varepsilon_{\min}^{(2)}$ в (31). Тогда число точек R_x и, следовательно, число уравнений согласно (32) будет равным

$$R_x = s = 2 .$$

Можно показать, что вид кривой результирующего температурного распределения будет совпадать с кривой, представленной на рис. 3, за тем лишь исключением, что отклонение в точке $x=R$ не достигает предельно допустимой величины $\left| \varepsilon_{\min}^{(2)} \right|$ [8, 10]. На этом основании соответствующая система уравнений будет выглядеть следующим образом вместо (34):

$$\begin{aligned}
Q(0, \Delta_1^{(2)}, \Delta_2^{(2)}) - Q^* &= -\varepsilon; \\
Q(x_2^0, \Delta_1^{(2)}, \Delta_2^{(2)}) - Q^* &= \varepsilon; \\
\frac{\partial Q(x_2^0, \Delta_1^{(2)}, \Delta_2^{(2)})}{\partial x} &= 0.
\end{aligned}
\tag{35}$$

Исходя из условия $\varepsilon > \varepsilon_{\min}^{(2)}$ примем величину $\varepsilon = 80 \text{ }^\circ\text{C}$ в (35) и найдем решение этой системы из трех уравнений с тремя неизвестными: $\Delta_1^{(2)}, \Delta_2^{(2)}, x_2^0$. Результаты решения представлены в табл. 3, кривая $Q(x_j^0, \Delta_1^{(2)}, \Delta_2^{(2)}) - Q^*$ изображена на рис. 5.

Таблица 3

Расчетные результаты при $\varepsilon > \varepsilon_{\min}^{(2)}$

$\Delta_1^{(2)}, \text{с}$	$\Delta_2^{(2)}, \text{с}$	$x_2^0, \text{м}$
1690	1412	0,127

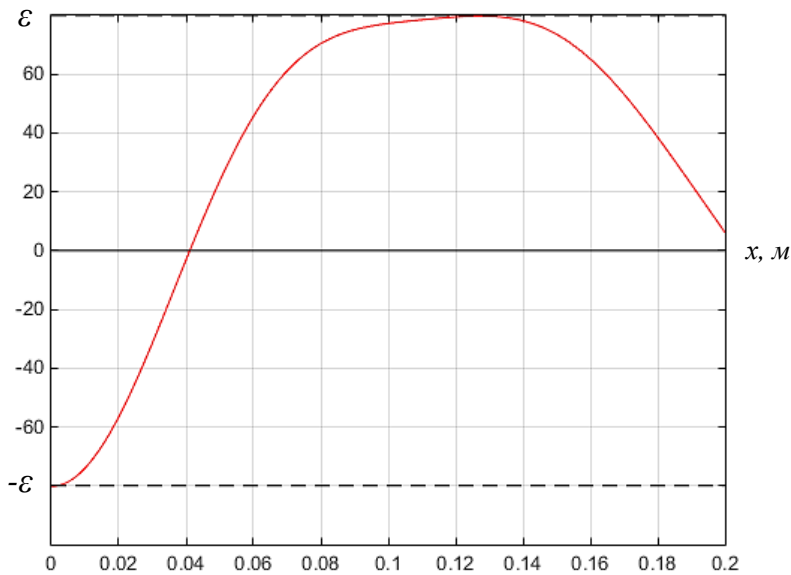


Рис. 5. Кривая температурного распределения при $\varepsilon > \varepsilon_{\min}^{(2)}$

При тепловой изоляции границы $x=R$, то есть при отсутствии тепловых потерь на этой границе, следует принять в (3), (4) $\alpha_0 = \alpha_1 = 0$, $\beta_0 = -\lambda$, $\beta_1 = \lambda$, $g_{01}(t) = g_{01}(t)$, $g_{11}(t) = 0$, и граничные условия записываются в следующем виде в отличие от (5) и (6):

$$\begin{aligned}
-\lambda \frac{\partial Q(0,t)}{\partial x} &= g_{01}(t); \\
\lambda \frac{\partial Q(R,t)}{\partial x} &= 0.
\end{aligned}
\tag{36}$$

Тогда метод конечных интегральных преобразований по вышеприведенной схеме (10)–(19) опять приводит к описанию управляемой функции $Q(x,t)$ в (1) в зависимости от пространственной координаты $x \in [0, R]$ и времени $t \in [0, T]$ бесконечной системой дифференциальных уравнений (15), (16) для временных мод $\bar{Q}_n(\mu_n, t)$ разложения $Q(x,t)$ в сходящийся в среднем ряд (10) по собственным функциям $\varphi_n(\mu_n, x)$, но теперь уже с отличающимися от (12), (13) собственными функциями и собственными числами [3]:

$$\begin{aligned}
\varphi_n(\mu_n, x) &= \frac{1}{E_n} \cos\left(\pi n \frac{x}{R}\right); \quad \mu_n = \frac{\sqrt{a}}{R} \pi n, \quad n = 0, 1, 2, \dots; \\
E_n &= \begin{cases} \sqrt{\frac{R}{a}}, & n = 0; \\ \sqrt{\frac{R}{2a}}, & n = 1, 2, \dots, \end{cases}
\end{aligned}
\tag{37}$$

что приводит к следующей зависимости температурного поля от управляющего воздействия:

$$Q(x,t) = \frac{1}{Rc\gamma} \int_0^t g_{01}(\tau) d\tau + \frac{2}{Rc\gamma} \sum_{n=1}^{\infty} \cos\left(\pi n \frac{x}{R}\right) \cdot \int_0^t g_{01}(\tau) \cdot e^{-\mu_n^2(t-\tau)} d\tau,
\tag{38}$$

не совпадающей с (19).

Оптимальное управление для рассматриваемой задачи также определяется в форме релейной функции времени (25), откуда следует, что параметризованная форма конечного температурного состояния представляется с учетом (26), (38) в следующем виде:

$$\begin{aligned}
Q(x, \Delta_0^{(2)}, \Delta_1^{(2)}) &= g_{01_{\max}} \Lambda_{01}(x, \Delta_{01}^{(2)} + \Delta_{02}^{(2)}) + \\
&+ (g_{01_{\min}} - g_{01_{\max}}) \Lambda_{01}(x, \Delta_{02}^{(2)}),
\end{aligned}
\tag{39}$$

где

$$\Lambda_{01}(x,t) = \frac{R}{\lambda} \left[\frac{at}{R^2} + \frac{1}{2} \left(\left(\frac{x}{R} \right)^2 - \frac{1}{3} \right) - 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{\pi^2 n^2} \cos\left(\frac{\pi nx}{R}\right) \cdot e^{-\mu_n^2 t} \right].$$

Схема применения альтернансного метода повторяет предыдущую. Следовательно, итоговая система уравнений будет аналогична (34) с тем отличием, что $Q(x, \Delta_1^{(2)}, \Delta_2^{(2)})$ определяется по формуле (39).

Численные результаты решения для данного случая представлены в табл. 4,

а кривая температурного распределения управляемой величины в конце оптимального процесса с отклонениями $\varepsilon_{\min}^{(2)}$ от заданного состояния показана на рис. 6.

Таблица 4

**Расчетные результаты при одноканальном управлении
со стороны теплового потока $g_{01}(t)$**

$\Delta_{01}^{(2)}, \text{с}$	$\Delta_{02}^{(2)}, \text{с}$	$\varepsilon_{\min}^{(2)}, ^\circ\text{C}$	$x_2^0, \text{М}$
4031	892	13	0,065

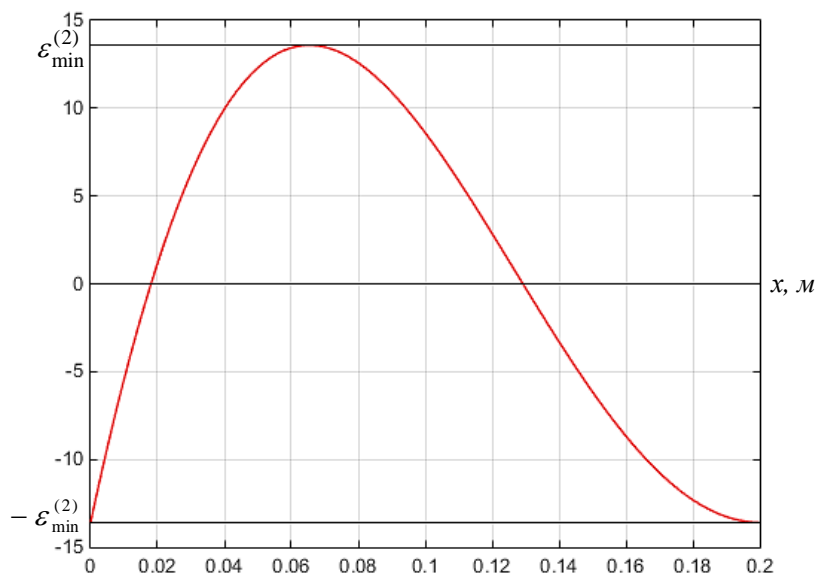


Рис. 6. Кривая результирующего температурного распределения при отсутствии влияния тепловых потерь на границе $x=R$

Как следует из сравнения расчетных результатов, представленных на рис. 4 и рис. 6, тепловые потери оказывают существенное влияние на величину минимаксного отклонения $\varepsilon_{\min}^{(2)}$, увеличивая его в 4 раза.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бутковский А.Г., Малый С.А., Андреев Ю.Н. Управление нагревом металла. – М.: Металлургия, 1981. – 272 с.
2. Карташов Э.М. Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел. – М.: Высшая школа, 2001. – 550 с.
3. Рапопорт Э.Я. Структурное моделирование объектов и систем управления с распределенными параметрами. – М.: Высшая школа, 2003. – 299 с.
4. Рапопорт Э.Я., Ильина Н.А. Двухканальное оптимальное по быстродействию управление процессом нестационарной теплопроводности // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2018. – № 1(57). – С. 7–18.
5. Кошляков Н.С., Глинер Э.Б., Смирнов М.М. Уравнения в частных производных математической физики. – М.: Наука, 1970. – 707 с.
6. Мартыненко Н.А., Пустыльников Л.М. Конечные интегральные преобразования и их

- применение к исследованию систем с распределенными параметрами. – М.: Наука, 1986. – 303 с.
7. Понтрягин Л.С. Математическая теория оптимальных процессов / Л.С. Понтрягин, В.Г. Болтянский, Р.В. Гамкрелидзе, Е.Ф. Мищенко. – 2-е изд. – М.: Наука, 1969. – 384 с.
 8. Рапопорт Э.Я. Оптимальное управление системами с распределенными параметрами. – М.: Высшая школа, 2009. – 677 с.
 9. Понтелеев А.В., Бортаковский А.С. Теория управления в примерах и задачах. – М.: Высшая школа, 2017.
 10. Рапопорт Э.Я. Альтернативный метод в прикладных задачах оптимизации. – М.: Наука, 2000. – 336 с.
 11. Рапопорт Э.Я., Плишвицева Ю.Э. Алгоритмически точный метод параметрической оптимизации в краевых задачах оптимального управления системами с распределенными параметрами // Автоматизация. – 2009. – Т. 45. – № 5. – С. 103–112.
 12. Дьяконов В.П. MATLAB. Полный самоучитель. – М.: ДМК Пресс, 2012. – 768 с.
 13. Потемкин В.Г. Введение в Matlab [Электронный ресурс]. – М.: Softline Co, 2001. – Режим доступа: <http://matlab.exponenta.ru/ml/book1/index.php> (accessed March 02, 2019).
 14. MATLAB. Exponenta [Электронный ресурс]: Optimization Toolbox 2.2 Руководство пользователя / авт. А.Г. Трифионов. – Электрон. и текстовые данные. – Режим доступа: http://matlab.exponenta.ru/optimiz/book_1/ (accessed March 02, 2019).
 15. MATLAB. Exponenta [Электронный ресурс]: Введение в современные методы оптимизации систем управления. – Режим доступа: <http://matlab.exponenta.ru/optimrobast/book1/index.php> (accessed February 10, 2019).

Статья поступила в редакцию 25 марта 2019 г.

TIME-OPTIMAL CONTROL OF THE HEATING PROCESS WITH COMBINED EXTERNAL INFLUENCES BY THE BOUNDARY CONDITIONS

N.A. Iilina, E.Ya. Rapoport

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

E-mail: iilina.natalyaa@yandex.ru; edgar.raoport@mail.ru

Abstract. *The formulation and method of solving the problem of optimal speed control of the heating process of an unlimited plate with two external influences on the boundary conditions, as one of which is considered the boundary concentrated control of the magnitude of the external heat flow, and the another is the heat flow, determined by a given ambient temperature. The solution of the problem is carried out under the conditions of a given accuracy of uniform approximation of the final temperature distribution over the plate thickness to the specified one. The method of finite integral transformations is used to find the input-output characteristics of an object with distributed parameters with two external boundary effects. The proposed method of solution of this problem is used the preliminary parametrization of control actions based on the analytical conditions of optimality in the form of the Pontryagin maximum principle and the subsequent reduction to the semi-infinite optimization problem, the solution of which is found using the alternance method. The alternance properties of the final resultant temperature state at the end of the optimal process leads to a basic system of relations, which, in the presence of additional information about the shape of the temperature distribution curve, is reduced to a system of equations that is resolved with respect to all the required unknowns. An example of solving*

Natalya A. Iilina, Postgraduate Student.
Edgar Ya. Rapoport (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.

the problem of optimal speed control of the temperature field of an unlimited plate with two boundary influences is presented.

Keywords: *optimal control, two-channel control, alternance method, semi-infinite optimization, process of non-stationary heat conductivity.*

REFERENCES

1. *Butkovskiy A.G., Malyy S.A., Andreev Yu.N.* Upravlenie nagrevom metalla [Control of Metal Heating]. Moscow, Metallurgy Publ., 1981. 272 p. (In Russian).
2. *Kartashov E.M.* Analiticheskie metody v teorii teploprovodnosti tverdukh tel [Analytical methods in the theory of heat conductance in solids]. Moscow, Vyssh. Shkola, 2001. 550 p. (In Russian).
3. *Rapoport E.Ya.* Strukturnoe modelirovanie ob'ektov i sistem s raspredelennymi parametrami [Structural modeling of objects and control systems with the distributed parameters]. Moscow, Vyssh. Shkola, 2003. 299 p. (In Russian).
4. *Rapoport E.Ya., Il'ina N.A.* Dvukanal'noe optimal'noe po bystrodeystviyu upravlenie protsessom nestatsionarnoy teploprovodnosti [Two-channel time-optimal control of the process of nonstationary heat conductivity] // Vestn. Samar. Gos. Tekhn. Un-ta. Ser. Tekhn. Nauki. – Samara, 2018. no. 1(57). Pp. 7–18. (In Russian).
5. *Koshlyakov N.S., Gliner E.B., Smirnov M.M.* Uravneniya v chastnykh proizvodnykh matematicheskoy fiziki [The partial differential equations of mathematical physics]. Moscow, Nauka, 1970. 707 p. (In Russian).
6. *Martynenko N.A., Pustynnikov L.M.* Konechnye integralnye preobrazovaniya i ih primeneniye k issledovaniyu sistem s raspredelennymi parametrami [Final engineering transformations and their application to the study of systems with distributed parameters]. Moscow, Nauka, 1986. 303 p. (In Russian).
7. *Pontryagin L.S., Boltyanskiy V.G., Gamkrelidze R.V., Mischenko E.F.* Matematicheskaya teoriya optimalnykh protsessov [Mathematical theory of optimal processes]. Moscow, Nauka, 1969. 384 p.
8. *Rapoport E.Ya.* Optimal'noe upravlenie sistem s raspredelennymi parametrami [Optimal Control for Systems with Distributed Parameters]. Moscow, Vyssh. Shkola, 2009. 677 p. (In Russian).
9. *Ponteleev A.V., Bortakovskiy A.S.* Teoriya upravleniya v primerakh i zadachakh [The theory of control in examples and problems]. Moscow, Vyssh. Shkola, 2017.
10. *Rapoport E.Ya.* Al'ternantsnyy metod v prikladnykh zadachakh optimizatsii [Alternance Method for Solving Applied Optimization Problems]. Moscow, Nauka, 2000. 336 p. (In Russian).
11. *Rapoport E.Ya., Pleshivtseva Yu.E.* Algoritmicheskiy tochnyy metod parametricheskoy optimizatsii v kraevykh zadachakh optimal'nogo upravleniya sistemami s raspredelennymi parametrami [Algorithmically accurate method of parametric optimization in boundary value problems of optimal control of systems with distributed parameters] // Avtomatizatsiya, 2009. vol. 45. no. 5. P. 103–112 (In Russian).
12. *Dyakov V.P.* MATLAB. Polnuy samouchitel' [MATLAB.Full tutorial]. Moscow, DMK Press, 2012. 768 p. (In Russian).
13. *Potemkin V.G.* Vvedenie v Matlab [Introduction to Matlab]. Moscow, Softline Co, 2001. <http://matlab.exponenta.ru/ml/book1/index.php> (accessed March 02, 2019).
14. *Optimization Toolbox 2.2 Rukovodstvo pol'zovatelya* [Optimization Toolbox 2.2 User manual] http://matlab.exponenta.ru/optimiz/book_1/ (accessed March 02, 2019).
15. *MATLAB.Exponenta* Vvedenie v sovremennyye metody optimizatsii sistem upravleniya [Introduction to modern methods of control systems optimization]. <http://matlab.exponenta.ru/optimrobast/book1/index.php> (accessed February 10, 2019).

УДК 681.51

**АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ИДЕНТИФИКАТОРА
ВТОРОГО ПОРЯДКА В ЗАМКНУТЫХ СИСТЕМАХ
ОПТИМАЛЬНОГО ПО БЫСТРОДЕЙСТВИЮ УПРАВЛЕНИЯ
НЕПОЛНОСТЬЮ ОПРЕДЕЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ
С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ***

И.С. Левин

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

E-mail: levin_ilja@yahoo.com

Аннотация. Работа посвящена одной из наиболее сложных и актуальных проблем в современной теории управления – задаче поиска оптимальных алгоритмов управления, действующих в условиях неполной информации о параметрах объекта. Рассматривается задача синтеза оптимальной по быстродействию системы управления процессом индукционного нагрева металлических полуфабрикатов цилиндрической формы перед обработкой давлением в характерных условиях интервальной неопределенности значений начальной температуры и уровня тепловых потерь. Решение указанной задачи приводит к замкнутому оптимальному алгоритму управления, дополненному, в начале, идентификатором первого порядка в форме линейной зависимости неопределенных величин объекта и параметров обратных связей от результатов всегда неполного наблюдения за температурами в выбранных точках заготовки. Выполняется анализ необходимости повышения порядка идентификатора до второго, в ходе которого выявляется нелинейный характер зависимостей параметров обратной связи от уровня тепловых потерь. Представлена структура замкнутой оптимальной по быстродействию системы управления процессом индукционного нагрева с идентификатором второго порядка в контуре обратной связи. По результатам моделирования замкнутых систем управления с идентификаторами первого и второго порядков производится сравнительный анализ качества оптимального уравнения.

Ключевые слова: система с распределенными параметрами, индукционный нагрев, управление в условиях интервальной неопределенности, идентификатор неопределенных величин.

Актуальной проблемой в современной теории управления является синтез оптимальных алгоритмов управления, действующих в условиях неполноты информации о значениях параметров объекта и неконтролируемых внешних возмущений.

В типичных случаях информация об неопределенных величинах задается только границами диапазона изменения их возможных значений.

Исследованию указанной проблемы посвящено множество работ, среди которых можно отметить труды Корнееко В.П., Токарева В.В., Афанасьева В.Н., Поляка Б.Т., Щербакова П.С., Рапопорта Э.Я. [1-5] и многих других.

* Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 18-08-00048 и 18-08-00565).

Левин Илья Сергеевич (к.т.н.), старший преподаватель кафедры «Автоматика и управление в технических системах».

Многократно возрастают трудности синтеза оптимальных управлений в условиях интервальной неопределенности параметров объекта применительно к объектам с распределенными параметрами. В работе [6] предлагается метод решения указанной проблемы в форме задачи синтеза замкнутых алгоритмов оптимального быстрогодействия для линейной модели объекта управления с распределенными параметрами параболического типа. К преимуществам полученного алгоритма можно отнести его безинерционность и возможность технической реализации.

В данной работе предлагается исследовать влияние повышения порядка идентификатора, предложенного в [6], на качество оптимального процесса в замкнутой системе управления объектом с распределенными параметрами применительно к передовой технологии индукционного нагрева металлических полуфабрикатов перед обработкой давлением.

Базовая модель температурного поля $Q(x, t)$ в процессе индукционного нагрева описывается в зависимости от времени t и радиальной координаты x в первом приближении линейным, неоднородным и пространственно-одномерным уравнением теплопроводности в цилиндрических координатах следующего вида [7]:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} + \frac{1}{x} \frac{\partial Q}{\partial x} \right) + \frac{1}{c\gamma} F_{b1} \left(\frac{x}{R}, v \right) u(t); \quad x \in [0, R], \quad t \in [0, T]; \quad (1)$$

с граничными условиями третьего рода [8] и равномерным распределением начальной температуры Q_0 по радиусу заготовки

$$Q(x, 0) = Q_0 = const; \quad \lambda \frac{\partial Q(R, t)}{\partial x} + \alpha Q(R, t) = \alpha Q_C(t); \quad \frac{\partial Q(0, t)}{\partial x} = 0. \quad (2)$$

В качестве сосредоточенного управляющего воздействия рассматривается удельная мощность внутреннего тепловыделения $u(t)$, на которое накладывается следующее ограничение:

$$0 \leq u(t) \leq u_{\max} \quad \forall t \in [0, T], \quad u_{\max} = \frac{P_{0\max}}{R}. \quad (3)$$

Здесь R – радиус цилиндра;

c, γ – удельная теплоемкость и плотность нагреваемого материала;

α, λ – коэффициенты конвективной теплоотдачи и теплопроводности;

$Q_C(t)$ – температура окружающей среды;

$P_{0\max}$ – максимальная поверхностная плотность мощности нагрева;

$F_{b1} \left(\frac{x}{R}, v \right)$ – функция пространственного распределения по радиусу ци-

линдра внутренних электромагнитных источников тепла, определяемая путем решения уравнений электромагнитного поля индуктора по выражению [9]:

$$F_{b1}(l, v) = v \frac{\text{ber}'^2(vl) + \text{bei}'^2(vl)}{\text{ber } v \text{ ber}' v + \text{bei } v \text{ bei}' v}; \quad l = \frac{x}{R}; \quad v = R \sqrt{2\pi\mu_a f \sigma} \quad (4)$$

где f – частота питающего индуктор тока;

σ – электропроводность нагреваемого материала;

μ_a – абсолютная магнитная проницаемость нагреваемого материала;

$\text{ber } z, \text{ bei } z, \text{ be } i' z, \text{ be } i' z$ – функции Кельвина и их первые производные.

Процесс рассматривается в наиболее характерных условиях интервальной неопределенности начальной температуры Q_0 и уровня тепловых потерь, оцениваемых по величине критерия Био $Bi = \alpha R / \lambda$:

$$y = (y_1, y_2) = (Q_0, Bi) \in Y = \left\{ y : Q_0 \in [Q_{0_{\min}}, Q_{0_{\max}}]; Bi \in [Bi_{0_{\min}}, Bi_{0_{\max}}] \right\} \quad (5)$$

Для объекта (1), (2) рассматривается задача оптимального по быстродействию управления, когда $T \rightarrow \min_{u \in U} y$, в условиях (3), (5) при заданных типичных требованиях достижения в конечный момент времени $t = T$ минимальной погрешности равномерного приближения $Q(x, y, T)$ к заданной температуре Q^* для всех возможных величин неопределенных факторов $y \in Y$

$$\max_{y \in Y} \left[\max_{x \in [0, R]} [Q(x, y, T) - Q^*] \right] \leq \varepsilon_0, \quad \varepsilon_0 > 0 \quad (6)$$

с предельно достижимой величиной точности нагрева $\varepsilon_0 = \varepsilon_{\min}^{(2)}$ в классе оптимальных двухинтервальных управляющих воздействий релейной формы для любого реализуемого значения вектора неопределенных параметров $y = \tilde{y}$ в (5) [10, 11, 12]:

$$u^*(t) = \begin{cases} u_{\max}, & t \in (0, \Delta_1); \\ 0, & t \in (\Delta_1, \Delta_1 + \Delta_2). \end{cases} \quad (7)$$

Длительности первого (Δ_1) и второго (Δ_2) интервалов в (7) постоянства оптимального программного управления могут быть найдены известным альтернативным методом [9].

Решение задачи синтеза оптимальной по быстродействию системы управления процессом индукционного нагрева в условиях интервальной неопределенности параметрических характеристик объекта (1), (2) в соответствии с методикой в [6] приводит к следующему алгоритму оптимального управления $u^*(Q_1, Q_2, y)$ с идентификацией параметрических характеристик объекта по неполному измерению состояния:

$$u^*(Q_1, Q_2, y) = \frac{u_{\max}}{2} [1 + \text{sign } h_1(Q_1, Q_2, y)]. \quad (8)$$

Технически реализуемая функция переключения $h_1(Q_1, Q_2, y)$ оптимального управления (8), представляется в форме линейной комбинации сигналов обратных связей по измеряемым температурам $Q_j(t)$ на поверхности $Q_1(t) = Q(R, t)$ и в центре $Q_2(t) = Q(0, t)$ нагреваемого изделия [9]:

$$h_1(Q_1, Q_2, y) = \sum_{i=1}^2 \rho_i(y) (Q_i^T(y) - Q_i(t)), \quad (9)$$

где $\rho_i(y)$ и $Q_i^T(y), i = 1, 2$ – идентифицируемые значения коэффициентов обратных связей и заданных конечных температурных состояний, определяемые согласно следующим зависимостям:

$$\rho_i(y) = \rho_i(y_H) + \sum_{j=1}^2 \gamma_{ij} (Q_j(t^0) - Q_{jH}); \quad i = 1, 2; \quad (10)$$

$$Q_i^T(y) = Q_i^T(y_H) + \sum_{j=1}^2 \gamma_{ij}^* (Q_j(t^0) - Q_{jH}); \quad i = 1, 2; \quad (11)$$

Здесь $Q_i^T(y_H) = Q^* - \varepsilon_{\min}^{(2)}, i = 1, 2$ – результирующие значения температур на поверхности и в центре нагреваемого изделия в конце оптимального процесса, рассчитанные в точке $y_H = (Q_{0H}, Bi_H)$; $\rho_i(y_H)$ – нетривиальные решения однородной системы линейных уравнений

$$\sum_{j=1}^2 \rho_j(y_H) (Q_j^T(y_H) - Q_j(\tilde{t}_1)) = 0, \quad (12)$$

рассчитанные при $y_H = (Q_{0H}, Bi_H)$, \tilde{t}_1 – расчетный момент времени переключения оптимальной программы $u^*(t)$.

Коэффициенты обратных связей (10) и заданные конечные температурные состояния (11) зависят от наблюдаемых в точках $x_1 = R$ и $x_2 = 0$ при реализуемых значениях неопределенных параметров \tilde{y} значений температур $Q_j(t^0), j = 1, 2$ в заранее фиксируемые на протяжении первого (Δ_1) интервала постоянства управления моменты времени t^0 при $u(t) = u_{\max}$. Выражение для расчета $Q_{jH} = Q_j(t^0), j = 1, 2$ может быть определено по известным решениям краевой задачи (1), (2) [9,10]:

$$Q_j(t^0) = Q_0 + \frac{u_{\max} R^2}{\lambda} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \bar{F}_{b1n}(\eta_n, v) \eta_n^2 J_0 \left(\eta_n \frac{x_j}{R} \right)}{(\eta_n^2 + Bi_H^2) J_0^2(\eta_n)} (1 - e^{-\mu_n^2 t^0}). \quad (13)$$

Здесь $\bar{F}_{b1n}(\eta_n, v) = \int_0^R F_{b1}(\frac{x}{R}, v) J_0(\eta_n \frac{x}{R}) \frac{x}{R} dx, n = 1, 2, \dots$ – моды функции (4),

$J_0(\eta_n \frac{x}{R})$ - функция Бесселя нулевого порядка; $\eta_n, n = 1, 2, \dots$ – бесконечно возрастающая последовательность корней уравнения $Bi J_0(\eta) - \eta J_1(\eta) = 0$.

Параметры идентификатора $\gamma_{ij}, \gamma_{ij}^*$ в (10), (11) рассчитаны по предложенной в [6] методике:

$$\gamma_{ij}^* = \sum_{m=1}^2 \alpha_{mj} \beta_{mi}^*; \gamma_{ij} = \sum_{m=1}^2 \alpha_{mj} \beta_{mi}. \quad (14)$$

Коэффициенты $\alpha_{mj}, m = j = 1, 2$ линейных приближений алгоритма идентификации (идентификатор первого порядка) в реальном масштабе времени

$$\begin{aligned} y_m &= y_{mH} + \sum_{j=1}^2 \alpha_{mj} (Q_j(t^0) - Q_{jH}), \alpha_{mj} = \left(\frac{\partial y_m}{\partial Q_j} \right)_{y=y_H}, \\ \rho_i(y) &= \rho_i(y_H) + \sum_{m=1}^2 \beta_{mi} (y_m - y_{mH}), \beta_{mi} = \left(\frac{\partial \rho_i}{\partial y_m} \right)_{y=y_H}, \\ Q_i^T(y) &= Q_i^T(y_H) + \sum_{m=1}^2 \beta_{mi}^* (y_m - y_{mH}), \beta_{mi}^* = \left(\frac{\partial Q_i^T}{\partial y_m} \right)_{y=y_H}, m = i = 1, 2 \end{aligned} \quad (15)$$

найлены по правилам дифференцирования неявно заданных функций [13] (13) в точке $y_H = (Q_{0H}, Bi_H)$:

$$\alpha_{11} = \frac{\frac{\partial Q_2}{\partial Bi}}{\frac{\partial Q_2}{\partial Bi} - \frac{\partial Q_1}{\partial Bi}}; \alpha_{12} = \frac{\frac{\partial Q_1}{\partial Bi}}{\frac{\partial Q_2}{\partial Bi} - \frac{\partial Q_1}{\partial Bi}}; \alpha_{21} = -\alpha_{22} = -\frac{1}{\frac{\partial Q_2}{\partial Bi} - \frac{\partial Q_1}{\partial Bi}}. \quad (16)$$

Коэффициенты $\beta_{mi}, \beta_{mi}^*, m = i = 1, 2$ в (14) могут быть определены с удовлетворительной точностью приближенно по следующим выражениям:

$$\beta_{1i} \cong \frac{\Delta \rho_i}{\Delta Q_0}; \beta_{2i} \cong \frac{\Delta \rho_i}{\Delta Bi}; \beta_{1i}^* \cong \frac{\Delta Q_i^T}{\Delta Q_0}; \beta_{2i}^* \cong \frac{\Delta Q_i^T}{\Delta Bi}. \quad (17)$$

В качестве исходных номинальных данных объекта (1), (2), отвечающих процессу индукционного нагрева цилиндрических слитков из титановых сплавов перед последующей операцией горячего прессования [10, 11], приняты следующие значения:

$$\begin{aligned} \lambda &= 14 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{С}}, a = 4.34 \cdot 10^{-6} \frac{\text{М}^2}{\text{с}}, v = 4, Bi = Bi_H = 0.7, Q_0 = Q_{0H} = 30 \text{ }^\circ\text{С}, \\ Q^* &= 1050 \text{ }^\circ\text{С}, R = 0.27 \text{ м}, P_{0max} = 106 \cdot 10^3 \frac{\text{кВт}}{\text{м}^2}. \end{aligned} \quad (18)$$

Для них получены следующие значения параметров идентификатора (14) и функции переключения оптимального регулятора (9) при $t^0 = 300$ сек.:

$$\begin{aligned} \alpha_{11} &= -0.19; \alpha_{12} = 1.19; \alpha_{21} = -0.06; \alpha_{22} = 0.06; \beta_{11} = \beta_{21} = 0; \beta_{12} = -0.002; \beta_{22} = 3.11; \\ \beta_{11}^* &= \beta_{12}^* = 0.04; \beta_{21}^* = \beta_{22}^* = -49.38; \gamma_{11} = \gamma_{12} = 0; \gamma_{21} = -0.18; \gamma_{22} = 0.18; \gamma_{11}^* = \gamma_{21}^* = 2.95; \\ \gamma_{12}^* &= \gamma_{22}^* = -2.95; \rho_1 = 1; \rho_2 = \rho_{2H} = 1.796; Q_1^T = Q_2^T = Q_H^T = 997.9 \text{ }^\circ\text{С}. \end{aligned} \quad (19)$$

Результаты, полученные в [6], и анализ, проведенный в [14], показывают, что система управления с идентификатором первого порядка обеспечивает достаточно малую ошибку в области номинальной точки (выигрыш до 40 % по точности приближения к требуемому конечному температурному состоянию по сравнению с программным управлением по принципу гарантированного результата в

условиях интервальной неопределенности характеристик объекта), которая, однако, растет по мере удаления от этой точки. Идентификатор второго порядка, при котором функциональные зависимости в (15) восстанавливаются в форме разложения в ряд Тейлора второго порядка, позволит повысить точность для более существенных отклонений от номинальных параметров. В [6] приводятся аналитические выражения для вычисления коэффициентов перед квадратичной составляющей. Однако ввиду сложности процесса получения указанных аналитических выражений и в целях проведения предварительного анализа полученных результатов далее приводится упрощенная процедура получения коэффициентов при членах ряда второго порядка.

В соответствии с вышесказанным, выражения (15) для идентификатора второго порядка примут вид:

$$y_m = y_{mH} + \sum_{j=1}^2 \alpha_{mj} (\varrho_j(t^0) - \varrho_{jH}) + \sum_{j=1}^2 \alpha_{mj}^{(2)} (\varrho_j(t^0) - \varrho_{jH})^2, m = 1, 2; \quad (20)$$

$$\rho_i(y) = \rho_i(y_H) + \sum_{m=1}^2 \beta_{mi} (y_m - y_{mH}) + \sum_{m=1}^2 \beta_{mi}^{(2)} (y_m - y_{mH})^2; \quad (21)$$

$$\varrho_i^T(y) = \varrho_i^T(y_H) + \sum_{m=1}^2 \beta_{mi}^* (y_m - y_{mH}) + \sum_{m=1}^2 \beta_{mi}^{**} (y_m - y_{mH})^2, m = i = 1, 2.$$

Для определения коэффициентов $\alpha_{mj}^{(2)}, \beta_{mi}^{(2)}, \beta_{mi}^{**}$ исследуем зависимости наблюдаемых температур $\varrho_j(t^0), j = 1, 2$ в фиксированный момент времени $t^0 = 300$ сек., а также коэффициентов обратной связи $\rho_2(y)$ в (10) (при зафиксированном значении $\rho_1 = 1$) и заданных значений температурных состояний $\varrho_i^T(y), i = 1, 2$ в (11) от неопределенных параметров $y = (\varrho_0, Bi)$ в (5). В качестве интервалов изменения неопределенных параметров приняты следующие значения:

$$\varrho_0 \in [1.5, 58.5], Bi \in [0.035, 1.365] \quad (22)$$

Расчеты производились по формулам (10)-(13) для каждого из возможных значений неопределенных параметров $y = (\varrho_0, Bi)$ в пределах заданных интервалов (21).

На рис. 1 показаны проекции пространственной кривой отклонений оценок значений неопределенных параметров y от их номинальных значений $y_H = (\varrho_{0H}, Bi_H)$, значения которых даны ранее в (18), в зависимости от отклонений наблюдаемых температур $\varrho_j(t^0) - \varrho_{jH}, j = 1, 2$, где $\varrho_{1H} = 165$ °C, $\varrho_{2H} = 33$ °C для принятых исходных данных. Рис. 2 отражает зависимости отклонений параметров функции переключения (9)-(11) от отклонений неопределенных параметров (5), (15).

Как видно из графиков, линейная аппроксимация зависимости неопределенных параметров y от наблюдаемых температур $\varrho_j(t^0), j = 1, 2$ (штриховые линии на рис. 1), а также зависимости параметров функции переключения (10), (11) от изменения начальной температуры ϱ_0 (линии на графиках *в, з* рис. 2) достаточна

для получения удовлетворительных значений этих параметров и, таким образом, коэффициенты $\alpha_{mj}^{(2)}, \beta_{1i}^{(2)}, \beta_{1i}^{**}, m = i = j = 1, 2$ могут быть приняты равными 0.

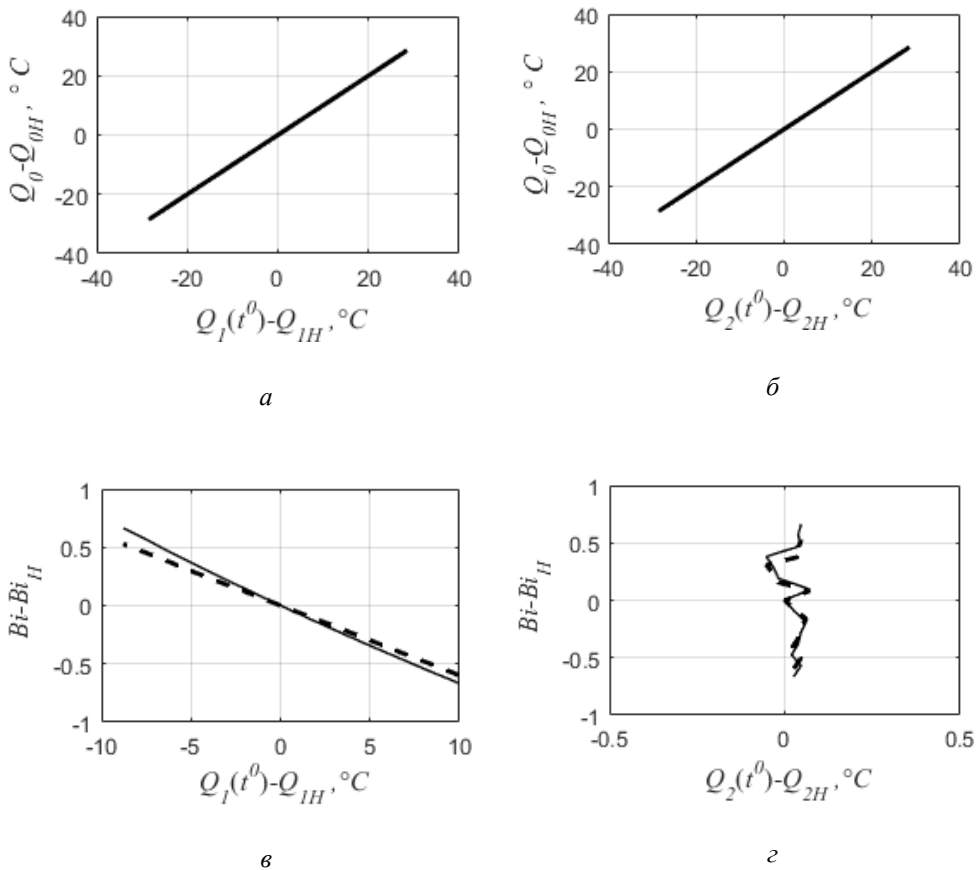


Рис. 1. Зависимости (сплошные линии) и их аппроксимации (штриховые линии) вида (15) отклонений неопределенных параметров $\Delta y_1 = Q_0 - Q_{0H}$, $Q_{0H} = 30^\circ C$ (а, б) и $\Delta y_2 = Bi - Bi_H$, $Bi_H = 0.7$ (в, г) от отклонений наблюдаемых температур на поверхности

$$Q_1(t^0) = Q(R, t^0) \text{ и в центре } Q_2(t^0) = Q(0, t^0) \text{ заготовки.}$$

В целях аппроксимации ярко выраженной нелинейной зависимости коэффициента обратной связи ρ_2 и температуры в конце оптимального процесса $Q^T(y) = Q_i^T(y) = Q^* - \varepsilon_{\min}^{(2)}, i = 1, 2$ от изменения значения критерия Био $Bi(y)$ (см. рис. 2а, б) выполним необходимые расчеты для получения коэффициентов $\beta_{22}^{(2)}, \beta_{2i}^{**}, i = 1, 2$. Для этого выберем произвольную точку на графике (сплошная линия на рис. 2а, б), для которой известны значения параметров функции переключения $\rho_2(y)$, $Q^T(y)$ и, с учетом значений ранее полученных коэффициентов линейных аппроксимаций (19), из выражений (21) рассчитываем значения коэффициентов второго порядка:

$$\beta_{21}^{(2)} = 0; \beta_{22}^{(2)} = \frac{(\rho_2 - \rho_{2H}) - \beta_{mi}(Bi - Bi_H)}{(Bi - Bi_H)^2} = \frac{-0.7 - 3.11(-0.39)}{(-0.39)^2} \approx 3.11; \quad (23)$$

$$\beta_{21}^{**} = \beta_{22}^{**} = \frac{(Q^T - Q_H^T) - \beta_{22}^*(Bi - Bi_H)}{(Bi - Bi_H)^2} = \frac{27.72 + 49.38(-0.39)}{(-0.39)^2} \approx 50.41.$$

Здесь $\beta_{21}^{(2)} = 0$, т.к. коэффициент обратной связи ρ_l зафиксирован и равен 1.

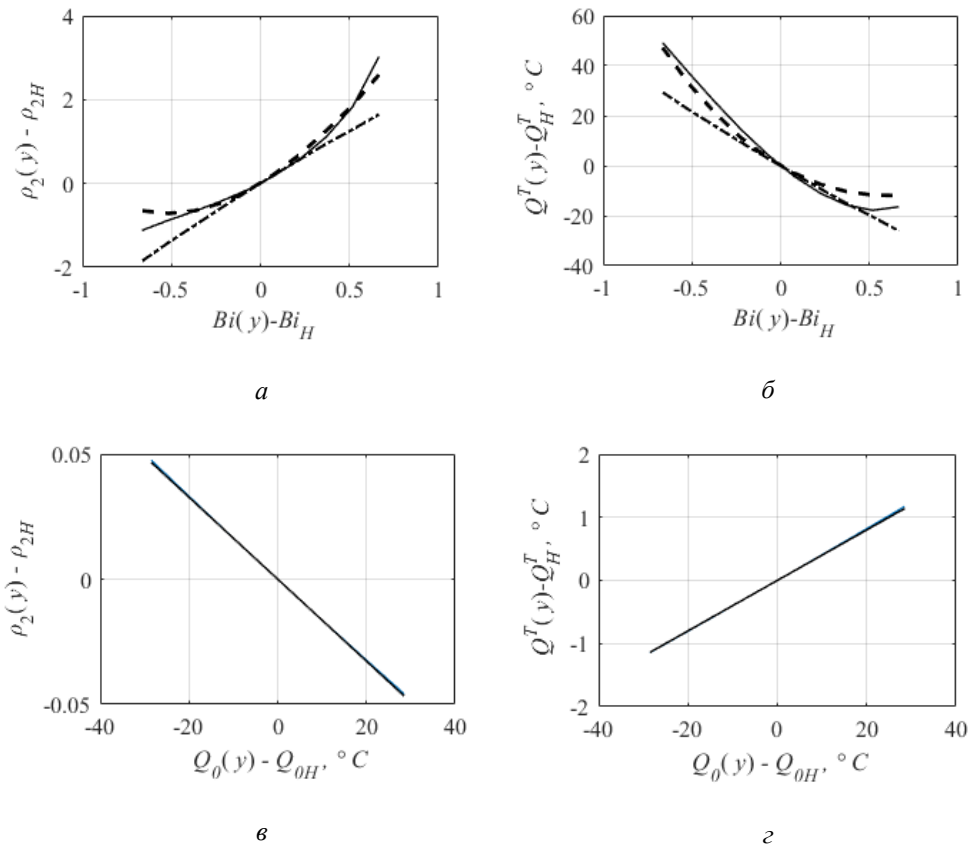


Рис. 2. Зависимость отклонений коэффициента обратной связи $\rho_2(y) - \rho_{2H}$ (а, в) и температуры в конце оптимального процесса в центре $Q^T(y) = Q_2^T(y)$ и на поверхности $Q^T(y) = Q_1^T(y)$ заготовки (б, г) от отклонений неопределенного параметров – критерия Био $Bi - Bi_H$ и начальной температуры $Q_0(y) - Q_{0H}$ соответственно, а также линейные (штрихпунктирные линии) и квадратичные (штриховые линии) аппроксимации этой зависимости.

Аппроксимация квадратичной зависимостью параметров $\rho_2(y)$, $Q^T(y)$ функции переключения (9) по выражениям в (21) показана на графиках а и б рисунка 2 штриховой линией.

Было произведено моделирование замкнутой системы управления объектом (1), (2), реализующей алгоритм оптимального по быстродействию управления (8) с идентификатором неопределенных величин второго порядка (20), (21) (структурная схема системы показана на рис. 3) в соответствии с методикой в [15] и выполнен сравнительный анализ [14]. В результате были получены данные, позволяющие оценить качество управления (см. рис. 4).

Сопоставление результирующих распределений температур на рис. 3 свидетельствуют о достаточно точном приближении оптимального процесса в замкнутом контуре с идентификатором второго порядка (20), (21) в широком диапазоне (22) изменения значения Q_0, B_i к детерминированному оптимальному программному алгоритму управления (7), полученному в условиях полной информации об объекте при соответствующих заранее фиксируемых значениях $B_i \in \{0.33, 1.22\}$ и $Q_0 = Q_{0H}$, по сравнению с оптимальным процессом в замкнутом контуре с линейной идентификацией неопределенных параметров (15).

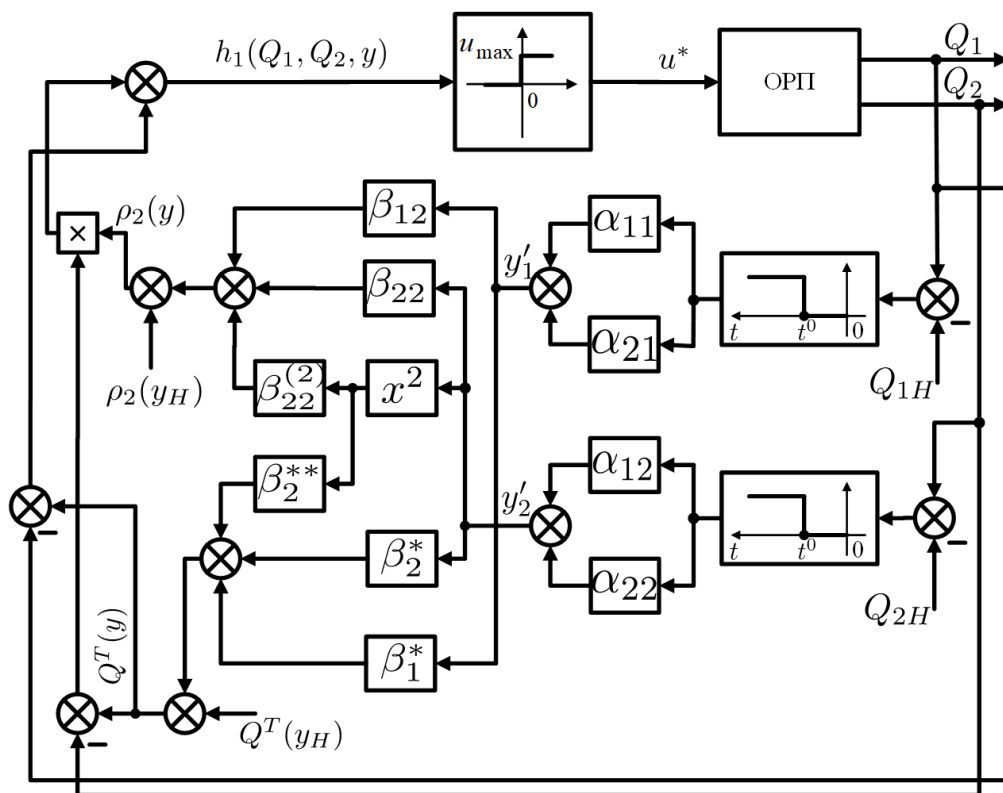


Рис. 3. Структурная схема замкнутой системы оптимального по быстродействию управления процессом индукционного нагрева с идентификатором параметров объекта второго порядка при $\varepsilon_0 = \varepsilon_{\min}^{(2)}$: $y'_1 = Q_0 - Q_{0H}$; $y'_2 = B_i - B_{iH}$.

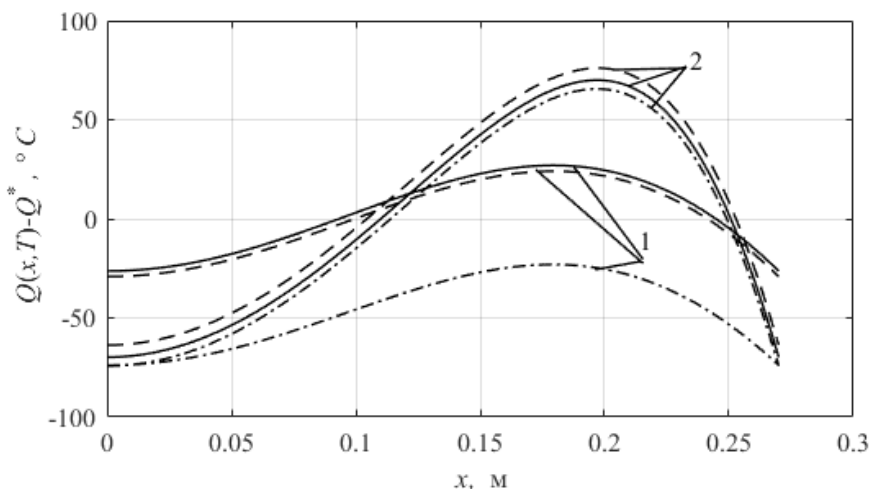


Рис. 4. Результирующее распределение температур $Q(x, T) - Q^*$ по радиусу слитка при $\varepsilon_0 = \varepsilon_{\min}^{(2)}$ в оптимальном по быстродействию процессе с двухинтервальным управлением $u^*(t)$ (сплошные линии) и в системе оптимального по быстродействию управления процессом индукционного нагрева для не полностью определенных моделей ОРП с идентификатором второго порядка (штриховая линия) и первого порядка (штрихпунктирная линия) при $Q_0 = Q_H$: 1- $Bi = 0.33$, 2 - $Bi = 1.22$.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что в замкнутой системе управления с идентификатором второго порядка достигается существенный выигрыш по точности (в 3 раза по сравнению с линейным идентификатором) достижения желаемых оптимальных значений параметров при граничных значениях неопределенных параметров, существенно удаленных от номинальной точки (до 60% по сравнению с номинальным значением критерия Био Bi).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Корнеев В.П. Методы оптимизации. – М.: Высшая школа, 2007. – 664 с.
2. Токарев В.В., Методы оптимальных решений, Т. 2. Многокритериальность. Динамика. Неопределенность. – М.: Физматлит, 2011. – 416 с.
3. Афанасьев В.Н. Управление неопределенными динамическими объектами. – М.: Физматлит, 2008. – 208 с.
4. Поляк Б.Т., Шербаков П.С. Робастная устойчивость и управление. – М.: Наука, 2002. – 303 с.
5. Рапопорт Э.Я. Робастная параметрическая оптимизация динамических систем в условиях ограниченной неопределенности // Автоматика и телемеханика. 1995. № 3. С. 86-96
6. Рапопорт Э.Я., Левин И.С. Структурно-параметрический синтез оптимальных по быстродействию систем управления с распределенными параметрами в условиях интервальной неопределенности характеристик объекта // Автоматика. 2015. Т. 51, № 5. С. 3-16
7. Рапопорт Э.Я. Структурное моделирование объектов и систем с распределенными параметрами. – М.: Высш. шк., 2003 – 299 с.
8. Карташов Э.М., Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел. – М.: Высшая школа, 2001. – 550 с.
9. Рапопорт Э.Я. Оптимальное управление системами с распределенными параметрами – М.: Высшая школа, 2009. – 677 с.
10. Рапопорт Э.Я. Оптимизация процессов индукционного нагрева металла – М.: Metallurgia, 1993. – 279 с.

11. Рапопорт Э.Я., Плешивецкая Ю.Э. Оптимальное управление температурными режимами индукционного нагрева – М.: Наука, 2012. – 309 с.
12. Плешивецкая Ю.Э., Рапопорт Э.Я. Метод последовательной параметризации управляющих воздействий в краевых задачах оптимального управления системами с распределенными параметрами // Известия РАН. Теория и системы управления. 2009. № 3. С. 22-33.
13. Фихтенгольц Г.М. Курс дифференциального и интегрального исчисления. – М.: Физматгиз, 1962. – Т. 1 – 607 с.
14. Левин И.С. Анализ эффективности работы замкнутых систем управления объектами с распределенными параметрами в условиях интервальных неопределенностей параметров объекта // Вестник Самарского государственного технического университета. 2018. № 2 (58). С. 26-35.
15. Левин И.С. Моделирование оптимальной по быстродействию системы управления процессом индукционного нагрева в условиях интервальной неопределенности характеристик объекта // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. 2013. №3 (39). С. 167-174.

Статья поступила в редакцию 2 апреля 2019 г.

EFFICIENCY ANALYSIS OF THE SECOND-ORDER IDENTIFIER APPLICATION IN CLOSED LOOP TIME-OPTIMAL CONTROL SYSTEMS FOR DISTRIBUTED PARAMETER OBJECTS WITH INCOMPLETE INFORMATION ABOUT THE PLANT CHARACTERISTICS

I.S. Levin

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

E-mail: levin_ilja@yahoo.com

Abstract. *This paper devoted to one of the most complicated current problem of the modern control theory which is the problem of searching such an optimal control that operates under conditions of incomplete information about the plant characteristics. The statement of a time-optimal control problem is given. The solution of synthesis of optimal control closed-loop system of the induction heating process of cylindrical billets before forging was found. It was found under representative conditions of interval uncertainty of the initial temperature and heat losses values that were considered as the uncertain parameters of the process. An obtained time-optimal control algorithm with feedback was completed initially with a first-order identifier. It is given as a linear function where the uncertain parameters and the feedback coefficients are depends upon the values of measured temperatures at selected points on the billet. The necessity of a second-order identifier were proposed and analyzed. As one of the results of analysis procedure a non-linear correlation between the feedback coefficients and the convection surface heat transfer coefficient was found. The structure of the time-optimal control system for the obtained control algorithm with feedback and the second order identifier was proposed. After the procedure of modeling the obtained closed-loop control systems with first-order identifier and second-order identifier the results have been compared and it was shown that the control system with the identifier of second order provides a much more accurate temperature distribution at the end of time-optimal process that is closer to a deterministic one with complete information about the process parameters.*

Ilia S. Levin (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.

Keywords: *distributed parameter system, induction heating, control with interval uncertainty of the plant characteristics, identifier of uncertain characteristics.*

REFERENCES

1. *Korneyenko V.P.* Metody optimizatsii [Optimization methods]. Moscow, Vysshaya shkola, 2007. 664 pp. (In Russian)
2. *Tokarev V.V.* Metody optimal'nykh resheniy, T. 2. Mnogokriterial'nost'. Dinamika. Neopredelennost' [Optimal solution methods. Vol. 2. Multicriteriality. Dynamic. Uncertainty]. Moscow, Fizmatlit, 2011. 416 pp. (In Russian)
3. *Afanasyev V.N.* Upravleniye neopredelennymi dinamicheskimi ob'yektami [Control of uncertain dynamic objects]. Moscow, Fizmatlit, 2008. 208 pp. (In Russian)
4. *Polyak B.T., SHCHerbakov P.S.* Robastnaya ustoychivost' i upravleniye [Robust stability and control]. Moscow, Nauka, 2002. 303 pp. (In Russian)
5. *Raport E.YA.* Robastnaya parametricheskaya optimizatsiya dinamicheskikh sistem v usloviyakh ogranichennoy neopredelennosti // Avtomatika i telemekhanika. 1995. Vol. 3. Pp. 86-96 (In Russian)
6. *Raport E.YA., Levin I.S.* Strukturno-parametricheskiiy sintez optimal'nykh po bystrodeystviyu sistem upravleniya s raspredelennymi parametrami v usloviyakh interval'noy neopredelennosti kharakteristik ob'yekta // Avtometriya. 2015. Vol. 51, no. 5. Pp. 3-16 (In Russian)
7. *Raport E.YA.* Strukturnoye modelirovaniye ob'yektov i sistem s raspredelennymi parametrami [Structural modeling of objects with distributed parameters]. Moscow, Vyssh. shk., 2003. 299 pp. (In Russian)
8. *Kartashov E.M.*, Analiticheskiye metody v teorii teploprovodnosti tverdykh tel [Analytical methods of heat conduction theory]. Moscow, Vyssh. shk., 2001. 550 pp. (In Russian)
9. *Raport E.YA.* Optimal'noye upravleniye sistemami s raspredelennymi parametrami [Optimal control of distributed parameter systems]. Moscow, Vysshaya shkola, 2009. 677 pp. (In Russian)
10. *Raport E.YA.* Optimizatsiya protsessov induktsionnogo nagreva metalla [Optimization of induction heating processes]. Moscow, Metallurgiya, 1993. 279 pp. (In Russian)
11. *Raport E.YA., Pleshivtseva YU.E.* Optimal'noye upravleniye temperaturnymi rezhimami induktsionnogo nagreva [Optimal control of induction heating process]. Moscow, Nauka, 2012. 309 pp. (In Russian)
12. *Pleshivtseva YU.E., Raport E.YA.* Metod posledovatel'noy parametrizatsii upravlyayushchikh vozdeystviy v krayevykh zadachakh optimal'nogo upravleniya sistemami s raspredelennymi parametrami // Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya, 2009. No. 3. Pp. 22-33 (In Russian)
13. *Fikhtengol'ts G.M.* Kurs differentsial'nogo i integral'nogo ischisleniya. Vol. 1 [Course of differential and integral calculus] – M.: Fizmatgiz, 1962. 607 pp. (In Russian)
14. *Levin I.S.* Analiz effektivnosti raboty zamknutykh sistem upravleniya ob'yektami s raspredelennymi parametrami v usloviyakh interval'nykh neopredelennostey parametrov ob'yekta // Vestnik Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2018. No. 2 (58). Pp. 26-35 (In Russian)
15. *Levin I.S.* Modelirovaniye optimal'noy po bystrodeystviyu sistemy upravleniya protsessom induktsionnogo nagreva v usloviyakh interval'noy neopredelennosti kharakteristik ob'yekta // Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Ser. Tekhnicheskoye nauki. 2013. No. 3 (39). Pp. 167-174 (In Russian)

УДК 681.5

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА НАЛОЖЕНИЯ ХИМИЧЕСКИ ВСПЕНЕННОЙ ИЗОЛЯЦИИ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ПРОВОДНЫХ КАБЕЛЕЙ СВЯЗИ ВЫСОКОЙ РЕГУЛЯРНОСТИ*

В.Н. Митрошин, Д.И. Кулешова, Я.В. Колесникова

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

Аннотация. *Предложена методика управления наложением химически вспененной изоляции при изготовлении высокочастотных проводных кабелей связи высокой регулярности, обеспечивающая достижение требуемых характеристик выпускаемой продукции. Сформулированы основные задачи, решаемые при автоматизации технологического процесса наложения химически вспененной изоляции на экструзионных линиях. Разработаны системы стабилизации давления в формирующем инструменте экструдера и стабилизации температуры расплава полимера в зоне дозирования экструдера. Проведенный с использованием компьютерного моделирования анализ работы систем стабилизации режимных параметров технологического оборудования доказал их высокую эффективность.*

Ключевые слова: *кабели связи, вспененная изоляция, экструзионные линии, автоматизация.*

В качестве передающих физических сред в структурированных кабельных системах (СКС) чаще всего используются проводные кабели – радиочастотные коаксиальные кабели (RG – Radio Guide) и LAN-кабели (Local Area Network Cable – кабели локальной сети передачи данных) на основе витых пар (TP – twisted pair), а также волоконно-оптические линии связи [1].

Верхняя частота полосы пропускания радиочастотных коаксиальных кабелей (КК) достигает значений от 100 до 500 МГц [2, 3]. Коаксиальный кабель высокой регулярности с полосой пропускания 500 МГц может обеспечить скорость передачи данных несколько Гбит/с. При этом предельное расстояние, на котором может быть применен кабель, не превышает 10–15 км.

При использовании LAN-кабелей для построения СКС передачи данных чаще всего применяют кабели категорий 5е, 6 и 7 [4].

Скорость передачи данных и верхняя частота полосы пропускания у LAN-кабелей различных категорий следующие:

- пятая категория – скорость до 100 Мбит/с при применении двух витых пар; частота – до 100 МГц;
- шестая категория – скорость до 1 Гбит/с при применении четырех пар; частота – до 200/250 МГц;

* Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (проект 18-08-00506-а).

Митрошин Владимир Николаевич (д.т.н.), зав. кафедрой «Автоматика и управление в технических системах».

Кулешова Дарья Игоревна, аспирантка.

Колесникова Яна Валентиновна, студентка.

- седьмая категория – скорость до 10 Гбит/с и более при употреблении четырех пар; частота – до 600 МГц (и даже до 1 ГГц).

В отношении проводных кабелей, используемых в качестве передающих сред в структурированных кабельных системах, предъявляются жесткие требования к регулярности первичных и вторичных параметров качества, определяющих эксплуатационные характеристики кабелей и применимость кабелей для передачи электромагнитных сигналов в требуемом частотном диапазоне.

Эксплуатационный показатель качества изготавливаемого кабеля формируется на всех стадиях его производства и может быть измерен лишь на готовом изделии. А технологический процесс изготовления проводных кабелей представляет собой сложный непрерывный многооперационный процесс, важнейшей стадией которого является операция наложения на токопроводящую жилу полимерной изоляции [5], выполняемая на шнековых прессах методом экструзии [6, 7].

При этом на любом этапе изготовления продукции в соответствии со стандартом системы управления качеством ИСО-9001 требуется обеспечивать «прозрачность» качественных показателей производимого кабеля и прогнозируемость его эксплуатационных свойств.

Обычно на операции изолирования с помощью датчиков непосредственно измеряют первичные параметры качества кабеля – диаметр и погонную емкость изолированной жилы. Измерение осуществляется на полностью сформировавшейся изоляции – на выходе последней ванны охлаждения.

При изолировании медных жил проводных кабелей на экструзионных линиях осуществляется наложение как сплошной полимерной изоляции, так и вспененной. Вспененная изоляция накладывается методами химического [8, 9] и физического вспенивания [10]. Вспенивание изоляции улучшает ее диэлектрические свойства и дает значительную экономию полимера.

Технологический процесс наложения физически вспененной изоляции более стабилен и позволяет получить при применении соответствующих материалов (фторопластов) высокий показатель степени пористости изоляции (до 70 % и более) по сравнению с химическим вспениванием (при котором достигается степень пористости порядка 50 %).

При физическом вспенивании формируется skin-foam-skin изоляция, когда на медный проводник накладываются последовательно три слоя термопластичного полимера: сплошной, физически вспененный полимер, а сверху опять сплошной слой. Наложение пористой изоляции методом физического вспенивания осуществляется путем непосредственного введения в зону дозирования экструдера сжатого газа – азота. Кабели с физически вспененной изоляцией имеют лучшие характеристики, чем кабели с химически вспененной изоляцией и тем более со сплошной. В частности у них существенно меньшее затухание. Но экструзионное оборудование при этом намного более сложное и дорогое.

Важным достоинством метода химического вспенивания является простота его реализации и возможность на одном и том же технологическом оборудовании осуществлять наложение как сплошной, так и химически вспененной изоляции.

Изолирование медной жилы осуществляется на экструзионной линии, содержащей шнековый экструдер. Загружаемый в бункер экструдера гранулированный полиэтилен содержит специальную добавку – порофор, который разлагается от воздействия температуры с выделением большого объема газа. Плавление гранул в экструдере происходит как под действием подводимого тепла от

внешних нагревателей, так и вследствие диссипации энергии, образуемой за счет вязкого трения перерабатываемого полимера. Выделяемый при разложении порофора газ внутри экструдера находится в растворенном состоянии в расплаве пластмассы. В головке экструдера расплавленная масса полиэтилена выдавливается через кольцевой зазор на проходящую через головку медную жилу. При выходе из экструдера растворенный в расплаве газ интенсивно расширяется, образуя ячеистую структуру. Затем изолированная жила последовательно охлаждается в нескольких (обычно трех) водяных ваннах с постепенно понижающейся температурой воды.

Контроль качества наложения химически вспененной изоляции происходит на основе прямого измерения первичных параметров изолированной жилы кабеля: ее диаметра и погонной емкости с помощью соответствующих датчиков, установленных в конце ванн охлаждения. Управление технологическим процессом изолирования осуществляется с использованием систем управления по отклонению измеренных первичных параметров кабеля от своих номинальных значений [8, 9].

При наложении химически вспененной изоляции объект управления – шнековый экструдер является сложным многомерным и многосвязным объектом с распределенными параметрами [5, 11÷13]. Вследствие многосвязности ОУ для исключения взаимовлияния отдельных контуров регулирования друг на друга чаще всего используются структуры САУ с развязывающими звеньями [12, 13].

В [11] описана САУ, в которой управление многосвязным ОУ осуществляется по физически несвязанным величинам – отклонениям от своих номинальных значений относительной диэлектрической проницаемости пористой изоляции $\Delta \varepsilon_{\text{пн}}$ и массе изоляции на единицу длины медного проводника $\Delta m_{\text{и}}$, косвенно рассчитываемым по непосредственно измеряемым первичным параметрам кабеля.

При синтезе САУ температурой расплава полимера в зоне дозирования экструдера нельзя не учитывать явно выраженную неравномерность пространственной зависимости (распределенности) управляемой величины [11], т.е. ОУ должен рассматриваться как объект с распределенными параметрами.

Основным недостатком рассматриваемых систем является их непригодность для управления процессом наложения химически вспененной изоляции радиочастотных кабелей высокой регулярности.

Верхняя частота рабочего диапазона кабеля f_B определяет максимальную частоту взаимодействующих с ним пространственных нерегулярностей g_{max} первичных параметров кабеля следующим образом [14]:

$$g_{\text{max}} = \frac{2 f_B}{V_e} = \frac{1}{L_{k \text{ min}}}, \quad (1)$$

где V_e – скорость распространения электромагнитной волны по кабелю. Для коаксиального кабеля она равна [15]

$$V_e = c / \sqrt{\varepsilon_{\text{пн}}}, \quad (2)$$

$L_{k \text{ min}}$ – минимальный пространственный период нерегулярностей первичных параметров кабеля, которые должны быть устранены системой регулирования; c –

скорость света в вакууме; $\varepsilon_{\text{пп}}$ – относительная диэлектрическая проницаемость изоляции.

Для современных кабелей с верхней границей полосы пропускания 600 МГц $L_{k \text{ min}} = 0,165 \text{ м}$. Отсюда легко формулируется первый вывод: для гарантийного обеспечения требуемой полосы пропускания радиочастотных кабелей высокой регулярности система управления процессом наложения химически вспененной изоляции должна устранять нерегулярности первичных параметров кабеля с минимальным пространственным периодом 0,165 м. При расположении измерителей первичных параметров кабеля на расстоянии L (порядка 15 м) от места их формирования – кабельной головки экструдера – мы будем иметь звено с большим транспортным запаздыванием. Длительность переходного процесса в подобной САУ составит в лучшем случае $(3 \div 4) \tau$, где τ – время транспортного запаздывания [16]. Соответственно

$$L_{\text{min}} = (3 \div 4) L = 45 \div 60 \text{ м}. \quad (3)$$

Т. е. САУ может в лучшем случае устранять нерегулярности формируемых на операции наложения полимерной изоляции первичных параметров кабеля с наименьшим пространственным периодом порядка 45÷60 м. В этом случае «работа» такой системы будет только ухудшать качество кабеля.

Отсюда второй вывод – для управления экструзионными линиями, на которых изготавливаются высокочастотные кабели, принципиально неприменимы САУ по отклонению непосредственно измеряемых параметров кабельной продукции.

С другой стороны, существуют проблемы при наложении химически вспененной изоляции. Они вызваны следующими причинами:

– высокая чувствительность процесса наложения химически вспененной изоляции к нестабильности режимных параметров работы технологического оборудования;

– невозможность регулировать многосвязный процесс наложения изоляции по непосредственно измеряемым на экструзионной линии первичным параметрам изолированной жилы.

Для преодоления существующих проблем управления технологическим процессом наложения химически вспененной изоляции предлагается на основе предварительного обследования автоматизируемого технологического процесса изолирования выявить основные причины его нестабильности и предложить пути существенной стабилизации режимных параметров работы технологического оборудования.

В [17] в результате обработки экспериментальных данных, снятых в режиме нормальной эксплуатации экструзионной линии NOKIA-80, на которой осуществлялось изолирование химически вспененной изоляцией токопроводящей жилы коаксиального радиочастотного кабеля РК 75-3,7-361, получена спектральная плотность мощности диаметра изолированной кабельной жилы (рис. 1).

Анализ спектральной плотности мощности диаметра изолированной жилы позволил считать доказанным наличие в автоматизируемом процессе источника гармонических возмущений с частотой $f = 0,43 \text{ Гц}$. Таким источником является вращающийся шнек экструдера линии NOKIA-80. Скорость вращения шнека экструдера при снятии экспериментальных данных (25 об/мин) в пересчете на

частоту составляла 0,42 Гц [17].

Полученные результаты хорошо согласуются с описанными в технической литературе. В [18] высказывалось предположение, что имеющиеся «высокочастотные» периодические нерегулярности диаметра изоляции обусловлены гармоническими пульсациями градиента давления расплава в кабельной головке, вызываемыми вращающимся шнеком экструдера.

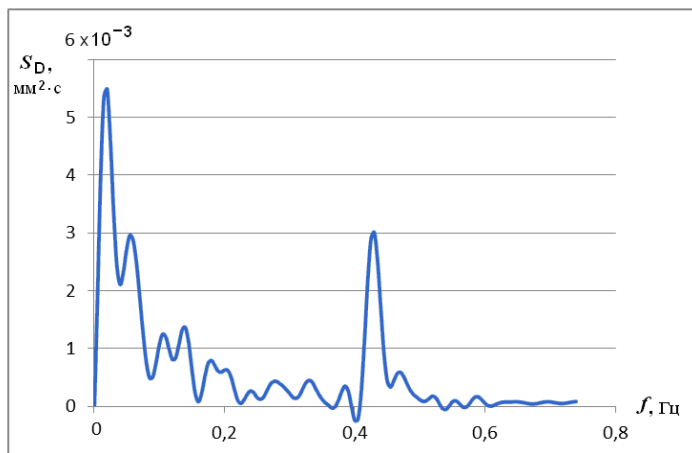


Рис. 1. Спектральная плотность мощности диаметра изолированной кабельной жилы

В [2] отмечается, что даже при соблюдении всех допусков на предельные отклонения конструктивных и электрических параметров кабеля эксплуатационные показатели качества кабельной линии и ее параметры передачи могут нарушаться. Например, это происходит при гармоническом характере изменений стабилизируемых параметров коаксиального кабеля по его длине даже при очень малых амплитудах этих изменений.

Из вышесказанного следует, что одной из настоятельных задач является максимально жесткая стабилизация давления в формирующем инструменте (кабельной головке) экструдера, т. к. давление определяет производительность экструдера, т. е. количество выдавливаемой массы полимера. В конечном счете это приводит к возникновению «высокочастотных» периодических нерегулярностей диаметра изоляции.

В [18] описывается методика нахождения относительной амплитуды пульсирующего градиента давления χ_p . Это можно сделать по измеряемым мгновенным значениям давления расплава полимера на входе и вблизи выхода рассматриваемого участка канала. По измеренным максимальным ΔP_{\max} и минимальным ΔP_{\min} значениям градиента давления амплитуда колебаний рассчитывается в соответствии с (4):

$$\chi_p = \frac{\Delta P_{\max} - \Delta P_{\min}}{\Delta P_{\max} + \Delta P_{\min}}. \quad (4)$$

С другой стороны, отличительной особенностью процесса наложения химически вспененной изоляции является его высокая чувствительность к температуре.

На рис. 2 [9] приведены графики величины разложения порофора в экструдере в зависимости от времени его пребывания там и от температуры расплава полимера.

Очень важным при разработке систем управления наложением химически вспененной изоляции является анализ процесса порообразования. Быстрое возрастание скорости разложения порофора в диапазоне 140÷180 °С является одной из причин малой степени свободы управления температурой при экструдировании. Необходимо учитывать, что степень разложения порофора нелинейно увеличивается от температуры.

В работе [19] отмечается, что допуск на температуру расплава полимера при изолировании коаксиального кабеля зонной связью до 10 МГц с изоляцией из химически вспененного полиэтилена должен составлять ± 3 °С для обеспечения требуемой пропускной способности кабеля.

При изготовлении высокочастотных кабелей высокой регулярности этот допуск должен быть кардинально уменьшен. Такова вторая задача, которая должна быть обязательно решена при автоматизации управления наложением химически вспененной изоляции при изготовлении радиочастотных кабелей высокой регулярности.

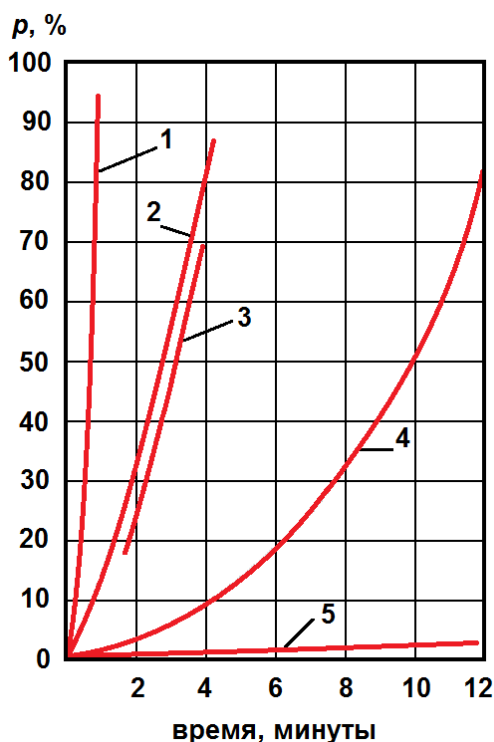


Рис. 2. Величина разложения порофора в экструдере в зависимости от времени пребывания и температуры (1 – 180 °С; 2 – 160 °С; 3 – 158 °С; 4 – 140 °С; 5 – 120 °С)

Повышение точности стабилизации температуры расплава полимера в шнековом экструдере может быть достигнуто только при учете основных физиче-

ских особенностей ОУ – пространственной распределенности управляемой величины. Зона дозирования шнека экструдера при управлении температурой расплава полимера должна рассматриваться и описываться как ОУ с распределенными параметрами (ОУРП).

Подобный подход описан в [20], а реализованная система распределенного управления температурой расплава полимера обеспечила точность ее стабилизации $\pm 0,75$ °С.

Авторами реализована двухконтурная система управления процессом наложения химически вспененной изоляции радиочастотных кабелей. Она состоит из двух независимых контуров: системы стабилизации давления расплава полимера в формующем инструменте экструдера и системы стабилизации температуры расплава полимера.

Анализ функционирования этих систем был проведен с использованием пакета Matlab/Simulink.

На рис. 3 приведена модель системы управления давлением расплава полимера в кабельной головке (в формующем инструменте) шнекового экструдера в Matlab/Simulink. В качестве датчика давления выбран первичный преобразователь давления расплава Gefran, предназначенный для измерения давления расплава полимеров, точность которого – 0,25 %.

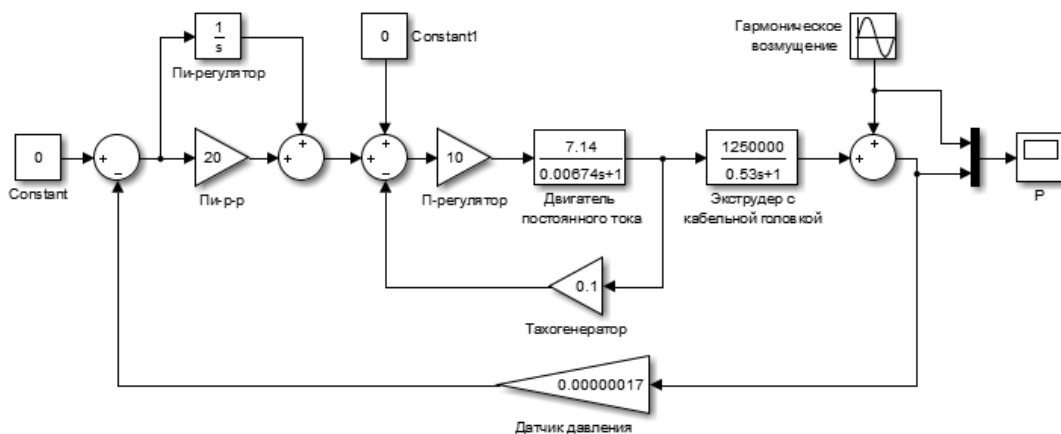


Рис. 3. Модель системы стабилизации давления расплава полимера в кабельной головке шнекового экструдера в Matlab/Simulink

На рис. 4 приведен результат работы системы стабилизации давления расплава полимера в кабельной головке.

Исходная амплитуда пульсаций давления расплава полимера в кабельной головке была $5 \cdot 10^4$ Па (0,86 % от заданного значения давления). Частота гармонических пульсаций, определяемая скоростью вращения шнека экструдера, составляла $2,51$ с⁻¹.

Анализ эффективности отработки системой возмущающего воздействия показывает, что амплитуда пульсаций давления расплава полимера в кабельной головке экструдера уменьшилась более чем в 25 раз при использовании предложенной системы стабилизации давления.

При синтезе системы стабилизации температуры расплава полимера использовалось описание ОУ, предложенное в [11]. При сосредоточенном управлении

по температуре цилиндра экструдера, равномерно распределенной по длине его зоны дозирования, рассматриваемый объект первого порядка можно назвать конечно представимым [21], так как в структурном отношении он представляется соединением конечного числа (в данном случае всего трех) типовых звеньев – аperiodического, статического и звена чистого запаздывания. Структурное представление объекта управления процессом формирования температуры расплава полимера $\tilde{T}(z, p)$ в зоне дозирования пластицирующего экструдера с сосредоточенным входным воздействием по равномерно распределенной в зоне дозирования температуре $\tilde{T}_u(p)$ нагревательных элементов дано на рис. 5.

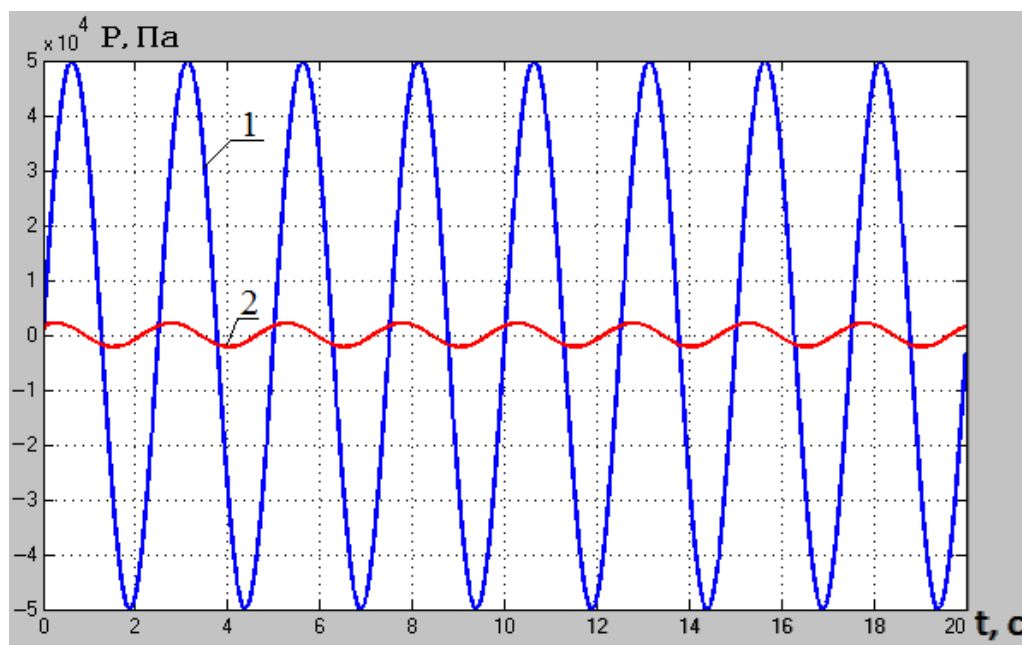


Рис. 4. Эффективность работы системы стабилизации давления в кабельной головке одночервячного экструдера (1 – возмущающее воздействие; 2 – стабилизированное давление на выходе системы управления)

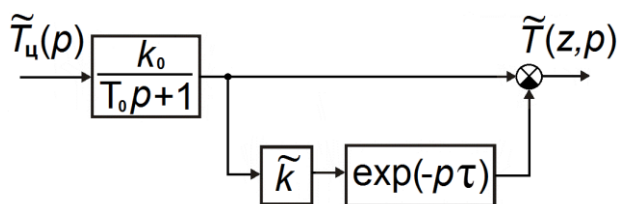


Рис. 5. Структурное представление объекта управления процессом формирования температуры расплава полимера

Здесь $\tau = z/\bar{V}_z$ – время прохождения расплава полимера по каналу шнека от входа в зону дозирования до места измерения температуры расплава полимера;
 z – продольная координата вдоль канала шнека;
 \bar{V}_z – средняя скорость движения расплава полимера вдоль канала шнека;

$$\tilde{k} = \exp\left(-\frac{K_1 z}{\bar{V}_z}\right); K_1 = \frac{\alpha + bK^* h}{\rho Ch}; k_0 = \frac{1}{b^* K_1} = \frac{\alpha}{\alpha + bK^* h}; T_0 = 1/K_1; \quad (5)$$

$$b^* = \frac{\rho Ch}{\alpha}, K = \mu_0 \cdot \left(\frac{V_0}{h}\right)^{\frac{n+1}{n}} \cdot B^{-\frac{n+1}{n}}; K^* = K \exp(bT_0);$$

α – коэффициент теплоотдачи между полимером и цилиндром экструдера;

b – температурный коэффициент вязкости;

h – глубина канала шнека;

C – удельная теплоемкость полимера;

ρ – плотность сплошной пластмассы;

T_0 – температура приведения (плавления полимера);

n – индекс течения полимера;

μ_0 – ньютоновская вязкость;

φ – угол захода шнека экструдера;

y – координата по глубине канала шнека;

$a^* = 1/3$ – коэффициент, соответствующий максимальной производительности экструдера [7];

\bar{B} – среднее значение коэффициентов B_y (6) во всем диапазоне $0 \leq y \leq h$.

$$B_y = \sin^2 \varphi \cdot (6 y/h - 1)^2 + \cos^2 \varphi \cdot (6 a^* y/h - 3 a^* + 1)^2. \quad (6)$$

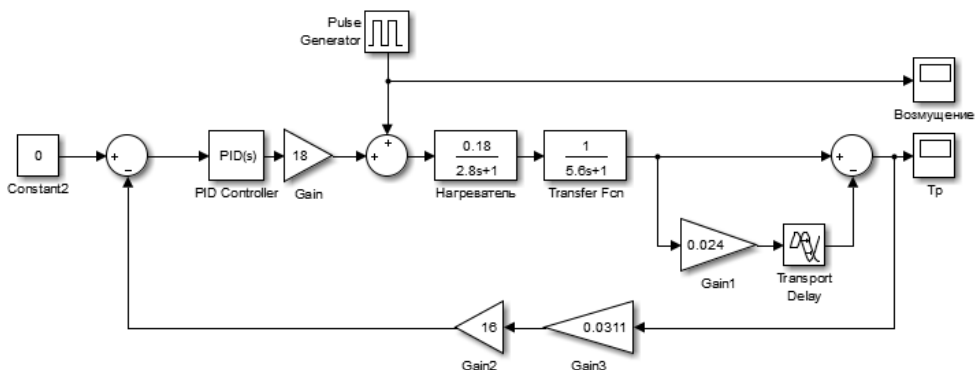


Рис. 6. Модель системы управления температурой расплава полимера в Matlab/Simulink

Для модели, представленной на рис. 5, расчетным путем в соответствии с полученным аналитическим описанием определены следующие параметры объекта для зоны дозирования экструдера NOKIA-80: $k_0 = 1$, $T_0 = 5,6$ с, $\tau = 41,7$ с, $\tilde{k} = 0,024$.

На рис. 6 приведена модель системы управления температурой расплава полимера в зоне дозирования шнекового экструдера в Matlab/Simulink.

Настройки PID-регулятора (см. рис. 6) следующие:

Proportional 4.11; Integral 1.5; Derivative 13.9.

На рис. 7 показано возмущающее воздействие системы стабилизации температуры расплава полимера в зоне дозирования шнекового экструдера.

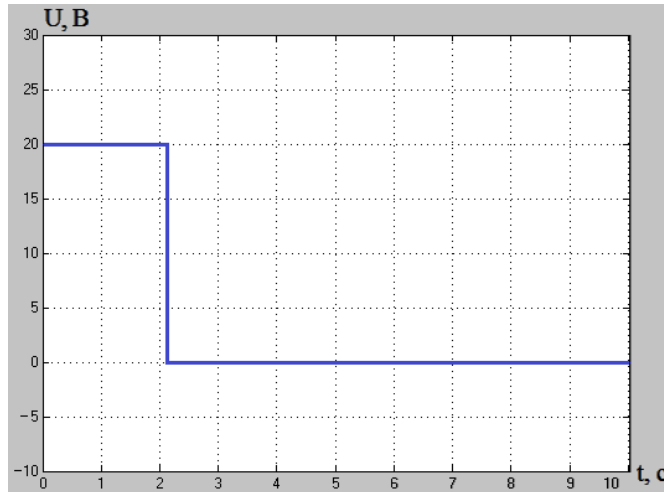


Рис. 7. Возмущающее воздействие системы стабилизации температуры расплава полимера (время моделирования 10 с)

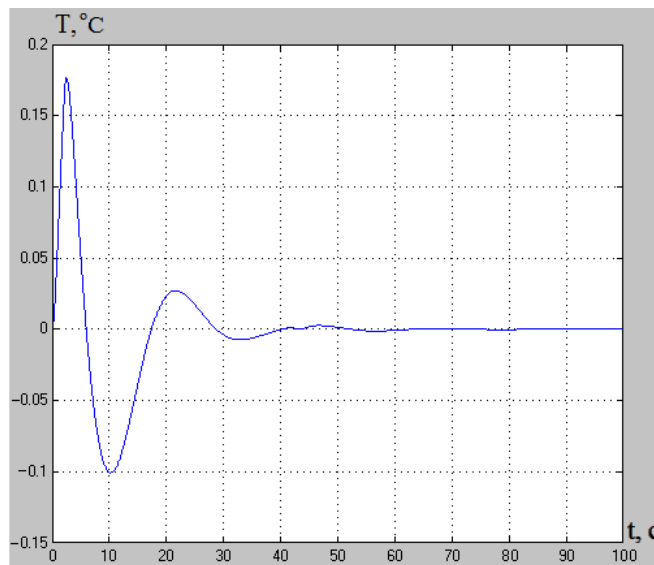


Рис. 8. Отработка системой стабилизации температуры расплава полимера возмущающего воздействия

На рис. 8 показана реакция системы стабилизации температуры расплава полимера в зоне дозирования шнекового экструдера на данное возмущающее воздействие.

Анализ работы реализованной системы стабилизации температуры расплава полимера в зоне дозирования шнекового экструдера позволяет сделать вывод о ее эффективности. Система теоретически обеспечивает точность стабилизации температуры лучше $\pm 0,25$ °С, т. е. в соответствии с лучшими на сегодняшний день по классу точности датчиками температуры.

При изготовлении радиочастотных коаксиальных кабелей RG (Radio Guide) и LAN-кабелей, предназначенных для передачи огромного объема информации на сверхвысоких частотах, «единственной возможностью для удовлетворения новым требованиям является применение материалов с прекрасными диэлектрическими свойствами и высокой степенью вспенивания» [10]. В качестве таких изоляционных материалов, отвечающих высоким требованиям стабильности электрических характеристик, в настоящее время могут использоваться только фторполимеры [10].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Семенов А.Б., Стрижаков С.К., Сунчелей И.П. Структурированные кабельные системы. – М.: Компания АйТи, ДМК Пресс, 2002. – 640 с.
2. Дорезюк Н.И., Попов М.Ф. Радиочастотные кабели высокой регулярности. – М.: Связь, 1979. – 104 с.
3. Гальперович Д.Я., Павлов А.А., Хренков Н.Н. Радиочастотные кабели. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 256 с.
4. Митрошин В.Н., Колпациков С.А. Автоматизация процесса наложения полимерной изоляции при изготовлении проводных кабелей связи // Вестник Самарского государственного университета. Сер. Технические науки. – 2018. – № 3(59). – С. 28–40.
5. Митрошин В.Н. Автоматизация технологических процессов производства кабелей связи. – М.: Машиностроение-1, 2006. – 140 с.
6. Рауендаль К. Экструзия полимеров / Пер. с англ. под ред. А.Я. Малкина. – СПб.: Профессия, 2008. – 768 с.
7. Торнер Р.В. Теоретические основы переработки полимеров. – М.: Химия, 1977. – 464 с.
8. Merki H.A. Control of diameter and capacitance of products with cellular insulation // Wire Ind. – 1983. – vol. 50. – № 389. – P. 39–42.
9. Boysen R.L. How to solve problems in the extrusion of cellular PE in coaxial cables // Wire Journ. – 1972. – v. 5. – № 1. – P. 51–56.
10. Бонвин П.-И., Родригез Р., Чамов А.В. Линии изолирования коаксиальных кабелей с процессом физического вспенивания Extrucell™ // Кабель-news. – 2010. – № 2. – С. 13–18.
11. Митрошин В.Н. Автоматическое управление объектами с распределенными параметрами в технологических процессах изолирования кабелей связи. – М.: Машиностроение-1, 2007. – 184 с.
12. Чостковский Б.К. Методы и системы оптимального управления процессами производства кабелей связи. – М.: Машиностроение, 2009. – 190 с.
13. Laurich K., Muller G., Bluckler B., Wallau H. Untersuchung einer Zweigroßenregelstrecke an einer kabelummantelungsanlage. – Mess. – Steuern – Regeln, 1979, 22, № 1, s. 28–31.
14. Дорезюк Н.И. Гармонический анализ периодических неоднородностей волнового сопротивления коаксиальных кабелей // Электротехническая промышленность. Сер. Кабельная техника. – 1974. – № 6. – С. 18–22.
15. Гроднев И.И., Фролов П.А. Коаксиальные кабели связи. – М.: Радио и связь, 1983. – 208 с.
16. Гурецкий Х. Анализ и синтез систем управления с запаздыванием. – М.: Машиностроение, 1974. – 328 с.
17. Митрошин В.Н., Кулешова Д.И. Разработка системы управления процессом изолирования кабелей связи, обеспечивающей достижение требуемого эксплуатационного качества продукции // Вестник Самарского государственного университета. Сер. Технические науки. – 2015. – № 1(45). – С. 71–77.
18. Marinov S., Steller S. Erfassung der Sohmelzeströmung in Extrusionsdüzen bei pulsierendem Druckgradienten // Plaste und Kautschuk. – 1985. – Bd. 32. – № 9. – S. 346–349.

19. Степанов Л.Е. Коаксиальный кабель зонной связи до 10 МГц с изоляцией из вспененного полиэтилена: Дис. ... канд. техн. наук. – М., 1985. – 226 с.
20. Нечаев А.С. Автоматическое управление температурой расплава полимера в зоне дозирования одночервячного экструдера технологической линии изготовления кабелей связи: Дис. ... канд. техн. наук. – Новочеркасск, 2013. – 131 с.
21. Маковский В.А. Динамика металлургических объектов с распределенными параметрами. – М.: Металлургия, 1971. – 384 с.

Статья поступила в редакцию 3 марта 2019 г.

AUTOMATION OF THE MANUFACTURE OF HIGH-FREQUENCY WIRED COMMUNICATION CABLES OF HIGH REGULARITY WITH CELLULAR INSULATION

V.N. Mitroshin, D.I. Kuleshova, Ya.V. Kolesnikova

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

Abstract. The proposed method of controlling the imposition of cellular insulation in the manufacture of high-frequency wired communication cables of high regularity, ensuring the achievement of the required characteristics of the products. The main tasks are formulated when automating the technological process of imposing cellular insulation with extrusion lines. Systems have been developed to stabilize the pressure in the cable head of the extruder and stabilization of the polymer melt temperature in the dosing zone of the extruder have been developed. The analysis of the work of the systems for stabilization of the operating parameters of the process equipment carried out using computer simulation proved their high efficiency.

Keywords: *communication cables, polymer insulation, extrusion lines, automation.*

REFERENCES

1. *Semenov A.B., Strizhakov S.K., Suncheley I.R.* Structured Cabling Systems. Moscow: IT Co., DMK Press, 2002. 640 p. (In Russian).
2. *Dorezyuk N.I., Popov M.F.* High Frequency Radio Frequency Cables. Moscow: Svyaz', 1979. 104 p. (In Russian).
3. *Galperovich D.Ya., Pavlov A.A., Hrenkov N.N.* Radio frequency cables. Moscow: Energoatomizdat, 1990. 256 p. (In Russian).
4. *Mitroshin V.N., Kolpashchikov S.A.* Automation of the isolation process by polymer in the manufacture of wired communication cables // Bulletin of the Samara State Technical University. A series of "Technical Sciences". № 3 (59). 2011. P. 28–40. (In Russian).
5. *Mitroshin V.N.* Automation of technological processes for the production of communication cables. Moscow: Mashinostroenie-1, 2006. 140 p. (In Russian).
6. *Rauwendaal C.* Polymer Extrusion. SPb: Profession, 2008. 768 p. (In Russian).
7. *Torner R.V.* Theoretical bases of polymer processing. Moscow: Chemistry, 1977. 464 p. (In Russian).
8. *Merki H.A.* Control of diameter and capacitance of products with cellular insulation // Wire Ind. vol. 50. № 389. 1983. P. 39–42.

*Vladimir N. Mitroshin (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Daria I. Kuleshova, Postgraduate Student.
Yana V. Kolesnikova, Student.*

9. *Boysen R.L.* How to solve problems in the extrusion of cellular PE in coaxial cables // *Wire Journ.* Vol. 5. № 1. 1972. P. 51–56.
10. *Bonvin P.-I., Rodriguez R., Chamov A.V.* Insulation lines for coaxial cables with physical foaming process ExtrucellTM // *Cable-news*. Vol. 2. 2010. P. 13–18 (In Russian).
11. *Mitroshin V.N.* Automatic control of objects with distributed parameters in technological processes of isolation of communication cables. Moscow: Mashinostroenie-1, 2007. 184 p. (In Russian).
12. *Chostkovsky B.K.* Methods and systems for optimal control of communication cable production processes. Moscow: Mashinostroenie, 2009. 190 p. (In Russian).
13. *Laurich K., Muller G., Bluckler B., Wallau H.* Untersuchung einer Zweigroßenregelstrecke an einer kabelummantelungsanlage. – *Mess. – Steuern – Regeln*, 1979, 22, № 1, s. 28–31.
14. *Dorezyuk N.I.* Harmonic analysis of periodic in homogeneities of the wave resistance of coaxial cables // *Electrotechnical industry. A series of "Cable Technology"*. Vol. 6. 1974. P. 18–22 (In Russian).
15. *Grodnev I.I., Frolov P.A.* Coaxial communication cables. Moscow: Radio I Svyaz', 1983. 208 p. (In Russian).
16. *Guretsky H.* Analysis and synthesis of control systems with delay. M.: Mechanical Engineering, 1974. 328 p.
17. *Mitroshin V.N., Kuleshova D.I.* Development of a control system for isolating communication cables ensuring the achievement of the required operational quality of products // *Bulletin of the Samara State Technical University. A series of "Technical Sciences"*. № 1 (45). 2015. P. 71–77 (In Russian).
18. *Marinov S., Steller S.* Erfassung der Schmelzeströmung in Extrusionsdüsen bei pulsierendem Druckgradienten // *Plaste und Kautschuk*. – 1985. – Bd. 32. – № 9. – S. 346–349.
19. *Stepanov L.E.* Coaxial cable zonal communications up to 10 MHz with foam insulation: Dis. ... Cand. tech. Sciences: Moscow, 1985. 226 p.
20. *Nechaev A.S.* Automatic control of the temperature of the polymer melt in the dosing zone of a single-night extruder of the technological line for the manufacture of communication cables: Dis. ... Cand. tech. Sciences: Novocheboksary, 2013. 131 p.
21. *Makovsky V.A.* Dynamics of metallurgical objects with distributed parameters. M.: Metallurgy, 1971. 384 p.

УДК 620.9

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ НАДЕЖНОСТИ ЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ГОРОДА САМАРЫ

А.Г. Салов, Л.А. Сагитова

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

Аннотация. *Проведен анализ технического состояния систем теплоснабжения г. Самары и предложена модель оценки вероятности их безаварийной работы в отопительный период. Проведен анализ статистических данных о состоянии тепловых сетей г. Самары за период с 2006 по 2016 гг., который показал, что к началу 2017 года протяженность тепловых сетей, требующих замены и находящихся в эксплуатации, составляла 36,7 % от всей ее длины. Для оценки вероятности безаварийной работы системы теплоснабжения разработана математическая модель в виде степенной неоднородной функции, связывающая протяженность сетей, требующих замены и находящихся в рабочем состоянии, с вероятностью безотказной работы. Проведена идентификация параметров построенной модели и оценена корреляция расчетных значений по ней с вероятностью, посчитанной по статистическим данным. Критерии оценки качества построенной модели свидетельствуют о хорошей сходимости модельных результатов с расчетами по статистическим данным.*

Ключевые слова: *системный анализ, надежность работы системы теплоснабжения, математическая модель, вероятность безотказной работы.*

Система теплоснабжения города Самары исторически стала преобразовываться в централизованную систему города Куйбышева, впоследствии переименованного в Самару, в начале 50-х годов прошлого века.

В сороковых годах существовали элементы системы централизованного теплоснабжения, отапливающие отдельные районы города. Одна из таких систем обеспечивала теплом центральную часть старого города от Куйбышевской государственной районной энергетической станции (ГРЭС), другая система – быстро развивающийся промышленный район Безымянку от строящейся в то время Безымянской теплоэлектроцентрали (БТЭЦ).

В дальнейшем в результате интенсивного развития промышленности Куйбышевского региона и соответственно жилищного строительства стали возникать отдельные микрорайоны и, соответственно, источники централизованного теплоснабжения. Так в конце шестидесятых годов появилась отопительная котельная в районе Центрального автовокзала, немного позднее – Самарская теплоэлектроцентраль, затем – Привокзальная отопительная котельная.

Одновременно с этим развивалась и единая система централизованного теплоснабжения, которая объединила отдельно существовавшие районные тепловые сети в единую сеть.

Переход экономики страны к рыночным отношениям, начавшийся после

Салов Алексей Георгиевич (д.т.н., доц.), профессор кафедры «Теплоснабжение и вентиляция».

Сагитова Ляйсан Акзамовна, аспирантка.

1990 года, оказался сложным, долгим, и до настоящего времени переходный период еще не закончился.

Процесс реструктуризации энергетики протекал на фоне морального старения и физического износа генерирующего оборудования, систем транспорта тепловой и электрической энергии, в условиях дефицита финансирования [1].

В процессе реструктуризации произошла замена базового принципа управления энергетикой, заключавшегося в бесперебойном и надежном обеспечении потребителей тепловой и электрической энергией соответствующего качества, на принцип получения наибольшей прибыли [2], [3], [4]. Прекратилось финансирование текущего ремонта оборудования, что привело к постоянному росту тарифов на производимую энергетикой продукцию и отрицательно сказалось на деятельности промышленных предприятий, потребляющих тепловую энергию, производимую энергосистемой. В целом к 1996 году потребление и производство тепловой и электрической энергии в Самарской области снизилось на 40 %.

Еще в более худшем положении оказались тепловые сети, перешедшие в частные руки при практически полном отсутствии платежей со стороны предприятий и жилищно-коммунального хозяйства [5].

Энергосистема перешла на ремонт оборудования ТЭЦ, котельных и тепловых сетей по текущему состоянию оборудования, а не по нормативным показателям, как это было принято до 1990 г.

Сети централизованного теплоснабжения не имеют стопроцентного резервирования, а оценить реальное состояние всех участков, требующих замены, по исследованию их отдельных элементов не представляется возможным.

Общепринятым критерием эффективности работы систем централизованного снабжения является надежность обеспечения качественных показателей тепловой энергии и безотказность этого теплоснабжения.

Оценим состояния тепловых сетей указанного региона за период с 2006 по 2016 гг.

К началу 2006 года система централизованного теплоснабжения была выведена в отдельное предприятие, в задачи которого входила необходимость обеспечения бесперебойного снабжения потребителей тепловой энергии. Надежность систем теплоснабжения оцениваем по вероятности их безотказной работы (ВБР).

Минимально допустимый показатель вероятности безотказной работы для тепловых сетей следует принимать $P_{т.с.} = 0,9$, для источника теплоты $P_{и.т.} = 0,97$, для абонентских установок потребителей $P_{потр.} = 0,99$ [6]. Вероятность безотказной работы системы центрального отопления в целом должна составлять не менее $P_{с.ц.т.} = 0,9 \cdot 0,97 \cdot 0,99 = 0,86$.

Проведем анализ текущего состояния системы централизованного отопления по ее техническому состоянию на основании данных Территориального органа Федеральной службы государственной статистики [7], приведенных в табл. 1.

На настоящий момент централизованная система теплоснабжения города Самары включает в себя тепловую сеть в двухтрубном исполнении длиной более 1 000 км и около 150 источников теплоснабжения. В последние десять лет происходила постоянная реструктуризация системы централизованного отопления, предусматривающая присоединение отдельных районных тепловых сетей вместе с источниками теплоснабжения к единой централизованной системе, что и обуславливало непрерывный рост источников теплоснабжения, а также увеличение

числа источников теплоснабжения с единичной мощностью более 3 Гкал/ч, что является весьма положительным фактором.

Таблица 1

**Статистические данные по протяженности и состоянию тепловых сетей
в г.о. Самара**

Показатель	Число источников теплоснабжения	Число источников теплоснабжения мощностью до 3 Гкал/ч	Протяженность тепловых и паровых сетей в двухтрубном исчислении	Протяженность тепловых и паровых сетей в двухтрубном исчислении, нуждающихся в замене	Протяженность тепловых и паровых сетей, которые были заменены и отремонтированы за отчетный год	
Ед. изм.	единица	единица	метр	метр	метр	
Рассматриваемый период	2006	120	61	708800	306100	23700
	2007	120	61	708800	306100	22998
	2008	115	56	708759	306107	27939
	2009	122	64	731600	303650	26054
	2010	121	56	731600	303650	22197
	2011	121	52	888325	220658	23227
	2012	120	52	910181	223304	17038
	2013	118	52	910181	394980	14587
	2014	115	45	910181	285925	14872
	2015	137	48	919300	394300	13600
	2016	146	44	1075100	394980	15100

Это обстоятельство может быть объяснено тем, что в новых экономических условиях отопительные котельные, находящиеся в пределах административного округа, оказываются нерентабельными из-за недостатка финансирования, приходят в ветхое состояние и прекращают свою деятельность, а тепловые сети, принадлежащие им, переходят в ведение городских тепловых сетей.

Эта тенденция подтверждается значительным ростом протяженности тепловых сетей городского округа Самара и, естественно, увеличением длины сетей, требующих замены, поскольку при ликвидации собственника все оборудование, в том числе и тепловые сети, передаются в техническом состоянии их на этот момент.

Динамика протяженности тепловых сетей и их состояния за период с 2006 по 2016 гг. приведена на рис. 1.

В конце 2006 г. тепловые сети города имели в своем составе 57 % тепловых

сетей, не выработавших свой ресурс, и, соответственно, 43 % сетей, требующих замены.

В 2011, 2012 и 2014 гг. происходило резкое снижение протяженности тепловых сетей, требующих замены, без роста объема ремонтных работ. Вероятно, данное снижение связано с апробированием новых методик оценки состояния тепловых сетей.

К концу 2016 г. протяженность тепловых сетей составляла 1075,1 км, при этом в замене нуждалось 395 км, что на 88,9 км больше, чем в 2006 г. Это означает, что 36,7 % тепловых сетей выработало свой срок службы, и свидетельствует о значительной вероятности аварийных остановов отдельных участков тепловой сети.

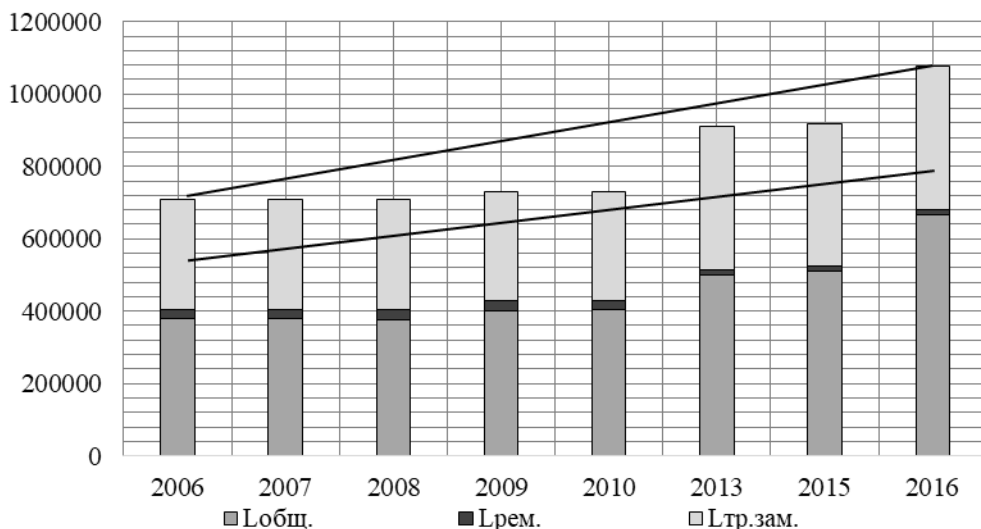


Рис. 1. Данные о протяженности и состоянии тепловых сетей с 2006 по 2016 гг.:

$L_{общ.}$ – протяженность тепловых и паровых сетей в двухтрубном исчислении, м; $L_{тр.зам.}$ – протяженность тепловых и паровых сетей в двухтрубном исчислении, нуждающихся в замене, м; $L_{рем.}$ – протяженность тепловых и паровых сетей, которые были заменены и отремонтированы за отчетный год, м

Статистические данные, приведенные на рис. 1, характеризуют динамику состояния тепловых сетей по годам в предположении постоянства в течение года протяженности тепловых и паровых сетей в двухтрубном исчислении, нуждающихся в замене.

Сеть централизованного теплоснабжения является сложной технической системой, состоящей из нескольких тысяч однотипных элементов, а именно – трубопроводов, запорной арматуры, компенсаторов и т. д. различных диаметров.

Используя методологию системного анализа сложных производственных систем [8], построим математическую модель, позволяющую оценить надежность работы тепловых сетей города Самары.

Отказами в работе тепловой сети, как правило, являются повышенные потери теплоносителя тепловой сети за счет нарушения нормальной работы запорных устройств или появления утечек в трубопроводах, повлекших прекращение по-

дачи тепловой энергии потребителям. Восстановление тепловой сети осуществляется путем замены вышедшей из строя арматуры или разрушенных участков трубопроводов. Срок эксплуатации тепловой сети значительно превышает период устранения отказов, а поведение отремонтированной сети не зависит от событий, происходивших во время отказов. Таким образом, поток отказов не обладает последствием и условия появления событий во взаимно не пересекающихся интервалах времени независимы [9].

Поток отказов тепловой сети также обладает свойством ординарности, которое свидетельствует о том, что вероятность появления более одного события на интервале Δt пренебрежимо мала по сравнению с вероятностью появления на этом интервале ровно одного события [9].

При приближенном определении вероятности безотказной работы тепловой сети в течение года можно принять, что поток отказов обладает стационарностью, при этом параметр потока отказов ω можно положить независимым от времени [10]. Такое допущение справедливо, поскольку интервал времени, в течение которого анализируется надежность работы сети (один год), является сравнительно малым по сравнению со временем эксплуатации сети, которое составляет не менее 30 лет [6]. Таким образом, поток отказов тепловой сети обладает свойствами стационарности, ординарности и отсутствия последствий и его можно считать простейшим.

Тогда вероятность появления отказов будет подчиняться закону Пуассона [11]:

$$P_{m(t)} = \frac{(\omega t)^m}{m!} e^{-\omega t}, \quad (1)$$

где m – количество отказов за время t ;

t – рассматриваемый период эксплуатации, для нашего случая примем $t = 1$ год;

ω – параметр потока отказов тепловой сети.

Вероятность того, что в течение года на тепловой сети не произойдет ни одного отказа, будем оценивать по соотношению

$$P_{m.c.} = e^{-\omega \cdot t}. \quad (2)$$

Параметр потока отказов оценивается по формуле

$$\omega = \frac{\sum_{i=1}^n m_i}{N \cdot \Delta t}. \quad (3)$$

В соотношении (3) m_i – количество отказов каждого из N объектов за время Δt .

Одним объектом тепловой сети будем считать участок между двумя соседними секционными задвижками, а также одну из присоединенных к нему задвижек. Тогда для двухтрубной системы теплоснабжения количество участков тепловой сети составит

$$N = 2(2n + 1), \text{ ед.,}$$

где n – количество участков тепловой сети.

Согласно [6] максимальное расстояние между двумя соседними задвижками составляет для $D_u \leq 100 \text{ мм} - 1000 \text{ м}$, $400-500 \text{ мм} - 1500 \text{ м}$, для $D_u \geq 600 \text{ мм} -$

3000 м. В первом приближении примем среднее значение длины одной секции $l_{секц.}$ равным 1500 м. Тогда

$$n = \frac{L_{общ.}}{l_{секц.}}. \quad (4)$$

Количество отказов находим аналогичным образом, принимая, что на трубах, требующих замены, в течение года произойдет отказ, а вероятность того, что любой из N элементов откажет за время Δt более 1 раза, равна 0. Тогда

$$\sum_{i=1}^n m_i = 2 \cdot m + 2 \cdot (m + 1), \quad (5)$$

где

$$m = \frac{L_{тр.зам.}}{l_{секц.}}. \quad (6)$$

Используя статистические данные, оценим вероятность безотказной работы тепловой сети за весь рассматриваемый период с помощью формул (2)–(6).

Результаты расчета приведены в табл. 2.

Таблица 2

Расчет ВБР тепловых сетей

Показатель	Ед. изм.	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
n – количество секций	шт.	473	473	473	488	488	592	607	607	607	613	717
N – число элементов	шт.	1892	1892	1892	1953	1953	2371	2429	2429	2429	2453	2869
m – число секций, требующих замены	шт.	204	204	204	202	202	147	149	263	191	263	263
$\sum_{i=1}^n m_i$ – количество отказов	шт.	818	818	818	812	812	590	597	1055	764	1053	1055
ω – параметр потока отказов тепловой сети		0,432	0,432	0,432	0,416	0,416	0,249	0,246	0,434	0,315	0,429	0,368
$P_{м.с.}$ – ВБР тепловой сети		0,649	0,649	0,649	0,660	0,660	0,780	0,782	0,648	0,730	0,651	0,692

Анализ расчетных данных, приведенных в таблице, показывает, что вероятность безотказной работы тепловых сетей за период с 2006 по 2016 гг. колеблет-

ся в пределах от 0,648 до 0,78, ее величина далека от требуемых значений и не удовлетворяет требованиям СП «Тепловые сети» [6].

С целью прогнозирования состояния тепловой сети и вероятности ее безотказной работы построим математическую модель, связывающую протяженность исправных и требующих замены тепловых сетей с вероятностью безотказной работы в виде двухфакторной неоднородной производственной функции Кобба – Дугласа [12] в виде

$$P_{m.c.} = A \cdot L_{испр.}^{\alpha} \cdot L_{тр.зам.}^{\beta}, \quad (7)$$

где $P_{m.c.}$ – вероятность безотказной работы тепловых сетей;

$L_{испр.} = L_{общ.} - L_{тр.зам.}$ – протяженность исправных тепловых сетей, м;

$L_{тр.зам.}$ – протяженность тепловых сетей, нуждающихся в замене, м;

α, β – коэффициенты эластичности;

A – масштабный параметр.

Идентификация параметров модели A, α, β проведена для сглаженных исходных статистических данных, что позволит устранить влияние их случайных отклонений.

Эластичности α и β являются логарифмическими функциями чувствительности, характеризующими относительный вклад протяженности исправных тепловых сетей и тепловых сетей, нуждающихся в замене, в вероятность безотказной работы тепловых сетей.

Результаты моделирования приведены в табл. 3.

Адекватность построенной модели статистическим данным была оценена с помощью: t -критерия Стьюдента, определяющего значимость параметров модели, коэффициента детерминации R^2 , среднеквадратичного отклонения σ и критерия Дарбина – Уотсона DW , определяющего прогнозные свойства модели.

Коэффициент детерминации R^2 равен 0,997, что говорит о достаточно высоком качестве модели. Погрешности оценки расчетов составляют менее 1%. F -критерий Фишера равен 1451,7, поэтому вероятность того, что полученные результаты случайны, крайне низка.

На рис. 2 приведено сопоставление результатов моделирования по формуле (6) с расчетными данными, приведенными в табл. 2.

В целом построенная модель дает результаты, близкие к расчетным значениям по статистическим данным. Идентифицированные коэффициенты эластичности позволяют оценить, как изменится надежность теплоснабжения при снижении протяженности неисправных тепловых сетей.

Таблица 3

Двухфакторная производственная функция Кобба – Дугласа

Параметры модели и коэффициенты	A	α	β	DW	R^2	t_A	t_{α}	t_{β}	F	σ
Значения параметров	0,512	0,234	-0,221	1,715	0,997	-6,651	48,53	-31,235	1451,7	0,002907

Так, если протяженность тепловых сетей, требующих замены, снизится на 1 %, то при $\beta = -0,221$ вероятность безотказной работы тепловой сети возрастет на 0,221 %. При увеличении протяженности исправных тепловых сетей на 1 % $\alpha = -0,234$ вероятность безотказной работы увеличится на 0,234 %.

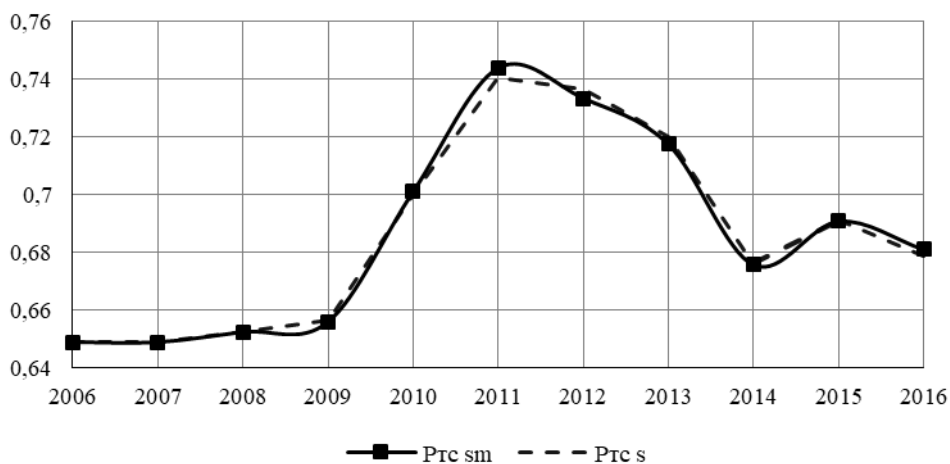


Рис. 2. Вероятность безотказной работы тепловой сети:
 $P_{tc\ s}$ – сглаженная вероятность безотказной работы тепловой сети;
 $P_{tc\ sm}$ – ВБР тепловой сети по модели однородной производственной функции
 Кобба – Дугласа

Таким образом, данные результатов моделирования позволяют получить количественную оценку влияния состояния тепловых сетей на надежность работы системы теплоснабжения. Существенным преимуществом построенной модели является то, что она упрощает проведение расчетов, позволяет проводить прогнозные оценки надежности работы тепловой сети при наличии ограниченного объема статистических данных о техническом состоянии системы.

Анализ результатов эксплуатации тепловой сети города в последние годы показывает, что в среднем происходят 1–2 аварии в неделю по данным информационных систем, требующие отключения или ограничения теплоснабжения потребителей. Проводимые аварийные ремонты при этих авариях не повышают, а снижают надежность сетей, которые требуют замены. Это объясняется тем, что ликвидируется авария, то есть латаются пришедшие в негодность системы, а не заменяются участки – от запорного до запорного органа, как это происходит при капитальных ремонтах.

Заключение

Проведенный в статье анализ состояния, надежности работы и условий эксплуатации централизованной системы отопления города Самара позволяет сделать следующие выводы:

1. Величина показателя вероятности безотказной работы тепловых сетей свидетельствует о том, что эксплуатация в таком состоянии тепловой сети противоречит нормативным показателям, в частности требованиям СП «Тепловые сети» [6].

2. Поскольку компания находится в частных руках, то администрации города необходимо принять меры, стимулирующие собственников производить заме-

ну тепловых сетей, нуждающихся в ней, а не осуществлять аварийные ремонтные работы в отопительный период, которые в целом не повышают надежности работы сети.

3. Администрации города предлагается разработать мероприятия, стимулирующие собственников тепловых сетей вкладывать средства в повышение надежности их работы.

Предлагается как один из возможных вариантов обязать собственников тепловых сетей при проведении ремонтных работ в отопительный период выплачивать отключенным потребителям компенсацию за использование электрической энергии на нужды отопления при несоответствии качественных показателей энергоносителя (снижение температуры воды в подающем трубопроводе, расходов теплоносителя, отключение горячей воды и т. д.) расчетным значениям. Компенсация должна выплачиваться по существующим на момент аварии тарифам за потребленную электрическую энергию.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Салов А.Г.* Системная методология анализа энергоэффективности территориальной генерирующей компании в условиях перехода к рыночным отношениям: Автореф. дисс. ... докт. техн. наук / Самара: Самарский государственный технический университет. 2009. – 42 с. <https://elibrary.ru/item.asp?id=15951359> (дата обращения 14.09.2018).
2. *Дилigenский Н.В., Шелудько Л.П.* Проблемы и пути реализации региональной энергосберегающей политики // Вестник Самарского технического университета. – 1998. – Вып. 5. – С. 144–151.
3. *Салов А.Г., Гаврилова А.А., Иванова Д.В.* Исследование экономических характеристик регионального промышленного комплекса методами статического и модельного анализа // Научное обозрение. – 2015. – № 15. – С. 327–332.
4. *Салов А.Г., Гаврилова А.А., Князев П.А., Круглов В.А.* Имитационное моделирование деятельности генерирующего комплекса на основе трехфакторной производственной функции // Вестник СГАСУ Строительство и архитектура: научно-технический журнал. – 2016. – № 3. – С. 140–145.
5. *Дилigenский Н.В., Цапенко М.В.* Математическое моделирование и обобщенное оценивание эффективности производственно-экономических систем // Труды VI Международной конференции «Проблемы управления и моделирования в сложных системах». – Самара: СНИЦ РАН, 2004. – С. 96–106.
6. СП 124.13330.2012. Тепловые сети: свод правил: утв. МинРегионом России 30.06.2012: взамен СНиП 41-02-2003: срок введения в действие 01.01.2013 / МинРегион России. – Изд. офиц. – М.: МинРегион России, 2012. – 73 с.
7. Жилищное хозяйство и бытовое обслуживание населения в России // Сборник Росстат. http://samarastat.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat_ts/samarastat/ru/municipal_statistics/main_indicators/ (дата обращения 14.10.2018).
8. *Волкова В.Н., Денисов А.А.* Основы теории систем и системного анализа. – СПб: Изд-во СПбГТУ, 2004. – 520 с.
9. *Дорохов А.Н., Керножицкий В.А., Миронов А.Н., Шестопалова О.Л.* Обеспечение надежности сложных технических систем: Учебник. – СПб.: Лань, 2011. – 352 с.
10. *Руденко Ю.Н., Ушаков И.А.* Надежность систем энергетики. 2-е изд., перераб. и доп. – Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1989. – 328 с.
11. *Балакирев В.С.* Надежность систем автоматизации: учеб. пособие. 2-е изд., испр. – Саратов: Саратовский гос. техн. ун-т, 2006. – 146 с.
12. *Дилigenский Н.В., Гаврилова А.А., Цапенко М.В.* Построение и идентификация математических моделей производственных систем: Учеб. пособие. – Самара: Офорт, 2006. – 126 с.

Статья поступила в редакцию 12 ноября 2018 г.

SYSTEM ANALYSIS OF RELIABILITY OF DISTRICT HEAT SUPPLY IN SAMARA

A.G. Salov, L.A. Sagitova

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

Abstract. *The paper analyzes the technical conditions of heat supply systems in Samara city. A model for estimating the status of probability of no-failure during the heating season was proposed. The analysis of the technical conditions of the Samara city's heating networks from 2006 to 2016 was carried on. Analysis revealed that by the beginning of 2017 the length of the heating networks in service and identified for replacement was indicating as 36,7% from entire length of the heating networks. A mathematical model as exponentiation not uniform function for the assessment of the probability of the trouble-free operation of the heat supply system was developed. The model constructed attributes the length of the networks identified for replacement and the length of the networks maintained in good working order to the probability of the trouble-free operation. The parameters of the constructed mathematical model were identified. The correlation of calculated values with probability calculated from statistical data was evaluated. Quality assessment criteria for the constructed model attest to a good convergence of model results with calculations based on statistical data.*

Keywords: *system analysis, operating reliability of heat supply system, mathematical model, probability of no-failure.*

REFERENCES

1. *Salov A.G.* Sistemnaya metodologiya analiza ehnergoehffektivnosti territorial'noj generiruyushchej kompanii v usloviyah perekhoda k rynochnym otnosheniyam – Avtoferat dissertacii na soiskanie uchenoj stepeni doktora tekhnicheskikh nauk // Samara, SamGTU, 2009. 42 pp. (In Russian). <https://elibrary.ru/item.asp?id=15951359>
2. *Diligenskij N.V., SHelud'ko L.P.* Problems and ways to implement regional energy-saving policies // Vestnik Samarskogo tekhnicheskogo universiteta. 1998, no. 5. Pp. 144–151 (In Russian).
3. *Salov A.G., Gavrilova A.A., Ivanova D.V.* Research of economic characteristics of regional industrial complex by methods of static and model analysis // Nauchnoe obozrenie. 2015. № 15. Pp. 327–332 (In Russian).
4. *Salov A.G., Gavrilova A.A., Knyazev P.A., Kruglov V.A.* Simulation modeling of generating complex activity on the basis of three-factor production function // Vestnik SGASU Stroitel'stvo i arhitektura: nauchno-tekhnicheskij zhurnal. 2016. № 3. Pp. 140–145 (In Russian).
5. *Diligenskij N.V., Capenko M.V.* Mathematical modeling and generalized estimation of efficiency of production and economic systems // Problemy upravleniya i modelirovaniya v slozhnyh sistemah. Samara, SNC RAN, 2004. P. 96–106 (In Russian).
6. SP 124.13330.2012. Thermal networks: svod pravil: utv. MinRegionom Rossii 30.06.2012: vzamen SNiP 41-02-2003: srok vved. v d. 01.01.2013 / MinRegion Rossii. – Izd. ofic. – Moskva: MinRegion Rossii, 2012. 73 p.
7. ZHilishchnoe hozyajstvo i bytovoe obsluzhivanie naseleniya v Rossii [Housing and consumer services in Russia] // Sbornik Rosstat. – www.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat_main/rosstat/ru/statistics/publications/catalog/doc_1138887300516 (accessed September 5, 2018).
8. *Volkova V.N., Denisov A.A.* Osnovy teorii sistem i sistemnogo analiza [Fundamentals of systems theory and system analysis]. St. Petersburg, Izdatel'stvo SPbGTU. 2004. 520 pp. (In Russian).
9. *Dorohov A.N., Kernozhickij V.A., Mironov A.N., Shestopalova O.L.* Obespechenie nadyozhnosti slozhnyh tekhnicheskikh sistem: Uchebnik [Ensuring the reliability of complex technical systems: Textbook]. Saint-Petersburg, Izdatel'stvo «Lan'», 2011. 352 p. (In Russian).

10. *Rudenko Yu.N., Ushakov I.A.* Nadyozhnost' sistem ehnergetiki. 2-e izd., pererab. i dop. [reliability of energy systems. 2nd edition., revised and expanded]. Novosibirsk, Nauka. Sibirskoe otdelenie, 1989. 328 p.
11. *Balakirev V.S.* Nadyozhnost' sistem avtomatizacii: uchebnoe posobie. 2-e izd., ispr.[Reliability of automation systems: tutorial. 2nd edition, revised]. Saratov, Saratov state technical university, 2006. 146 p.
12. *Diligenskij N.V., Gavrilova A.A., Capenko M.B.* Postroenie i identifikaciya matematicheskikh modelej proizvodstvennyh sistem: Uchebnoe posobie [Construction and identification of mathematical models of production systems: Tutorial]. Samara, OOO «Ofort», 2005. 126 pp. (In Russian).