

Вестник
Самарского
Государственного
Технического
Университета

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ
Издается с августа 1993 г.
Выходит 4 раза в год
Июнь – 2020

Серия

«ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ»

Т. 28, № 2 (66) – 2020

Учредитель – ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»

Главный редактор серии Э.Я. Рапопорт (д.т.н., проф.)

Отв. секретарь серии И.Г. Минакова

Редакционная коллегия:

А.М. Абакумов (д.т.н., проф.)

Е. Вааке (проф., Германия)

В.И. Батищев (д.т.н., проф.)

Л.С. Зимин (д.т.н., проф.)

Л.С. Казаринов (д.т.н., проф.)

О.С. Колосов (д.т.н., проф.)

П.К. Кузнецов (д.т.н., проф.)

В.И. Лачин (д.т.н., проф.)

М.Ю. Лившиц (д.т.н., проф.)

S. Luri (проф., Италия)

V. Naske (проф., Германия)

С.П. Орлов (д.т.н., проф.)

Л.Д. Певзнер (д.т.н., проф.)

Ю.Э. Плешивцева (д.т.н., проф.)

В.К. Тянь (д.т.н., проф.)

M. Forzan (проф., Италия)

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

Вестник Самарского государственного технического университета
Серия «Технические науки» (Т. 28, № 2 (66) – 2020)

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

Редактор Г. В. Загребина
Компьютерная верстка И. Г. Минакова

Свидетельство о регистрации
ПИ №ФС 77-64449 от 31.12.2015.

Подписано в печать 19.06.20
Выход в свет 30.07.20

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

Формат 70 × 108^{1/16}.
Усл. печ. л. 18,3 п.л.
Уч.-изд. л. 17,5 п.л.
Тираж 500 экз. Рег. № 105/20.
Заказ №290.

Телефон: (846) 337 0342
E-mail: vest_teh@samgtu.ru
Факс: (846) 278 44 40

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

Журнал включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ).

Журнал включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук по следующим группам научных специальностей: 05.13.00 – Информатика, вычислительная техника и управление; 05.11.00 – Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы; 05.09.00 – Электротехника.

Полнотекстовый доступ к статьям журнала осуществляется на сайте научной электронной библиотеки eLIBRARY.RU (<http://elibrary.ru>)
и на сайте <https://journals.eco-vector.com/1991-8542/>

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

© Авторы, 2020

© Самарский государственный
технический университет, 2020

ФЗ № 436-ФЗ	Издание не подлежит маркировке в соответствии с п. 1 ч. 2 ст. 1
----------------	--

Цена свободная

Vestnik of Samara State Technical University

SCIENTIFIC JOURNAL

Published since August 1993

Four Issues a Year

June – 2020

Technical Sciences Series

2020, vol. 28, issue 2 (66)

Founder – Samara State Technical University

Editor-in-Chief of Series E.Y. Rapoport (Dr. Techn. Sci., Prof.)

Executive Secretary of Series I.G. Minakova

Editorial board

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

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

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

L. S. Zimin (Dr. Techn. Sci., Prof.)

L.S. Kazarinov (Dr. Techn. Sci., Prof., South Ural State University)

O.S. Kolosov (Dr. Techn. Sci., Prof., Moscow Power Engineering Institute)

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

V.I. Lachin (Dr. Techn. Sci., Prof., South-Russian State Technical University (NPI))

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

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

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

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

L.D. Pevzner (Dr. Techn. Sci., Prof., Moscow State Mining University)

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

V.K. Tian (Dr. Techn. Sci., Prof.)

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

Edited by G. V. Zagrebina
Compiled and typeset by I. G. Minakova

The Editorial Board Address:

Dept. of Automatic and Control in Technical Systems

Samara State Technical University

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

Phone: +7(846) 337 03 42

E-mail: vest_teh@samgtu.ru

Printed at the Samara State Technical University Press

The journal is included in the Russian Science Citation Index.

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

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

The subscription index in Rospechat catalogue 18106

ISSN 1991-8542

СОДЕРЖАНИЕ

Информатика, вычислительная техника и управление

<i>Батищев В.И., Золин А.Г.</i> Исследование алгоритма восстановления сигналов в базисе экспоненциальных функций.....	6
<i>Денисов В.Ю.</i> Формирование допусков диаметра изолированной жилы, обеспечивающих гарантированное достижение требуемых показателей качества симметричного кабеля связи (LAN-кабеля).....	22
<i>Ильина Н.А.</i> Двухканальное оптимальное по быстродействию управление процессом индукционного нагрева с учетом фазового ограничения на максимальную температуру.....	41
<i>Лысенко Д.С., Данилушкин И.А.</i> Динамическая модель котла-утилизатора на базе рекуррентной нейронной сети.....	59

Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы

<i>Песков А.В.</i> Особенности измерения абсолютной проницаемости горных пород.....	73
<i>Яшин В.Н.</i> Оценка метрологической надежности средств измерений с использованием метода производящих функций.....	84

Электротехника

<i>Базаров А.А., Данилушкин А.И., Животягин Д.А.</i> Система методического индукционного нагрева цилиндрических заготовок из сплавов алюминия.....	97
<i>Романов В.С., Гольдштейн В.Г.</i> К вопросу о повреждаемости, обслуживании и ремонтах погружного электрооборудования нефтедобычи...	111

Информатика, вычислительная техника и управление

УДК 004.63

ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМА ВОССТАНОВЛЕНИЯ СИГНАЛОВ В БАЗИСЕ ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНЫХ ФУНКЦИЙ¹

В.И. Батищев, А.Г. Золин

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244
E-мэйл: zolin.a.g@gmail.com

Аннотация. Предложен метод построения цифровых фильтров для решения обратных задач восстановления сигналов, временных рядов и изображений с использованием аппроксимационного подхода. Рассмотренные обратные задачи относятся к классу некорректно поставленных и требуют использования определенных регуляризующих процедур для синтеза оптимальных алгоритмов реконструкции и решения связанных с этим вычислительных проблем.

В связи с этим предложен метод построения аппроксимационной модели весовой функции обратного (восстанавливающего) фильтра на основе критерия минимума квадратической погрешности рассогласования модели искаженного сигнала, полученного после обработки прямым (искажающим) фильтром модели восстановленного (неизвестного) сигнала и имеющегося исходного искаженного сигнала. Весовая функция прямого фильтра предполагается известной.

Сформулирована постановка задачи восстановления сигналов, временных рядов и изображений в случае одномерной функции рассеяния точки. Представлен алгоритм, позволяющий снизить объем вычислений при нахождении значений весовой функции обратного фильтра.

Проведена апробация алгоритмов на модельных примерах при обработке реальных изображений, полученных при дистанционном зондировании Земли, а также на специально сформированных контрастных изображениях. Для количественной оценки качества восстановления использовалась относительная среднеквадратическая мера различия эталонного и восстановленного сигналов (изображений). Приведенные результаты апробации показывают, что использование данного подхода позволяет уменьшить погрешность восстановления, что дает преимущество при решении задачи аппроксимации и восстановления данных.

Ключевые слова: КИХ-фильтр, весовая функция, обратный фильтр, реконструкция смазанных изображений.

¹ Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ (проекты 18-08-253а, 19-08-00228а).

Батищев Виталий Иванович (д.т.н., проф.), профессор кафедры «Информационные технологии».

Золин Алексей Георгиевич (к.т.н., доц.), доцент кафедры «Информационные технологии».

Введение

В технических приложениях, связанных с проведением экспериментальных исследований при решении задач обработки и интерпретации экспериментальных данных, часто возникает необходимость рассмотрения обратной задачи, заключающейся в восстановлении неизвестного входного воздействия по результатам регистрации откликов на выходе средств измерения.

В большинстве случаев это задача компенсации искажающего действия аппаратной функции, обеспечивающая улучшение разрешающей способности различного рода измерительных приборов и систем [1, 2]. В случае, когда для обработки доступна только часть искаженного сигнала, без начальных условий, задача становится недоопределенной и, соответственно, некорректно поставленной [3, 4].

Решение таких задач требует методов регуляризации, базирующихся на привлечении априорной информации о решении, которая может быть как качественной (неотрицательность и гладкость решения), так и количественной [5, 6, 7]. Общим фундаментальным свойством методов регуляризации является их ориентация на принципиально смещенные решения. Это же свойство является фундаментальным для аппроксимационных методов, имеющих явные перспективы в решении различного рода обратных задач [8, 9], в том числе и задач восстановления сигналов [10, 11, 12]. На основе обобщенных принципов получения информации об исследуемых объектах экспериментальным путем по результатам измерений аппроксимационный подход к восстановлению сигналов позволяет использовать аналитические модели функциональных характеристик этих объектов, выбранных на основе априорной информации с учетом целей получения того или иного результата.

Постановка задачи

В общем случае искаженный сигнал $x_{см}(m)$ может быть представлен как свертка значений исходного сигнала $x_{исх}(m)$ с известной весовой функцией прямого (искажающего) фильтра h_0 :

$$x_{см}(m) = \sum_{i=0}^{N_0-1} h_0(i)x_{исх}(m-i), \quad (1)$$

здесь N_0 – величина весовой функции фильтра, представляет собой количество значений h_0 .

Задача реконструкции полученного с помощью (1) сигнала сводится к нахождению функции $x_{вст}(m)$, в некотором роде близкой к $x_{исх}(m)$, по имеющимся значениям $x_{см}(m)$. Данная задача представляет собой обратную задачу. Отсутствие начальных значений $x_{см}(m)$ переводит данную задачу в класс некорректно поставленных.

В данной статье рассматривается подход, основанный на построении весовой функции обратного (восстанавливающего) фильтра и применении этого фильтра к имеющемуся искаженному сигналу. Предлагаемое решение опирается на построение аппроксимационной модели восстановленного сигнала, который в точности нам неизвестен. Как известно, применение аппроксимационных подходов для конкретных практических задач связано с выбором вида базисных функций и определением критерия адекватности модели. В данной работе используется базис экспоненциальных функций:

$$y = \exp(-a \cdot x).$$

Применение других видов базисных функций в задачах восстановления сигналов (полиномиальных, тригонометрических) рассмотрено, например, в [13]. Построение аппроксимационных моделей на базисе стохастических функций при решении задач восстановления сигналов и изображений описано в [12].

В представляемом подходе в качестве критерия адекватности модели используется минимум квадратической погрешности рассогласования исходного искаженного сигнала и некоторого сигнала, полученного при использовании прямого (искажающего) фильтра к аппроксимационной модели восстановленного (неизвестного) сигнала. Весовая функция прямого фильтра предполагается известной.

Также на практике используются и другие критерии адекватности; так, например, синтез обратных фильтров на основе критерия моментов представлен в [13], а синтез нелинейных адаптивных фильтров для решения обратных задач восстановления сигналов – в [14].

Решением задачи восстановления сигнала будем считать нахождение функции $h(i)$, представляющей собой весовую функцию обратного фильтра, позволяющего получить с помощью операции свертки оценку восстановленного сигнала $x_{всм}(m)$:

$$x_{всм}(m) = \sum_{i=0}^{N-1} h(i)x_{см}(m-i). \quad (2)$$

Представим оценку восстановленного сигнала в виде следующей модели:

$$x_{всм}^M = \sum_{v=0}^p C_v \exp(-a \cdot m(v+1)), \quad (3)$$

где p – порядок модели;
 C_v – параметры модели;
 a – коэффициент, связанный с шагом дискретизации.

Подставив $x_{всм}^M(m)$ в (2), получим выходной сигнал прямого фильтра в виде

$$x_{см}^M = \sum_{v=0}^p C_v \mu(v) \exp(-am(v+1)), \quad (4)$$

где

$$\mu(v) = \sum_{k=0}^{N_0-1} h_0(k) \exp(ak(v+1)).$$

Связь погрешности восстановления сигнала с квадратичной погрешностью

Значения C_v будем определять по выборке $\{y_i\}$, $i=0, \dots, N-1$ на основе обеспечения минимума квадратической погрешности:

$$E = \sum_{i=m-N+1}^m (x_{см}^M(i) - x_{см}(i))^2 = \sum_{i=0}^{N-1} (x_{см}^M(m-i) - x_{см}(m-i))^2. \quad (5)$$

Значение погрешности E зависит от величин C_0, \dots, C_p .

Для обеспечения минимума этого значения должно быть выполнено условие

$$\frac{dE}{dC_k} = 0, k = \overline{0, p}.$$

С учетом (3) это условие примет вид

$$\sum_{i=0}^{N-1} (x_{cm}^M(m-i) - x_{cm}(m-i)) \frac{dx_{cm}^M(m-i)}{dC_k} = 0, k = \overline{0, p}. \quad (6)$$

Подставив сюда $x_{cm}^M(m-i)$ из (4), получим следующее выражение:

$$\begin{aligned} & \sum_{v=0}^p C_v \mu(v) \sum_{i=0}^{N-1} \exp(-a(v+k+2)(m-i)) = \\ & = \sum_{i=0}^{N-1} x_{cm}(m-i) \exp(-a(k+i)(m-i)), k = \overline{0, p}. \end{aligned} \quad (7)$$

Левую и правую части системы (7) умножим на $\exp(am(k+1))$ и приведем ее к виду

$$\begin{aligned} & \sum_{v=0}^p C_v \mu(v) \exp(-am(v+1)) B(k+v) = \\ & = \sum_{i=0}^{N-1} x_{cm} \exp(ai(k+1)), k = \overline{0, p}, \end{aligned} \quad (8)$$

где

$$B(n) = \frac{1 - \exp(aN(n+2))}{1 - \exp(a(n+2))}, n = \overline{0, 2p}. \quad (9)$$

Введем следующее обозначение:

$$A_v(m) = C_v \exp(-am(v+2)). \quad (10)$$

С учетом этого модель (3) будет выглядеть так:

$$x_{bcm}^M(m) = \sum_{v=0}^p A_v(m), \quad (11)$$

а система уравнений (8) примет вид

$$\begin{aligned} & \sum_{v=0}^p \mu(v) A_v(m) B(k+v) = \\ & = \sum_{i=0}^{N-1} x_{cm}(m-i) \exp(ai(k+1)), k = \overline{0, p}. \end{aligned} \quad (12)$$

Синтез обратного фильтра по минимуму квадратичной погрешности

Обозначим элементы матрицы, обратной матрице коэффициентов $B(k+v)$ системы (12), как $\beta(n_1, n_2)$. Тогда решение системы уравнений будет таким:

$$A_v(m) = \frac{1}{\mu(v)} \sum_{i=0}^{N-1} x_{cm}(m-i) \sum_{k=0}^p \beta(v,k) \exp(ai(k+1)), \quad v = \overline{0, p}. \quad (13)$$

Подставив $A_v(m)$ из (13) в (10), получим формулу восстановления исходного сигнала:

$$x_{всм}^M(m) = \sum_{i=0}^{N-1} h(i) x_{cm}(m-i), \quad (14)$$

где

$$h(i) = \sum_{v=0}^p \frac{1}{\mu(v)} \sum_{k=0}^p \beta(v,k) \exp(ai(k+1)). \quad (15)$$

Здесь $h(i)$ – весовая функция обратного (восстанавливающего) фильтра.

Представленный способ построения весовой функции обратного фильтра требует определить элементы обратной матрицы коэффициентов $\beta(n_1, n_2)$. Для выполнения этой процедуры был разработан более простой, с точки зрения реализации и объемов вычислений, алгоритм. Найдем коэффициенты $K(n_1, n_2)$, которые вычислим по следующей формуле:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Psi(k, v) = B(k+v) - \sum_{q=0}^{v-1} K(v, q) \Psi(k, q) \\ K(k, v) = \frac{\Psi(k, v)}{\Psi(v, v)} \\ v = \overline{0, k} \\ k = \overline{0, p} \end{array} \right. \quad (16)$$

Используя полученные коэффициенты, получим выражение для нахождения весовой функции обратного фильтра:

$$\left\{ \begin{array}{l} g(m, m) = 1 \\ g(m, q) = - \sum_{k=q+1}^m g(m, k) K(k, q) \\ q = \overline{m-1, 0} \\ h(i) = \sum_{k=0}^p \exp(ai(k+1)) \sum_{q=k}^p \frac{g(q, k)}{\Psi(q, q)} \sum_{v=0}^q \frac{g(q, v)}{\mu(v)} \end{array} \right. \quad (17)$$

Апробация результатов

Одним классом задач восстановления сигналов являются задачи восстановления смазанных и расфокусированных изображений [15, 16, 17]. Так, в системах дистанционного зондирования Земли, используемых в том числе в космических исследованиях, изображение формируется с помощью устройств с зарядовой связью, работающих в режиме временной задержки и накопления оптического сигнала. Эксплуатация таких приборов требует, чтобы скорость космического аппарата была точно согласована с периодом опроса светочувствительной матрицы. На практике такое равенство может нарушаться из-за погрешностей вычисления

скорости спутника [18]. В результате изображение подстилающей поверхности оказывается смазанным вдоль траектории движения летательного аппарата. Конструктивные особенности светочувствительных элементов позволяют получить параметры функции рассеяния точки, являющейся в нашем случае весовой функцией прямого фильтра. Способы определения параметров смаза представлены в [19, 20]. Полученные в результате несоответствия скоростей искажения имеют одну пространственную составляющую, что позволяет перейти от двумерной задачи к одномерной и существенно снизить объем вычисляемых данных. Решение двумерной задачи восстановления смазанного изображения представлено, например, в [21].

Апробация алгоритма проводилась на двух типах изображений: на изображениях, полученных в процессе дистанционного зондирования Земли, и на специально созданных контрастных изображениях для проверки поведения алгоритмов в условиях резкого перепада яркостей. В случае с первым типом изображений из-за конструктивных особенностей регистрирующего аппарата полученные данные имеют 1024 градации серого, что в 4 раза выше значений, принятых в распространенных форматах хранения графических файлов на персональных компьютерах. Для согласованности результатов измерений контрастные изображения были сформированы в том же формате. Пример тестового эталонного изображения, полученного в результате дистанционного зондирования Земли, показан на рис. 1, пример контрастного изображения приведен на рис. 2.



Рис. 1. Эталонное изображение участка Земли

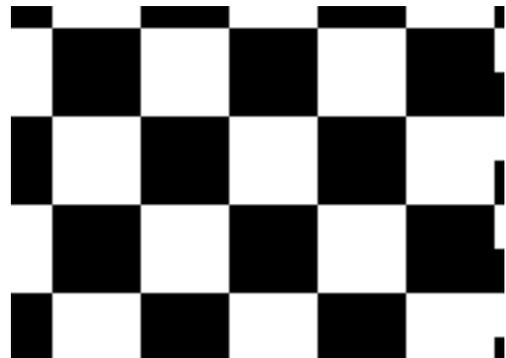


Рис. 2. Контрастное изображение

Каждая строка тестового изображения была обработана по формуле (1) фильтрами с весовыми функциями:

$$h_0(i) = \frac{1}{N_0}, \quad i = \overline{0, N_0 - 1}; \quad (18)$$

$$h_0(i) = \frac{ki + b}{N_0(b + 0,5k(N_0 + 1)) - k}, \quad i = \overline{0, N_0 - 1}; \quad (19)$$

$$h_0(i) = \frac{-ki + b}{N_0(b - 0,5k(N_0 + 1)) + k}, \quad i = \overline{0, N_0 - 1}. \quad (20)$$

Схематичное изображение весовых функций из формул (18), (19), (20) приведено на рис. 3.

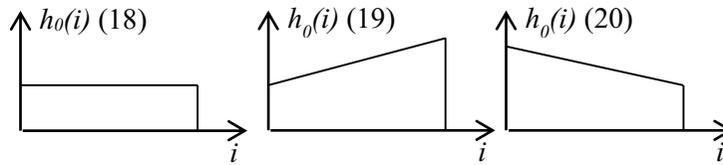


Рис. 3. Схематичное изображение весовых функций из формул (18), (19), (20)

Таким образом, было выполнено размытие изображения вдоль горизонтальной оси на различное количество пикселей $N_0 = 3, 4, 5, \dots, 10$. Для весовых функций (19) и (20) брались следующие значения: $k=0.2, b = 1.0$.

В ходе проведения экспериментов были предприняты попытки восстановления по алгоритмам (16), (17) и (14). Для количественной оценки качества восстановления использовалась относительная среднеквадратическая погрешность (ОСП), вычисляемая по формуле

$$ОСП = \sqrt{\frac{\sum_{j=0}^{M-1} (x_{вст}^M(j) - x_{исх}(j))^2}{\sum_{j=0}^{M-1} x_{исх}(j)^2}}, \quad (21)$$

где $x_{исх}(j)$ – значение пикселя строки эталонного изображения;
 $x_{вст}^M(j)$ – значение пикселя строки восстановленного изображения;
 M – количество пикселей в строке.

Поскольку в процессе апробации одновременно есть доступ и к эталонному, и к восстановленному изображению, данный способ позволяет оценить качество исследуемых алгоритмов. Полученная величина показывает степень отклонения результата от исходного изображения. Другие способы оценки качества восстановления изображений приведены, например, в [22].

Значения ОСП смазанных изображений земной поверхности без восстановления приведены в табл. 1.

Таблица 1

ОСП невосстановленных изображений

N_0 \ ОСП	3	4	5	6	7	8	9	10
$h_0(18)$	0,0328	0,0512	0,0694	0,0855	0,0983	0,1082	0,1155	0,121
$h_0(19)$	0,0334	0,0448	0,0584	0,0710	0,0813	0,0895	0,096	0,101
$h_0(20)$	0,0336	0,0587	0,0812	0,1007	0,1161	0,1276	0,1361	0,1421

Анализ представленного в работе алгоритма показывает, что результат восстановления зависит от значений весовых функций прямого и обратного фильтров N, N_0 и порядка модели P . Некоторые значения погрешности восстановления изоб-

ражений земной поверхности с разными видами весовых функций прямого фильтра приведены в табл. 2, 3, 4. Минимальные значения погрешности выделены жирным шрифтом.

Таблица 2

Значение ОСП восстановления в случае весовой функции (18)

$N_0=5$										
$N \backslash P$	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
16	0.038	0.058	0.057	0.056	0.055	0.051	0.046	0.035	0.031	0.030
17	0.038	0.058	0.057	0.057	0.368	0.068	0.046	0.032	0.031	0.030
18	0.038	0.057	0.057	0.057	0.066	0.057	0.046	0.036	0.031	0.030
19	0.038	0.057	0.057	0.053	0.051	0.057	0.045	0.035	0.102	0.032
20	0.038	0.057	0.057	0.056	0.055	0.057	0.049	0.070	0.116	0.029
$N_0=6$										
$N \backslash P$	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
16	0.064	0.063	0.060	0.057	0.054	0.060	0.049	0.040	0.041	0.039
17	0.063	0.063	0.068	0.178	0.058	0.060	0.050	0.040	0.040	0.039
18	0.063	0.063	0.061	0.053	0.055	0.060	0.050	0.040	0.041	0.103
19	0.063	0.063	0.062	0.051	0.055	0.060	0.052	0.115	0.051	0.038
20	0.063	0.063	0.06	0.052	0.055	0.058	0.070	0.129	0.045	0.038
$N_0=7$										
$N \backslash P$	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
10	0.052	0.048	0.047	0.045	0.061	0.046	0.046	0.050	0.079	0.068
11	0.051	0.048	0.047	0.052	0.053	0.047	0.046	0.053	0.065	0.273
12	0.052	0.057	0.056	0.065	0.053	0.046	0.043	0.047	0.043	0.067
13	0.051	0.050	0.050	0.053	0.055	0.046	0.044	0.046	0.046	0.054
14	0.052	0.053	0.050	0.054	0.052	0.046	0.043	0.043	0.044	0.077

Таблица 3

Значение ОСП восстановления в случае весовой функции (19)

$N_0=5$										
$N \backslash P$	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
22	0.111	0.448	0.225	0.173	0.148	–	0.141	0.183	0.243	0.318
23	1.506	0.336	0.255	0.166	0.165	–	0.116	0.180	0.241	0.313

24	0.134	0.217	0.066	0.187	0.154	–	0.163	0.174	0.247	0.315
25	0.225	0.304	0.076	0.184	0.166	–	0.183	0.168	0.240	0.321
26	1.124	0.220	0.394	0.166	0.154	–	0.183	0.179	0.211	0.313
$N_0=6$										
$N \backslash P$	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
15	0.497	1.274	0.260	0.291	0.252	–	0.313	0.276	0.327	0.406
16	2.200	0.077	0.288	0.289	0.249	–	0.207	0.249	0.320	0.407
17	3.913	0.384	0.313	0.268	0.302	–	0.188	0.245	0.349	0.406
18	0.307	0.408	0.428	0.251	0.268	–	0.248	0.251	0.349	0.404
19	0.750	0.472	0.339	0.444	0.233	–	0.247	0.244	0.349	0.408
$N_0=7$										
$N \backslash P$	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
14	0.864	0.679	0.352	0.357	0.347	–	0.199	0.340	0.423	0.495
15	0.867	1.343	0.355	0.390	0.349	–	0.407	0.366	0.418	0.495
16	1.617	0.094	0.384	0.387	0.346	–	0.296	0.341	0.412	0.496
17	4.035	0.484	0.410	0.366	0.404	–	0.275	0.337	0.441	0.495
18	0.765	0.501	0.522	0.348	0.367	–	0.341	0.343	0.441	0.493

Таблица 4

Значение ОСП восстановления в случае весовой функции (20)

$N_0=5$										
$N \backslash P$	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
27	0.252	0.244	0.183	0.118	0.066	–	0.120	0.083	0.132	0.223
28	0.885	0.130	0.161	0.122	0.080	–	0.171	0.101	0.139	0.258
29	0.132	0.359	0.165	0.132	0.030	–	0.043	0.084	0.132	0.214
30	0.128	0.436	0.185	0.093	0.078	–	0.043	0.076	0.071	0.268
31	0.083	0.263	0.134	0.093	0.050	–	0.088	0.082	0.143	0.261
$N_0=6$										
$N \backslash P$	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

32	0.080	0.241	0.392	0.141	0.144	–	0.138	0.182	0.260	0.209
33	0.068	0.251	0.204	0.139	0.099	–	0.113	0.137	0.261	0.178
34	0.067	0.267	0.173	0.145	0.151	–	0.117	0.155	0.244	0.304
35	0.510	0.419	0.219	0.157	0.155	–	0.111	0.123	0.237	0.309
36	0.498	0.318	0.298	0.170	0.140	–	0.111	0.130	0.232	0.274
$N_0=7$										
$N \backslash P$	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
14	0.160	0.198	0.276	0.354	0.430	0.397	0.578	0.633	0.722	0.765
15	0.261	0.225	0.271	0.355	0.463	0.079	0.588	0.724	0.704	0.763
16	0.165	0.200	0.264	0.356	0.432	0.074	0.484	0.653	0.708	0.765
17	0.154	0.197	0.294	0.354	0.147	0.518	0.451	0.628	0.705	0.765
18	0.198	0.202	0.294	0.352	0.399	0.491	0.527	0.628	0.712	0.810

Графики зависимости ОСП от N при различных N_0 и P в случае минимальной погрешности показаны на рис. 4, а график зависимости от P – на рис. 5. Эти графики приведены для случая весовой функции прямого фильтра (18).

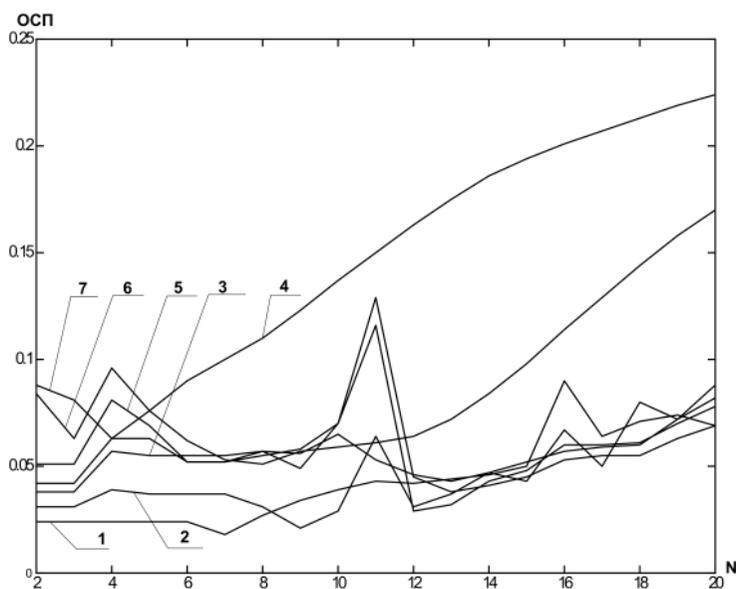


Рис. 4. Зависимость ОСП от N при заданных N_0 и P :
 1 – $N_0=3, P=14$; 2 – $N_0=4, P=19$; 3 – $N_0=5, P=20$; 4 – $N_0=6, P=20$;
 5 – $N_0=7, P=12$; 6 – $N_0=8, P=4$; 7 – $N_0=9, P=2$

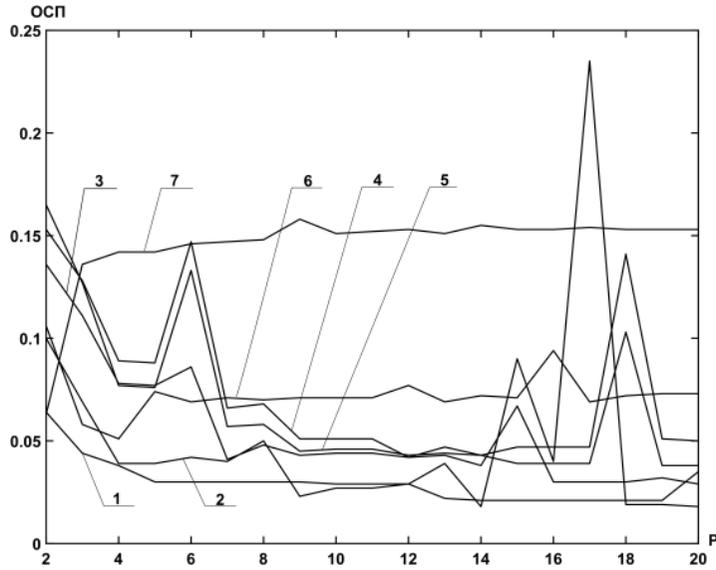


Рис. 5. Зависимость ОСП от P при заданных N_0 и N :
 1 - $N_0=3, N=7$; 2 - $N_0=4, N=9$; 3 - $N_0=5, N=12$; 4 - $N_0=6, N=13$;
 5 - $N_0=7, N=13$; 6 - $N_0=8, N=8$; 7 - $N_0=9, N=4$.

На рис. 6 представлен график зависимости ОСП от N при различных N_0 и P в случае минимальной погрешности для случая весовой функции прямого фильтра (18).

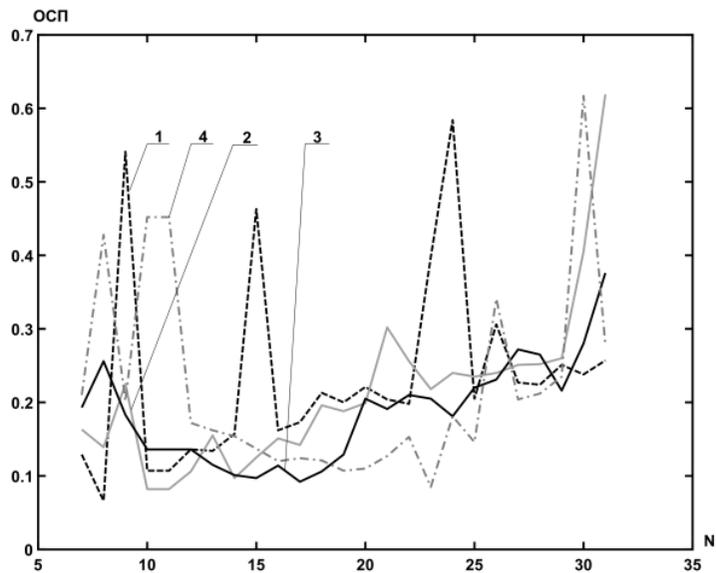


Рис. 6. Зависимость ОСП от N :
 1 - $N_0=3, P=27$; 2 - $N_0=4, P=33$; 3 - $N_0=5, P=40$; 4 - $N_0=6, P=38$;

Результаты восстановления контрастного изображения (см. рис. 2) для случая весовой функции прямого фильтра (18) представлены в табл. 5. Однако для получения представления работы алгоритма на контрастном изображении рассмотрим

вид полученного восстановленного сигнала (рис. 7). Из рисунка видно, что большой вклад в погрешность вносят выбросы на границах перепада яркостей, но далее алгоритм формирует сигнал с низким значением ОСП. Погрешность восстановления в этом случае можно несколько уменьшить; учитывая, что максимальные и минимальные значения пикселя изображения не должны выходить из интервала $[0; 1023]$, явно заменим выходящие за диапазон величины на 0 и 1023.

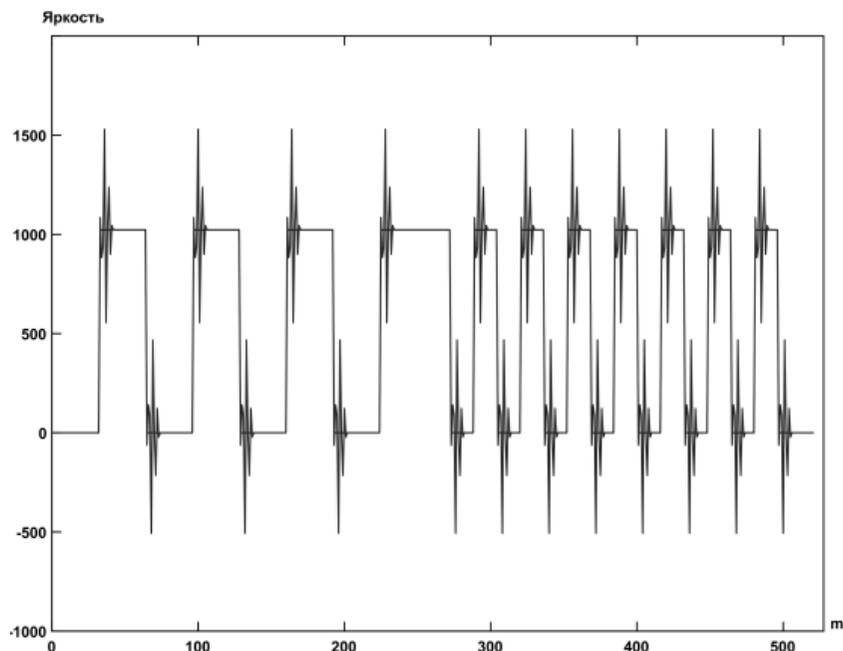


Рис. 7. Фрагмент восстановленной строки контрастного изображения

Таблица 5

Значение ОСП восстановления контрастного изображения

		$N_0=5$									
$N \backslash P$		5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
24		0.095	0.118	0.146	0.072	0.099	–	0.112	0.128	0.181	0.162
25		0.092	0.118	0.072	0.070	0.094	–	0.158	0.115	0.170	0.156
26		0.092	0.118	0.129	0.068	0.535	–	0.107	0.132	0.107	0.162
27		0.095	0.118	0.129	0.066	0.541	–	0.107	0.136	0.134	0.157
28		0.088	0.118	0.130	0.069	0.457	–	0.110	0.134	0.156	0.155
		$N_0=6$									
$N \backslash P$		4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
31		0.150	0.150	0.160	0.140	0.189	–	0.083	0.108	0.092	0.108

32	0.133	0.133	0.162	0.139	0.226	–	0.082	0.110	0.110	0.097
33	0.136	0.136	0.163	0.139	0.225	–	0.082	0.106	0.155	0.097
34	0.136	0.136	0.168	0.139	0.196	–	0.083	0.129	0.091	0.111
35	0.137	0.137	0.164	0.139	0.120	–	0.082	0.117	0.111	0.098
$N_0=7$										
$N \backslash P$	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
14	0.156	0.139	0.137	0.107	0.102	0.106	0.099	0.115	0.127	0.167
15	0.156	0.139	0.137	0.164	0.121	0.109	0.097	0.108	0.126	0.115
16	0.156	0.139	0.156	0.105	0.114	0.098	0.095	0.114	0.156	0.103
17	0.164	0.137	0.136	0.138	0.114	0.101	0.097	0.139	0.092	0.103
18	0.183	0.137	0.136	0.136	0.115	0.101	0.097	0.114	0.092	0.106

Выводы

На основе анализа известных подходов к синтезу оптимальных алгоритмов реконструкции сигналов, основанных на использовании регуляризующих процедур при решении некорректных обратных задач и связанных с этим вычислительных проблем, предложен метод построения цифровых фильтров для решения обратных задач восстановления сигналов, временных рядов и изображений с использованием аппроксимационного подхода.

Сформулирована постановка задачи восстановления сигналов, временных рядов и изображений в случае одномерной функции рассеяния точки. Представлен алгоритм, позволяющий снизить объем вычислений при нахождении значений весовой функции обратного фильтра.

Проведена апробация алгоритмов на модельных примерах при обработке реальных изображений, полученных при дистанционном зондировании Земли, а также на специально сформированных контрастных изображениях. Для количественной оценки качества восстановления использовалась относительная среднеквадратическая мера различия эталонного и восстановленного сигналов (изображений). Приведенные результаты апробации показывают, что использование данного подхода позволяет уменьшить погрешность восстановления, что дает преимущество при решении задач аппроксимации и восстановления данных.

Приведенные результаты апробации (см. табл. 2, 3, 4, 5) показывают, что использование данного подхода позволяет уменьшить погрешность восстановления и аппроксимации. Наибольшее преимущество при решении задач аппроксимации и восстановления данных представленный подход демонстрирует в случае весовой функции прямого фильтра типа (18). В настоящее время ведутся исследования, направленные на снижение погрешности восстановления сигналов, имеющих точки разрыва.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Клебанов Я.М., Карсаков А.В., Хонина С.Н., Давыдов А.Н., Поляков К.А. Компенсация аберраций волнового фронта в телескопах космических аппаратов с регулировкой температурного поля телескопа // Компьютерная оптика, 2017, том 41. №1. С. 30-36.

2. Tokovinin, A. DONUT: measuring optical aberrations from a single extrafocal image / A. Tokovinin, S. Heathcote // Publications of the Astronomical Society of the Pacific. – 2006. – Vol. 118(846). Pp. 1165-1175.
3. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. - М.: Наука, 1979.
4. Engl H.W., Hanke M., Neubauer A. Regularization of Inverse Problems. – Dordrecht, Kluwer Acad. Publ., 1996. 322 p.
5. Сизиков В.С. Математические методы обработки результатов измерений. СПб.: Политехника, 2001. 240 с.
6. Тихонов А.Н., Гончарский А.В., Степанов В.В., Ягола А.Г. Регуляризирующие алгоритмы и априорная информация. М.: Наука, 1983. 200 с.
7. Апарцина А.С., Солодуша С.В., Таиров Э.А. Математические модели нелинейной динамики на базе рядов Вольтерра и их приложения // Изв. РАЕН. Сер. МММИУ. 1997. Т. 1. №2. С. 115-125.
8. Ганеев Р.М. Математические модели в задачах обработки сигналов. М.: Горячая линия - Телеком, 2002. 83 с.
9. Батищев В.И. Аппроксимационный подход к обработке и интерпретации результатов рентгенодифрактометрических экспериментов // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Тр. VII Междунар. конф. Самара: Самар. науч. центр РАН. 2005. С. 197-202.
10. Батищев В.И., Волков И.И., Золин А.Г. Синтез фильтров для восстановления смазанных изображений с использованием методов регуляризации // Проблемы управления и моделирования в сложных системах (ПУМСС-2013): Труды XV Международной конференции, ИПУСС РАН, Самара, 2013. С. 615-618.
11. Батищев В.И., Золин А.Г., Косарев Д.Н., Романеев А.Е. Аппроксимационный подход к решению обратных задач анализа и интерпретации экспериментальных данных // Вестник СамГТУ, сер. Технические науки. 2006, вып. №40. С. 57-65.
12. В.И. Батищев, И.И. Волков, А.Г. Золин. Использование стохастического базиса в задачах восстановления сигналов и изображений // Автометрия, 2017. №4. С. 127-134.
13. Батищев В.И., Волков И.И., Золин А.Г. Синтез цифровых КИХ-фильтров для решения задач восстановления сигналов с использованием критерия моментов // Вестник СамГТУ, сер. Технические науки. 2012. №36. С. 98-105.
14. Батищев В.И., Волков И.И., Золин А.Г. Синтез нелинейных адаптивных ких-фильтров для решения обратных задач восстановления сигналов // Вестник СамГТУ, сер. Технические науки. 2014. №43. С. 17-22.
15. Василенко Г.И., Тараторин А.М. Восстановление изображений. М.: Радио и связь. 1986. 304 с.
16. Сизиков В.С., Римских М.В., Мирджамолов Р.К. Реконструкция смазанных и зашумленных изображений без использования граничных условий // Оптический журнал. 2009. Т. 76. № 5. С. 38-46.
17. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений 3-е издание, исправленное и дополненное. — М.: Техносфера, 2012. 1104 с.
18. Кузнецов П.К., Семавин В.И., Солодуха А.А. Алгоритм компенсации скорости смаза изображения подстилающей поверхности, получаемого при наблюдении Земли из космоса // Вестник Сам. ГТУ, 2005. №37. С. 150-157
19. Егошкин Н.А., Еремеев В.В. Коррекция смаза изображений в системах космического наблюдения земли // Цифровая обработка сигналов. 2010. №4. С. 28-32.
20. Кузнецов П.К., Мартельянов Б.В., Мятлов Г.Н., Юдаков А.А. Методика вычисления оценок параметров смаза изображений, получаемых целевой аппаратурой КАН типа "Ресурс" // 7-я международная научно-техническая конференция К.Э. Циолковский - 160 лет со дня рождения. Космонавтика. Радиоэлектроника. Геоинформатика" Год издания: 2017. Рязань С. 344-350.
21. Волков И.И., Золин А.Г. Решение двумерной обратной задачи восстановления смазанного изображения // Вестник СамГТУ, сер. Технические науки. 2013. №39. С. 223-226.
22. Avcibas I., Sankur B., Sayood K. Statistical evaluating of image quality measures // Journal of Electronic Imaging. April 2002. Vol.11. № 2. Pp. 206-223.

Статья поступила в редакцию 10 марта 2020 г.

RESEARCH ALGORITHM RESTORING SIGNALS IN THE BASIS OF EXPONENTIAL FUNCTIONS

V.I. Batishchev, A.G. Zolin

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

Abstract. *The paper proposes a method for constructing digital filters for solving inverse problems of recovering signals, time series, and images using an approximation approach. The considered inverse problems belong to the class of incorrectly posed ones and require the use of certain regularizing procedures to synthesize optimal reconstruction algorithms and solve computational problems associated with this.*

In this regard, a method is proposed for constructing an approximation model of the weight function of the inverse (reconstruction) filter, based on the criterion of the minimum quadratic error of the mismatch of the distorted signal model obtained after the direct (distorting) filter processes the reconstructed (unknown) signal and the existing distorted signal. The weight function of the direct filter is assumed to be known.

The statement of the problem of reconstructing signals, time series, and images in the case of a one-dimensional point scattering function is formulated. An algorithm is presented that allows one to reduce the amount of computation when finding the values of the weight function of the inverse filter.

The algorithms were tested on model examples when processing real images obtained by remote sensing of the Earth, as well as on specially formed contrast images. To quantify the quality of reconstruction, a relative mean-square measure of the difference between the reference and reconstructed signals (images) was used. The results of testing show that using this approach allows to reduce the error of recovery, which gives an advantage in solving problems of approximation and data recovery.

Keywords: *FIR filter, weight function, reverse filter, reconstruction of blurred images*

REFERENCES

1. *Klebanov Ya.M., Karsakov A.V., KHonina S.N., Davydov A.N., Polyakov K.A.* Kompensatsiya aberratsij volnovoogo fronta v teleskopakh kosmicheskikh apparatov s regulirovkoj tempe-raturnogo polya teleskopa // *Komp'yuternaya optika*. 2017. T. 41. № 1. P. 30–36.
2. *Tokovinin A., Heathcote S.* DONUT: measuring optical aberrations from a single extrafocal image // *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*. 2006. Vol. 118 (846). Pp. 1165–1175.
3. *Tikhonov A.N., Arsenin V.Ya.* Metody resheniya nekorrektnykh zadach. M.: Nauka, 1979.
4. *Engl H.W., Hanke M., Neubauer A.* Regularization of Inverse Problems. Dordrecht, Kluwer Acad. Publ., 1996. 322 p.
5. *Sizikov V.S.* Matematicheskie metody obrabotki rezul'tatov izmerenij. SPb.: Politehnika, 2001. 240 p.
6. *Tihonov A.N., Goncharskij A.V., Stepanov V.V., Yagola A.G.* Regularizuyushchie algoritmy i apriornaya informatsiya. M.: Nauka, 1983. 200 p.
7. *Aparcin A.S., Solodusha S.V., Tairov E.A.* Matematicheskie modeli nelinejnoy dinamiki na baze ryadov Vol'terra i ih prilozheniya // *Izv. RAEN. Ser. MMMIU*. 1997. T. 1. № 2. P. 115–125.
8. *Ganeev P.M.* Matematicheskie modeli v zadachah obrabotki signalov. M.: Goryachaya liniya – Telekom, 2002. 83 p.
9. *Batishchev V.I.* Approksimacionnyj podhod k obrabotke i interpretacii rezul'tatov rentgenodiffrakto-metricheskikh eksperimentov // *Problemy upravleniya i modelirovaniya v slozhnyh sistemah: Tr. VII Mezhdunar. konf. Samara: Samar. nauch. centr RAN*. 2005. P. 197–202.
10. *Batishhev V.I., Volkov I.I., Zolin A.G.* Sintez fil'trov dlya vosstanovleniya smazannykh izobra-zhenij s ispol'zovaniem metodov regularizatsii // *Problemy upravleniya i mode-lirovaniya v*

Vitaly I. Batishchev (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Aleksey G. Zolin (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.

- slozhnykh sistemakh (PUMSS–2013): Trudy XV Mezhdunarodnoj konferentsii, IPUSS RAN. Samara, 2013. P. 615–618.*
11. *Batishhev V.I., Zolin A.G., Kosarev D.N., Romaneev A.E.* Approksimatsionnyj podkhod k resheniyu obratnykh zadach analiza i interpretatsii ehksperimental'nykh dannykh // *Vestnik SamGTU, ser. Tekhnicheskie nauki.* 2006. № 40. P. 57–65.
 12. *Batishhev V.I., Volkov I.I., Zolin A.G.* Ispol'zovanie stokhasticheskogo bazisa v zadachakh vosstanovleniya signalov i izobrazhenij // *Avtometriya.* 2017. № 4. P. 127–134.
 13. *Batishhev V.I., Volkov I.I., Zolin A.G.* Sintez tsifrovyykh KIKH-fil'trov dlya resheniya zadach vosstanovleniya signalov s ispol'zovaniem kriteriya momentov // *Vestnik SamGTU, ser. Tekhnicheskie nauki.* 2012. № 36. P. 98–105.
 14. *Batishhev V.I., Volkov I.I., Zolin A.G.* Sintez fil'trov dlya vosstanovleniya smazannykh izobrazheniy s ispol'zovaniyem metodov regularizatsii // *Problemy upravleniya i modelirovaniya v slozhnykh sistemakh (PUMSS–2013): Trudy XV Mezhdunarodnoj konferentsii, IPUSS RAN. Samara, 2013. P. 615–618.*
 15. *Batishchev V.I., Volkov I.I., Zolin A.G.* Sintez nelinejnykh adaptivnykh kih-fil'trov dlya resheniya obratnykh zadach vosstanovleniya signalov // *Vestnik SamGTU, ser. Tekhnicheskie nauki.* 2014. №43. P. 17–22.
 16. *Vasilenko G.I., Taratorin A.M.* Vosstanovlenie izobrazhenij. M.: Radio i svyaz', 1986. 304 p.
 17. *Sizikov B.C., Rimskikh M.V., Mirdzhamolov R.K.* Rekonstruktsiya smazannykh i zashumlennykh izobrazhenij bez ispol'zovaniya granichnykh uslovij // *Opticheskij zhurnal.* 2009. T. 76. № 5. P. 38–46.
 18. *Gonsales R., Vuds R.* Tsifrovaya obrabotka izobrazhenij: 3-e izd., isp. i dop. – M.: Tekhnosfera, 2012. 1104 p.
 19. *Kuznetsov P.K., Semavin V.I., Solodukha A.A.* Algoritm kompensatsii skorosti smaza izobrazheniya podstilayushhej poverkhnosti, poluchaemogo pri nablyudenii Zemli iz kosmosa // *Vestnik Sam. GTU,* 2005. № 37. P. 150–157.
 20. *Egoshkin N.A., Ereemeev V.V.* Korrektsiya smaza izobrazhenij v sistemakh kosmicheskogo nablyudeniya zemli // *TSifrovaya obrabotka signalov.* 2010. № 4. p. 28–32.
 21. *Kuznetsov P.K., Martem'yanov B.V., Myatov G.N., Yudakov A.A.* Metodika vychisleniya otse-nok parametrov smaza izobrazhenij, poluchaemykh tselevoj apparaturoj KAN tipa "Resurs" // *7-ya mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya K.EH. TSiolkovskij – 160 let so dnya rozhdeniya.* Kosmonavtika. Radioehlektronika. Geoinformatika. Ryazan', 2017. P. 344–350.
 22. *Volkov I.I., Zolin A.G.* Reshenie dvumernoj obratnoj zadachi vosstanovleniya smazannogo izobrazheniya // *Vestnik SamGTU, ser. Tekhnicheskie nauki.* 2013. № 39. P. 223–226.
 23. *Avcibas I., Sankur B., Sayood K.* Statistical evaluating of image quality measures // *Journal of Electronic Imaging.* April 2002. Vol. 11. № 2. Pp. 206–223.

УДК 681.5

ФОРМИРОВАНИЕ ДОПУСКОВ ДИАМЕТРА ИЗОЛИРОВАННОЙ ЖИЛЫ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ ГАРАНТИРОВАННОЕ ДОСТИЖЕНИЕ ТРЕБУЕМЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА СИММЕТРИЧНОГО КАБЕЛЯ СВЯЗИ (LAN-КАБЕЛЯ)**В.Ю. Денисов**АО «РКЦ «Прогресс»
Россия, 443009, г. Самара, ул. Земеца, 18

Аннотация. В качестве объекта исследований рассматривался LAN-кабель. Приведено математическое описание взаимного влияния на дальний и ближний конец в симметричных кабелях связи. Выдвинуто предположение, что ужесточение допуска на диаметр изолированной жилы будет обеспечивать гарантированное достижение требуемых показателей качества симметричного кабеля связи. Приведен алгоритм расчета взаимного влияния между двумя и четырьмя цепями. Получено математическое описание и построена имитационная модель взаимного влияния на ближний и дальний конец для двух витых пар с учетом длины цепи и частоты передаваемого сигнала. Проведены компьютерные исследования при варьировании диаметрами изолированных жил LAN-кабеля с учетом его длины, взаимного влияния на ближний конец коэффициентов емкостной связи и переходного затухания на ближнем конце. Полученные результаты подтвердили выдвинутое предположение и являются основой для синтеза систем автоматического управления технологическим процессом изготовления LAN-кабеля.

Ключевые слова: LAN-кабель, изолированная жила, переходное затухание, допуск на диаметр.

Введение

В [1] рассматривалась задача расчета взаимного влияния в симметричной цепи между витыми парами, проводками витых пар и четырьмя витыми парами по расположению жил пучка в поперечном сечении. В частности, расчета рабочих и взаимных емкостей и емкостных связей. Но не рассматривался расчет влияний на дальний и ближний конец.

Известно из [2, 3, 4], что если положение проводов является функцией длины, как это, например, имеет место у кабелей звездной скрутки и у линий с двумя скрученными цепями, то возможно получить распределение связей по всей длине. Нужно вычислить по распределению связей напряжения в начале и в конце линии, подверженной влиянию, расчетом переходных затуханий на ближнем и дальнем концах.

Данные величины можно определить из рис. 1, на котором показаны влияющая цепь 1 и подверженная влиянию цепь 2; остальные, как их принято называть, третьи цепи не показаны на рисунке. Цепи 1 и 2 замкнуты на свои волновые сопротивления Z_1 и Z_2 . Напряжение U_{20} на ближнем к передатчику конце линии, подверженной влиянию, называется напряжением влияния на ближний конец, а напряжение U_{2l} – на дальний конец [2, 3].

В зависимости от того, в какой точке цепи определяется переходный разговор, различают переходное затухание при влиянии на ближний и дальний концы. Если рассматривается влияние между концами взаимовлияющих цепей, находящихся в одном пункте, то говорят о переходном затухании при влиянии на ближний конец b_N . Когда же рассматривают влияние между концами влияющей цепи и цепи, подверженной влиянию, находящимися в разных пунктах, то говорят о переходном затухании при влиянии на дальний конец b_F [5].

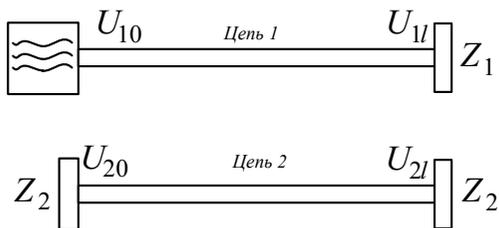


Рис. 1. Схема для определения влияния на дальний и ближний концы

Определить взаимные влияния на ближнем конце можно по формуле

$$N_{12} = \frac{U_{20}}{U_{10}} \sqrt{\frac{Z_1}{Z_2}}, \quad (1)$$

где U_{20} и U_{10} – напряжение влияния на ближний конец;

Z_1 и Z_2 – волновые сопротивления.

На дальнем конце:

$$F_{12} = \frac{U_{2l}}{U_{1l}} \sqrt{\frac{Z_1}{Z_2}}, \quad (2)$$

где U_{2l} и U_{1l} – напряжение влияния на дальний конец.

Или, выражая через соответствующие переходные затухания:

$$b_N \equiv -\ln|N_{12}| = \ln \left| \frac{U_{20}}{U_{10}} \sqrt{\frac{Z_1}{Z_2}} \right|; \quad (3)$$

$$b_F \equiv -\ln|F_{12}| = \ln \left| \frac{U_{2l}}{U_{1l}} \sqrt{\frac{Z_1}{Z_2}} \right|. \quad (4)$$

У высокочастотных цепей влияние на ближний конец, как правило, значительно больше, чем на дальний. Поэтому на практике при любых обстоятельствах стараются избегать влияния на ближний конец. Но вследствие отражений (неудовлетворительное согласование нагрузочного сопротивления с волновым сопротивлением или скачки волнового сопротивления) направление волн может измениться на обратное, в результате чего энергия пойдет к дальнему концу цепи, подверженной влиянию. Следовательно, в результате отражений и влияний на ближний конец возникает дополнительное влияние на дальний конец. Но эту часть вли-

яния мы учитывать не будем, так как при эксплуатации и настройке можно обеспечить хорошее согласование и эта составляющая не будет играть ощутимой роли [2]. Также будем пренебрегать неоднородностями волновых сопротивлений и неоднородностью диэлектрика.

Взаимное влияние в пучке z вызывается электрическими и магнитными полями, а описывается это влияние обобщенными телеграфными уравнениями для связанных цепей (3, 4):

$$-U_k = \frac{1}{j\omega} \left(K_{1k} \frac{dI_1}{dx} + K_{2k} \frac{dI_2}{dx} + \dots \right) \quad \begin{matrix} \mathcal{M} & \dots & \mathcal{M} \\ ax & & ax \end{matrix} \quad (5)$$

$$\frac{-dU_k}{dx} = j\omega (L_{1k} I_1 + L_{2k} I_2 + \dots) \quad \dots \quad (6)$$

где U_k – напряжение k -й цепи;

I_k – ток k -й цепи;

L_k, L_{zk} – индуктивность k -й; z и k -й цепи;

K_k, K_{zk} – потенциальный коэффициент k -й; z и k -й цепи.

Эти уравнения называют еще основными уравнениями теории влияния.

Постановка задачи

Для гарантированного обеспечения требуемых параметров качества изготавливаемого кабеля необходимо изготавливать изолированную жилу с диаметром

$$D = D_u + X,$$

где $X = +X_B$ или $X = -X_H$;

$+X_B$ – верхний предел допуска;

$-X_H$ – нижний предел допуска.

Выдвинем предположение, что ужесточение допуска на диаметр изолированной жилы гарантированно обеспечит требуемые показатели качества LAN-кабеля. Одним из таких показателей является переходное затухание.

Зададимся следующими начальными условиями.

В качестве объекта исследования рассмотрим LAN – кабель категории 5е, на рис. 2 представлены его характеристики. Данный кабель, ССА-UU004-5E-PVC-GY, содержит 4 витые пары сплошных алюминиевых проводников, лакированных чистой медью (ССА). Кабель выполнен в неэкранированном исполнении и является экономичным решением, при этом полностью соответствует заявленной категории 5е и скорости передачи в 1Гбит/с и используемой для внутренней прокладки [6].

Введем ограничения:

- цепи будут нескрещенные параллельные;

- цепи имеют пренебрежимо малую внутреннюю индуктивность.

Рассмотрим частные случаи получения взаимного влияния на дальний и ближний конец для двух и четырех цепей. Найдем доказательство выдвинутого предположения.

Артикул	ССА-UU004-5E-PVC-GY
Категория	5е
Полоса пропускания, МГц	100
Тип	UTP
Количество пар	4
Материал проводников	Плакированный медью алюминий (ССА)
Тип проводников	Одножильный
Диаметр проводников, мм	0,50±0,005
Материал изоляции проводников	Полиэтилен высокой плотности (HDPE)
Толщина изоляции проводников, мм	0,2±0,02
Внешний диаметр изоляции проводников, мм	0,9±0,02
Материал внешней оболочки	Поливинилхлорид (PVC)
Применение	Для внутренней прокладки
Толщина оболочки, мм	0,55±0,02
Внешний диаметр оболочки, мм	5,2±0,2
Цвет оболочки	Серый
Защитная пленка	-
Разрывная нить	Есть
Погонная масса, кг/км	20,6
Радиус изгиба при прокладке, D	Не менее 8
Радиус изгиба при эксплуатации, D	Не менее 4
Растягивающее усилие, Н	Не более 80
Прочность на разрыв, Н	Не более 400
Волновое сопротивление, Ом	100±15
Погонное сопротивление по постоянному току, Ом/км	180

Рис.2. Характеристики кабеля ССА-UU004-5E-PVC-GY

Математическое описание взаимного влияния на ближний и дальний конец в симметричных кабелях связи

Для доказательства выдвинутого предположения обратимся к теории расчета взаимного влияния по связям. Решение систем уравнений (5 и 6) достаточно сложное, поэтому сделаны ограничения:

– для цепей с пренебрежимо малой внутренней индуктивностью справедливо уравнение

$$L_{ik} = \frac{1}{\upsilon^2} K_{ik}, \quad (7)$$

где L_{ik} – индуктивность i -й и k -й цепи;

– нескрещенные параллельные цепи, у которых L и K не зависят от x .

В итоге для k -й цепи получаем следующее дифференциальное уравнение 2-го порядка с постоянными коэффициентами:

$$\frac{d^2 U_k}{dx^2} + \frac{\omega^2}{\upsilon^2} U_k = 0. \quad (8)$$

Общее решение примет вид

$$U_k = A_k e^{-\gamma x} + B_k e^{+\gamma x}, \quad (9)$$

где A_k и B_k – постоянные интегрирования.

Чтобы определить постоянную распространения всех волн, нужно подставить (9) в (8), в итоге получим

$$\gamma = j \frac{\omega}{\upsilon}, \quad (10)$$

где γ – постоянная распространения волн;

ω – круговая частота;

v – скорость распространения сигнала во всех цепях.

Подставляя уравнение (9) в уравнение (6), получим токи во всех z цепях на основании системы z уравнений. Для наглядности приведем k -е уравнение [2]:

$$L_{1k}I_1 + L_{2k}I_2 + \dots \quad \dots \quad \frac{1}{v} \left(A_k e^{-\gamma x} - B_k e^{+\gamma x} \right). \quad (11)$$

Постоянные A_k и B_k определяются из граничных условий в начале и в конце каждой цепи, все цепи должны быть замкнуты обоими концами на свои волновые сопротивления [2]:

$$Z_k = \sqrt{L_k K_k}. \quad (12)$$

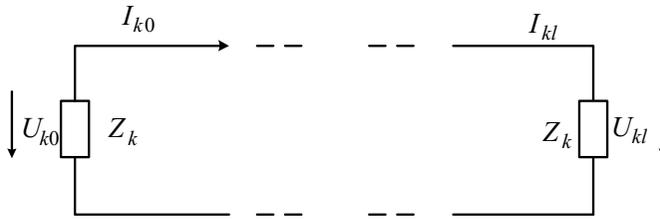


Рис. 3. Схема для определения знака тока I_{k0} в начале и конце цепи I_{kl}

Согласно обозначениям, приведенным на рис. 3, и направлениям токов, указанным стрелками, согласно закону Ома получим:

$$U_{kl} = I_{kl} Z_k \quad (k = 1, 2, 3, \dots) \quad (13)$$

$$U_{k0} = -I_{k0} Z_k \quad (k = 2, 3, 4, \dots) \quad (14)$$

Взаимное влияние между двумя цепями

Влияющую цепь обозначим 1, подверженную влиянию – 3. Для цепи 1 получим только одну волну (15) с учетом сделанных допущений: согласование на конце цепи и пренебрежение обратным влиянием цепи, подверженной влиянию.

$$U_1 = U_{10} e^{-\gamma x}; \quad (15)$$

$$I_1 = \frac{U_{10}}{Z_1} e^{-\gamma x}. \quad (16)$$

Уравнения (9) и (11) при $k = 3$ примут следующий вид:

$$U_3 = A_3 e^{-\gamma x} + B_3 e^{+\gamma x}; \quad (17)$$

$$L_{13}I_1 + L_{33}I_3 = \frac{1}{v} \left(A_3 e^{-\gamma x} - B_3 e^{+\gamma x} \right). \quad (18)$$

Для нахождения постоянных A_3 и B_3 нужно воспользоваться граничными условиями в начале и в конце цепи.

В начале определим постоянную A_3 . Для этого из уравнения (17) выразим B_3 и подставим в уравнение (16), получим:

$$L_{13}I_1 + L_{33}I_3 = \frac{1}{\upsilon} \left(A_3 e^{-\gamma x} - U_3 + A_3 e^{-\gamma x} \right). \quad (19)$$

С учетом того, что $x=0$, (14) примет вид: $U_{30} = -I_{30}Z_3$; также учитывая $Z_1 = L_{11}\upsilon$ и уравнения (15, 16), получим:

$$\frac{L_{13}U_{10}}{\upsilon L_{11}} + L_{33}I_3 + U_3 = \frac{1}{\upsilon} 2A_3. \quad (20)$$

Учитывая, что $L_{33} = \frac{z_3}{\upsilon}$ и $I_3 = \frac{U_3}{z_3}$, уравнение (20) примет вид:

$$A_3 = \frac{L_{13}U_{10}}{2L_{11}} + U_3. \quad (21)$$

Теперь найдем постоянную B_3 , для этого приравняем $x = l$, формула (13) примет вид $U_{3l} = I_{3l}Z_3$. Теперь выразим из (17) постоянную A_3 и подставим в уравнение (18), получим:

$$L_{13}I_1 + L_{33}I_3 = \frac{1}{\upsilon} \left(U_3 - B_3 e^{+\gamma l} - B_3 e^{+\gamma l} \right), \quad (22)$$

где l – длина цепи.

Учитывая вышеописанные выражения для L_{33} , L_{11} и I_3 , подставим их в (22) и выразим B_3 :

$$B_3 = -\frac{L_{13}U_{10}}{2L_{11}} e^{-2\gamma l}. \quad (23)$$

Подставим полученные выражения для постоянных (21) и (23) в (17), тем самым получим уравнение для U_3 :

$$U_3 = \frac{L_{13}U_{10}}{2L_{11}} e^{-\gamma x} \left(1 - e^{-2\gamma(l-x)} \right) = -I_3 Z_3. \quad (24)$$

Введем нормированные величины для напряжения U и тока I :

$$u_3 = \frac{U_3}{\sqrt{Z_3}}; \quad (25)$$

$$i_3 = \frac{I_3}{\sqrt{Z_3}}. \quad (26)$$

Используя нормированные величины и вводя коэффициент связи, получим:

$$\chi_{13} = \frac{L_{13}}{\sqrt{L_{11}L_{33}}} = \frac{K_{13}}{\sqrt{K_{11}K_{33}}}. \quad (27)$$

С учетом (27) выражение (24) примет следующий вид:

$$u_3 = -i_3 = \frac{1}{2} u_{10} \chi_{13} e^{-2\gamma x} \left(1 - e^{-2\gamma(l-x)} \right). \quad (28)$$

Это уравнение напряжения в любой точке цепи 3. Рассмотрев алгоритм получения постоянных A_3 , B_3 и нахождения уравнения напряжения для любой точки определенной цепи, рассмотрим более сложный пример – взаимное влияние между четырьмя цепями.

Взаимное влияние между четырьмя цепями

Вывод уравнений взаимного влияния между четырьмя цепями сводится к нахождению напряжений и токов «третьих» цепях – в данном случае это цепи 3 и 4. Влияние на цепь 2 будет суммой всех влияний цепей 1, 3 и 4 соответственно.

При условии пренебрежения обратным влиянием уравнения (9) и (11) при $k = 2$ для случая взаимного влияния четырех цепей будут выглядеть следующим образом:

$$U_2 = A_2 e^{-\gamma x} + B_2 e^{+\gamma x}; \quad (29)$$

$$L_{12}I_1 + L_{22}I_2 + L_{32}I_3 + L_{42}I_4 = \frac{1}{\nu} \left(A_2 e^{-\gamma x} - B_2 e^{+\gamma x} \right). \quad (30)$$

Величины I_3 и I_4 можно найти из уравнения (24); учитывая, что $L_{33} = \frac{Z_3}{\nu}$ и $L_{44} = \frac{Z_4}{\nu}$, получим:

$$I_3 = -\frac{U_3}{Z_3} = -\frac{L_{13}U_{10}}{2L_{11}L_{33}\nu} e^{-\gamma x} (1 - e^{-2\gamma(l-x)}); \quad (31)$$

$$I_4 = -\frac{U_4}{Z_4} = -\frac{L_{14}U_{10}}{2L_{11}L_{44}\nu} e^{-\gamma x} (1 - e^{-2\gamma(l-x)}). \quad (32)$$

Подставив в уравнение (30) уравнения (16, 31 и 32) и выразив из уравнения (29) постоянную $B_2 e^{+\gamma x}$, а также учитывая, что $x = 0$, получим постоянную A_2 :

$$A_2 = \frac{L_{12}U_{10}}{2L_{11}} - \frac{L_{32}L_{13}U_{10}}{4L_{11}L_{33}} (1 - e^{-2\gamma l}) - \frac{L_{42}L_{14}U_{10}}{4L_{11}L_{44}} (1 - e^{-2\gamma l}). \quad (33)$$

Выразив из уравнения (29) постоянную $A_2 e^{-\gamma x}$ и учитывая, что $x = l$, и подставив в уравнение (30) уравнения (16, 31 и 32), получим постоянную B_2 :

$$B_2 = e^{-\gamma l} \left(-\frac{L_{12}U_{10}}{2L_{11}} + \frac{L_{32}L_{13}U_{10}}{4L_{11}L_{33}} + \frac{L_{42}L_{14}U_{10}}{4L_{11}L_{44}} \right). \quad (34)$$

После подстановки в уравнение (29) уравнения полученных постоянных (33) и (34) получим окончательное решение для U_2 в виде

$$U_2 = U_{10} e^{-\gamma x} \left(\frac{L_{12}}{2L_{11}} (1 - e^{-2\gamma(l-x)}) - \frac{L_{32}L_{13}}{4L_{11}L_{33}} (1 - e^{-2\gamma}) - \frac{L_{42}L_{14}}{4L_{11}L_{44}} (1 - e^{-2\gamma}) \right). \quad (35)$$

Вводим нормированные величины для напряжения U :

$$u_2 = \frac{U_2}{\sqrt{Z_2}}. \quad (36)$$

Коэффициенты связи согласно [2] будут равны:

$$\begin{aligned} \chi_{12} &= \frac{L_{12}}{\sqrt{L_{11}L_{22}}} = \frac{K_{12}}{\sqrt{K_{11}K_{22}}}; \\ \chi_{32} &= \frac{L_{32}}{\sqrt{L_{33}L_{22}}} = \frac{K_{32}}{\sqrt{K_{33}K_{22}}}; \\ \chi_{42} &= \frac{L_{42}}{\sqrt{L_{44}L_{22}}} = \frac{K_{42}}{\sqrt{K_{44}K_{22}}}; \\ \chi_{14} &= \frac{L_{14}}{\sqrt{L_{11}L_{44}}} = \frac{K_{14}}{\sqrt{K_{11}K_{44}}}. \end{aligned} \quad (37)$$

Учитывая выражение (27) для коэффициента связи χ_{13} , получим уравнение для u_2 :

$$u_2 = u_{10}e^{-\gamma x} \left(\frac{\chi_{12}}{2} (1 - e^{-2\gamma(l-x)}) - \frac{\chi_{32}\chi_{13}}{4} (1 - e^{-2\gamma l}) - \frac{\chi_{42}\chi_{14}}{4} (1 - e^{-2\gamma l}) \right). \quad (38)$$

Из уравнения (38) получим уравнения для влияния на ближний конец:

$$N_{12} = \frac{u_{20}}{u_{10}} = \left(\frac{\chi_{12}}{2} - \frac{\chi_{32}\chi_{13}}{4} - \frac{\chi_{42}\chi_{14}}{4} \right) (1 - e^{-2\gamma l}) \quad (39)$$

и на дальний конец:

$$F_{12} = \frac{u_{2l}}{u_{1l}} = \left(-\frac{\chi_{32}\chi_{13}}{4} - \frac{\chi_{42}\chi_{14}}{4} \right) (1 - e^{-2\gamma l}). \quad (40)$$

Соответственно переходное затухание на ближнем конце согласно [5] будет равно

$$A_0 = 20 \lg \left(\frac{2}{N_{12}} \right); \quad (41)$$

на дальнем конце:

$$A_l = 20 \lg \left(\frac{2}{F_{12}} \right). \quad (42)$$

Определение взаимного влияния на дальний и ближний конец для двух витых пар

Уравнения (39) и (40) являются конечным результатом для влияния в пучке из идеальных цепей с учетом того, что все они замкнуты на свои волновые сопротивления.

Для нахождения коэффициентов $K_{12}, K_{32}, K_{42}, K_{14}, K_{13}, K_{11}, K_{22}, K_{33}, K_{44}$ из выражений (25, 37), нужно найти значения матрицы

$$K = C. \quad (43)$$

Матрица C_L из четырех цепей будет выглядеть следующим образом [2]:

$$C_L = \begin{pmatrix} C_{II} & C_{III} & C_{IV} & C_{IV} \\ C_{II} & C_{II} & C_{II} & C_{II} \\ C_{III} & C_{III} & C_{III} & C_{III} \\ C_{IV} & C_{IV} & C_{IV} & C_{IV} \end{pmatrix}, \quad (44)$$

где с учетом того, что $C_{ik} = C_{ki}$,

$C_{II}, C_{II}, C_{III}, C_{IV}$ – рабочие емкости;

$C_{II}, C_{III}, C_{IV}, C_{II}, C_{II}, C_{III}$ – взаимные емкости.

Так как вычисление обратной матрицы C_L вручную представляет собой громоздкие расчеты, используем ПО MathCad [7]. Согласно выражениям (25, 37) нас интересуют коэффициенты $K_{12}, K_{32}, K_{42}, K_{14}, K_{13}, K_{11}, K_{22}, K_{33}, K_{44}$, которые соотносятся с элементами матрицы K_L ; учитывая, что $K_{ik} = K_{ki}$, получим:

$$\begin{aligned} K_{12} &= K_{II}; & K_{32} &= K_{III}; & K_{42} &= K_{IV}; & K_{14} &= K_{IV}; & K_{13} &= K_{III}; \\ K_{11} &= K_{II}; & K_{22} &= K_{II}; & K_{33} &= K_{III}; & K_{44} &= K_{IV}. \end{aligned} \quad (45)$$

Значения элементов матрицы (45) легко получить с помощью ПО MathCad и соответственно получить значения коэффициентов связи (25, 37), но этот алгоритм можно использовать, если известны рабочие и взаимные емкости в матрице (44). Так как данные значения можно получить только экспериментальным путем, то в выражении (39) множитель, учитывающий длину цепи, примем равным единице, а N_{12} выразим из формулы (41). Согласно [8] минимальное переходное затухание для LAN-кабеля категории 5е на ближнем конце $A_0 = 35,3$ дБ/100 м. Примем $A_0 = 45$ дБ/100 м из расчета того, что при максимальном значении множителя $(1 - e^{-2\gamma l})$ переходное затухание будет не менее 35,3 дБ/100м. Получим следующее соотношение:

$$\begin{aligned} A_0 &= 20\lg(2) - 20\lg(N_{12}); \\ 20\lg(N_{12}) &= 20\lg(2) - 45; \\ N_{12} &= 10^{-1,948} = 0.01127. \end{aligned} \quad (46)$$

Чтобы рассчитать влияние и переходное затухание на ближнем конце, учитывая длину цепи и частоту передаваемого сигнала, нужно знать значение множителя $(1 - e^{-2\gamma l})$ в выражении (39). Данный множитель согласно [2] для длин меньше 1 км имеет вид

$$|1 - e^{-2\gamma l}| \approx \sqrt{\left(1 - \cos 2\frac{\omega l}{v}\right)^2 + \left(\sin 2\frac{\omega l}{v}\right)^2} = \sqrt{2 - 2\cos\left(\frac{\pi l}{\lambda/4}\right)}. \quad (47)$$

С учетом того, что $\lambda = \frac{2\pi v}{\omega}$, формула (47) примет вид

$$|1 - e^{-2\gamma l}| = \sqrt{2 - 2\cos\left(\frac{2\omega l}{v}\right)}, \quad (48)$$

где v – скорость распространения сигнала;

λ – длина волны;

γ – постоянная распространения волн;

π – число ПИ.

Скорость распространения сигнала для кабелей в диапазоне высоких частот находится по следующей формуле [9]:

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \quad (49)$$

где L – индуктивность кабеля;

C – емкость цепи.

Индуктивность находится по формуле [9]

$$L = \left[4 \cdot \ln \frac{a-r}{r} + \mu Q(kr) \right] \cdot 10^{-4}, \quad (50)$$

где a – расстояние между жилами;

r – радиус жилы;

μ – относительная магнитная проницаемость металла, из которого изготовлена жила;

$Q(kr)$ – табулированное значение бесселевой функции.

Значение бесселевой функции определяется по формуле [9]

$$Q(kr) = \sqrt{\mu_a \omega \sigma} \cdot r, \quad (51)$$

где σ – проводимость материала;

μ_a – абсолютная магнитная проницаемость материала.

В свою очередь, круговая частота находится по формуле [9]

$$\omega = 2\pi f, \quad (52)$$

где f – частота передаваемого сигнала.

Абсолютная магнитная проницаемость материала рассчитывается по формуле [9]

$$\mu_a = \mu_0 \mu, \quad (53)$$

где μ_0 – постоянная магнитная проницаемость материала.

Емкость цепи определяется по формуле [10]

$$C = \frac{\chi_{ук} \varepsilon \cdot 10^{-6}}{36 \ln \left(\frac{a}{r} \psi \right)}, \quad (54)$$

где $\chi_{ук}$ – коэффициент укрутки;

ε – эффективная диэлектрическая проницаемость изоляции;

ψ – поправочный коэффициент, учитывающий близость жил.

Поправочный коэффициент, учитывающий близость жил, в нашем случае для двойной парной скрутки, находится по формуле [9]

$$\psi = \frac{\left[(0.65d + d - d) - a \right]}{\left[(0.65d + d - d) + a \right]}, \quad (55)$$

где $d_{ДП}$ – диаметр двойной парной скрутки;

d – диаметр жилы;

d_1 – диаметр изолированной жилы.

Диаметр двойной парной скрутки определяется по формуле

$$d_{ДП} = D_{u1} + D_{u2}, \quad (56)$$

где D_{u1}, D_{u2} – диаметры изолированных жил в паре.

Расстояние между жилами находится по следующей формуле:

$$a = \frac{D_{u1} + D_{u2}}{2}. \quad (57)$$

Для связи коэффициентов K_1, K_2, K_3 с диаметром изоляции нужно выразить данные коэффициенты через межосевые расстояния жил в четверке d_{ij} . Согласно [1, 10, 11, 12, 13] коэффициенты емкостной связи будут равны

$$\begin{aligned} K_1 &= K_c (d_{13} - d_{23} - d_{14} + d_{24}); \\ K_2 &= K_c (d_{13} - d_{23} + d_{14} - d_{24}); \\ K_3 &= K_c (d_{13} + d_{23} - d_{14} - d_{24}). \end{aligned} \quad (58)$$

Константа K_c согласно [10] равна $15 \cdot 10^{-12}$ Ф.

Для связи межосевых расстояний и соответствующих диаметров изоляции воспользуемся следующей функциональной схемой (рис. 4). Из нее не составит труда вывести выражения зависимости диаметра изоляции от межосевого расстояния:

$$\begin{aligned} d_{12} &= \frac{D_{u1} + D_{u2}}{2}; \quad d_{13} = \frac{D_{u1} + D_{u3}}{2}; \\ d_{34} &= \frac{D_{u3} + D_{u4}}{2}; \quad d_{24} = \frac{D_{u2} + D_{u4}}{2}, \end{aligned} \quad (59)$$

где D_{un} – диаметр изолированной жилы ($n = 1 \dots 4$).

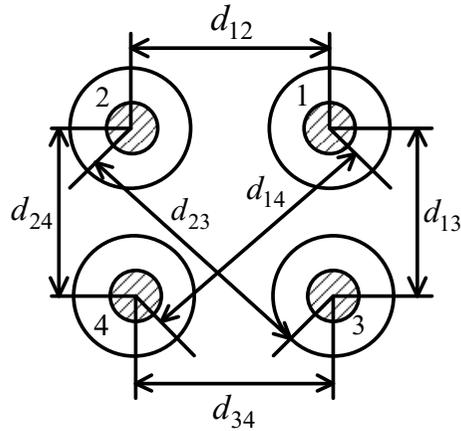


Рис. 4. Схема разреза двух витых пар с обозначенными межосевыми расстояниями: d_{13} – межосевое расстояние между жилами 1 и 3; d_{14} – межосевое расстояние между жилами 1 и 4; d_{12} – межосевое расстояние между жилами 1 и 2; d_{24} – межосевое расстояние между жилами 2 и 4; d_{34} – межосевое расстояние между жилами 3 и 4; d_{23} – межосевое расстояние между жилами 2 и 3

Для определения межосевых расстояний d_{23} и d_{14} построим следующую схему (рис. 5).

Согласно рис. 4 для нахождения межосевых расстояний d_{23} и d_{14} нужно воспользоваться следующими формулами [14]:

$$\begin{aligned} d_{23} &= \sqrt{d_{34}^2 + d_{24}^2 - 2d_{34}d_{24}\cos D_4}; \\ d_{14} &= \sqrt{d_{13}^2 + d_{34}^2 - 2d_{13}d_{34}\cos D_3}. \end{aligned} \quad (60)$$

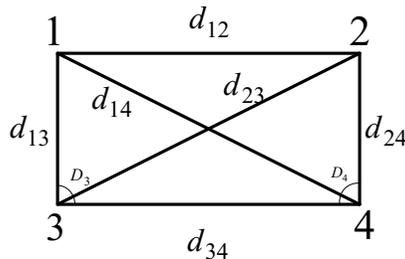


Рис. 5. Схема разреза двух витых пар с обозначенными межосевыми расстояниями: d_{23} и d_{14} – межосевое расстояние между жилами; 1, 2, 3, 4 – жилы; D_3 и D_4 – углы между межосевыми расстояниями d_{13}, d_{34} и d_{24}, d_{34} соответственно

Как видно из выражений (59, 60), в идеальном случае, если все диаметры всех двух витых пар будут одинаковыми, то коэффициенты K_2, K_3 будут равны нулю, а K_1 будет минимален. Но следует учитывать, что при наложении изоляции экструзионной линией на жилы полученные диаметры изоляции неидеальны и будут колебаться в некоторых пределах.

Исследование влияния диаметра изолированной жилы на переходное затухание

Проведем исследования по имитационной модели, построенной в ПО MathCad [6], согласно формулам (39, 41, 47–60). Для случая, когда диаметры изолированных жил одинаковы, зададимся следующими параметрами [15]:

$$l = 100\text{ м}; f = 100 \cdot 10^6 \text{ Гц}; r = 0,25\text{ мм}; k = 1,02; \varepsilon = 1,4; d = 0,5\text{ мм}; \\ \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/ м}; \mu_1 = 1\text{ Гн/ м}; \sigma = 57 \cdot 10^2 \text{ См/ м}.$$

Полученные расчеты по имитационной модели для случая, когда диаметры изолированных жил одинаковы, представлены в табл. 1.

Таблица 1

Влияние диаметров изолированных жил на переходное затухание на ближнем конце

Диаметры изоляций, мм $D_{u1}, D_{u4} / D_{u2}, D_{u3}$	$ 1 - e^{-2\gamma l} $	Влияние на ближнем конце N_{12} , 1/сд	Переходное затухание на ближнем конце A_0 , дБ/100 м	Коэффициенты емкостной связи $K_1, K_2, K_3, 10^{-11}$
0,92/0,92	1,9299	0,0217	35,4415	$K_1=1,14322943$ $K_2=0$ $K_3=0$
0,91/0,91	1,9532	0,0220	35,6796	$K_1=1,13080303$ $K_2=0$ $K_3=0$
0,9/0,9	0,7346	0,0082	44,5302	$K_1=1,11837662$ $K_2=0$ $K_3=0$
0,89/0,89	1,9186	0,02162	36,5630	$K_1=1,10595021$ $K_2=0$ $K_3=0$
0,88/0,88	1,9227	0,02166	36,9320	$K_1=1,10595021$ $K_2=0$ $K_3=0$
0,904/0,904	1,9144	0,02157	36,0662	$K_1=1,12334718$ $K_2=0$ $K_3=0$
0,903/0,903	1,8375	0,0207	36,4579	$K_1=1,12210454$ $K_2=0$ $K_3=0$
0,902/0,902	0,3703	0,0041	50,4310	$K_1=1,12086191$ $K_2=0$ $K_3=0$
0,901/0,901	0,6891	0,0077	45,0493	$K_1=1,11961926$ $K_2=0$

Диаметры изоляций, мм $D_{u1}, D_{u4} / D_{u2}, D_{u3}$	$ 1 - e^{-2\gamma l} $	Влияние на ближнем конце N_{12} , 1/сд	Переходное затухание на ближнем конце A_0 , дБ/100 м	Коэффициенты емкостной связи $K_1, K_2, K_3, 10^{-11}$
				$K_3=0$
0,899/0,899	1,3749	0,0154	39,1217	$K_1=1,11713398$ $K_2=0$ $K_3=0$
0,898/0,898	1,1270	0,0127	40,8852	$K_1=1,11589134$ $K_2=0$ $K_3=0$
0,897/0,897	1,5265	0,0172	38,3120	$K_1=1,11464872$ $K_2=0$ $K_3=0$
0,896/0,896	0,9862	0,0111	42,0929	$K_1=1,11340606$ $K_2=0$ $K_3=0$
0,9004/ 0,9004	1,9396	0,0218	36,0578	$K_1=1,11887367$ $K_2=0$ $K_3=0$
0,9003/0,9003	1,21408	0,0136	40,1800	$K_1=1,11874941$ $K_2=0$ $K_3=0$
0,9002/0,9002	0,9583	0,0108	42,2135	$K_1=1,11862515$ $K_2=0$ $K_3=0$
0,9001/0,9001	1,9953	0,02248	35,8472	$K_1=1,11850088$ $K_2=0$ $K_3=0$
0,8999/0,8999	1,3450	0,0151	39,3049	$K_1=1,11825235$ $K_2=0$ $K_3=0$
0,8998/0,8998	1,9287	0,02173	39,2592	$K_1=1,11812809$ $K_2=0$ $K_3=0$
0,8997/0,8997	0,42676	0,0048	49,2585	$K_1=1,11800383$ $K_2=0$ $K_3=0$
0,8996/0,8996	1,5159	0,0170	38,2275	$K_1=1,11787956$ $K_2=0$ $K_3=0$

Согласно [8] переходное затухание на ближнем конце для LAN-кабеля категории 5е должно быть не менее 35,3 дБ/100м. Проанализировав значения полученных переходных затуханий, можно сделать вывод, что ужесточение допуска на диаметр изолированной жилы обеспечивает гарантированное достижение требуемых показателей качества, а именно переходного затухания на ближнем конце, тем самым подтверждая ранее выдвинутое предположение.

Как видно из таблицы, наилучшие результаты достигаются при допуске, когда $X_B = 0$ и $X_H = 0$; при допуске, когда $X_B = +0,001$ и $X_B = +0,002$; при допуске, когда $X_B = +0,0002$ и $X_H = -0,0003$. Следовательно, придерживаясь этих значений допусков на диаметр изоляции при изготовлении изолированных жил LAN-кабеля, можно достичь наибольшего значения переходного затухания. Также из результатов видно, что ужесточение допуска на диаметр приводит к незначительному, но все-таки уменьшению коэффициента емкостной связи K_1 .

Для полноты эксперимента рассмотрим случай, когда диаметры изолированных жил в паре разные. Значения параметров возьмем из предыдущего эксперимента с учетом лишь того, что диаметр изолированной жилы будем находить

по следующей формуле: $d_1 = \frac{D_{u1} + D_{u2}}{2}$.

Полученные расчеты по имитационной модели для случая, когда диаметры изолированных жил в паре разные, представлены в табл. 2.

Таблица 2

Влияние диаметров изолированных жил на переходное затухание на ближнем конце

Диаметры изоляций, мм $D_{u1}, D_{u4} / D_{u2}, D_{u3}$	$ 1 - e^{-2\gamma l} $	Влияние на ближнем конце N_{12} , 1/сд	Переходное затухание на ближнем конце A_0 , дБ/100 м	Коэффициенты емкостной связи $K_1, K_2, K_3, 10^{-11}$
0,91/0,92	0,4617	0,0118	44,5672	$K_1=1,13700174$ $K_2=-0,010606482$ $K_3=0,010606482$
0,9/0,91	0,3256	0,0085	47,3342	$K_1=1,12457517$ $K_2=-0,010606480$ $K_3=0,010606480$
0,89/0,9	1,9949	0,0542	31,3326	$K_1=1,1121486$ $K_2=-0,010606477$ $K_3=0,010606477$
0,88/0,89	0,4647	0,0130	43,7371	$K_1=1,09972203$ $K_2=-0,010606474$ $K_3=0,010606474$
0,903/0,904	0,3888	0,0104	45,6789	$K_1=1,12272571$ $K_2=-0,0010606600$ $K_3=0,0010606600$
0,902/0,903	1,5981	0,0428	33,3759	$K_1=1,12148307$ $K_2=-0,0010606600$ $K_3=0,0010606600$
0,901/0,902	0,4756	0,0128	43,8762	$K_1=1,12024043$

Диаметры изоляций, мм $D_{u1}, D_{u4} / D_{u2}, D_{u3}$	$ 1 - e^{-2\gamma l} $	Влияние на ближнем конце N_{12} , 1/сд	Переходное затухание на ближнем конце A_0 , дБ/100 м	Коэффициенты емкостной связи $K_1, K_2, K_3, 10^{-11}$
				$K_2 = -0,0010606600$ $K_3 = 0,0010606600$
0,9/0,901	0,2927	0,0079	48,0659	$K_1 = 1,11899779$ $K_2 = -0,0010606600$ $K_3 = 0,0010606600$
0,899/0,9	1,8775	0,0508	31,8995	$K_1 = 1,11775515$ $K_2 = -0,0010606600$ $K_3 = 0,0010606600$
0,898/0,899	1,3335	0,0362	34,8454	$K_1 = 1,11651251$ $K_2 = -0,0010606600$ $K_3 = 0,0010606600$
0,897/0,898	1,9991	0,0544	31,3034	$K_1 = 1,11402723$ $K_2 = -0,0010606600$ $K_3 = 0,0010606600$
0,896/0,897	1,0039	0,0274	37,2609	$K_1 = 1,11402723$ $K_2 = -0,0010606600$ $K_3 = 0,0010606600$
0,9003/0,9004	1,8870	0,0509	31,8695	$K_1 = 1,11881154$ $K_2 = -0,00010606601$ $K_3 = 0,00010606601$
0,9002/0,9003	0,1492	0,0040	53,9021	$K_1 = 1,11868728$ $K_2 = -0,00010606601$ $K_3 = 0,00010606601$
0,9001/0,9002	1,7553	0,0474	32,4931	$K_1 = 1,11856301$ $K_2 = -0,00010606601$ $K_3 = 0,00010606601$
0,9/0,9001	1,6124	0,0436	33,2279	$K_1 = 1,11843875$ $K_2 = -0,00010606601$ $K_3 = 0,00010606601$
0,8999/0,9	0,3626	0,0098	46,1846	$K_1 = 1,11831448$ $K_2 = -0,00010606601$ $K_3 = 0,00010606601$
0,8998/0,8999	1,9214	0,0520	31,6999	$K_1 = 1,11819022$ $K_2 = -0,00010606601$ $K_3 = 0,00010606601$
0,8997/0,8998	1,3741	0,0372	34,9501	$K_1 = 1,11806596$ $K_2 = -0,00010606601$ $K_3 = 0,00010606601$
0,8996/0,8997	0,6370	0,0172	41,2835	$K_1 = 1,11794169$ $K_2 = -0,00010606601$ $K_3 = 0,00010606601$

Проанализировав значения полученных переходных затуханий для разных диаметров изоляций, можно сделать вывод, что ужесточение допуска на диаметр изолированной жилы обеспечивает гарантированное достижение требуемых показателей качества, а именно переходного затухания на ближнем конце, тем самым подтверждая ранее выдвинутое предположение.

Как видно из таблицы, наилучшие результаты достигаются при допуске, когда $X_B = +0,01$, и диаметрах изоляции 0,9/0,91 и 0,91/0,92 – это означает, что в паре одна изолированная жила имеет диаметр 0,91 мм, а другая 0,92 мм; при допуске, когда $X_B = +0,001$, и диаметрах изоляции 0,9/0,901 и 0,903/0,904; при допуске, когда $X_B = +0,0001$, и диаметрах изоляции 0,9002/0,9003; $X_H = -0,0001$ и диаметрах изоляции 0,8999/0,9. Следовательно, придерживаясь этих значений допусков на диаметр изоляции при изготовлении изолированных жил LAN-кабеля, можно достичь наибольшего значения переходного затухания. Также из результатов видно, что ужесточение допуска на диаметр приводит к незначительному уменьшению коэффициента емкостной связи K_1 и к значительному уменьшению коэффициентов емкостной связи K_2 и K_3 .

Заключение

Получены соотношения, связывающие диаметр изоляции и межосевые расстояния жил кабеля с коэффициентами емкостной связи K_1 , K_2 , K_3 .

Исходя из математического описания взаимного влияния на дальний и ближний конец в симметричных цепях получены соотношения для взаимного влияния между двумя витыми парами, а также соотношения, связывающие диаметр изоляции с коэффициентами связи, из которых непосредственно складывается влияние на дальний и ближний конец и, как следствие, переходные затухания. При условии, что не учитываются неоднородности волновых сопротивлений, неоднородности диэлектрика, рассматриваемые цепи имеют малую внутреннюю индуктивность, цепи нескрещенные параллельные.

Проведены экспериментальные исследования согласно имитационной модели. Получены результаты для случая, когда диаметры изолированных жил имеют одинаковое значение и когда диаметры изолированных жил имеют разные значения. Проведен анализ полученных результатов. Наилучшие показатели переходного затухания на ближнем конце достигаются при $X_B = 0$ и $X_H = 0$; $X_B = +0,001$ и $X_B = +0,002$; $X_B = +0,0002$ и $X_H = -0,0003$ в случае, когда диаметры изолированных жил одинаковые. В случае, когда диаметры изолированных жил разные, наилучшие результаты достигаются при $X_B = +0,001$, $X_B = +0,0001$, $X_H = -0,0001$.

Доказано, что гарантированное достижение требуемых показателей качества изготавливаемого LAN-кабеля обеспечивается ужесточением допусков на диаметр изолированных кабельных жил. Сформулированы величины допусков порядка 4 мкм на диаметр кабельных жил, изготавливаемых на экструзионных линиях, при выдерживании которых эксплуатационные характеристики симметричного кабеля вне зависимости от последующих производственных операций будут соответствовать требуемым значениям.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Денисов В.Ю., Митрошин В.Н., Чостковский Б.К. Математическое описание взаимного влияния в симметричной цепи (LAN-кабеле) на основе уравнения частных емкостей Максвелла //

- Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. 2019. Вып. 1 (61). С. 110–127.
2. Клейн В. Теория взаимного влияния в линиях связи. М.-Л.: ГЭИ, 1957. 326 с.
 3. Семенов А.Б., Стрижаков С.К., Сунчелей И.Р. Структурированные кабельные системы: 5-е изд. М.: АйТи, ДМК Пресс, 2014. 640 с.
 4. Самарский П.А. Основы структурированных кабельных систем. М.: ДМК Пресс, 2016. 216 с.
 5. Гроднев И.И., Шварцман В.О. Теория направляющих систем связи. М.: Связь, 1978. 296 с.
 6. Кабель ССА-UU004-5E-PVC-GY // Netlan. <http://www.netlancables.ru/CCA-UU004-5E-PVC-GY.cdr.pdf>
 7. Плис А.И., Сливина Н.А. Mathcad: математический практикум для экономистов и инженеров: Учеб. пособие. М., 1999. 656 с.
 8. ГОСТ Р 54429-2011. Кабели связи симметричные для цифровых систем передачи. <http://docs.cntd.ru/document/1200088857>
 9. Расчет и проектирование кабелей связи и радиочастотных кабелей / Под ред. Э.Т. Лариной. – М.: МЭИ, 1982. 104 с.
 10. Чостковский Б.К. Структурно-параметрический синтез систем оптимального управления совмещенными технологическими процессами производства кабелей связи по эксплуатационным критериям качества: Дис. ... д-ра. техн. наук. Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2007. 265 с.
 11. Чостковский Б.К., Смородинов Д.А. Математическая модель витой пары радиочастотного кабеля объекта управления // Вестник Самарского государственного университета. Сер. Физико-математические науки. 2008. Вып. 1 (16). С. 113–118.
 12. Милованов А.М., Чостковский Б.К. Регулирование коэффициентов емкостной связи // Техническая кибернетика: Сб. науч. тр. Куйбышев, 1974. С. 120–123.
 13. Елагин Ю.В. Информационно-измерительная система измерения и регистрации емкостных связей четверок кабеля в процессе скрутки // Всесоюзная науч.-техн. конф. «Автоматизация и механизация кабельного производства»: Тез. докладов. М.: Информэлектро, 1977. С. 51–52.
 14. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике. М.: ГИТТЛ, 1957. 608 с.
 15. Справочник по электротехническим материалам / Под ред. Ю.В. Корицкого, В.В. Пасынкова, Б.М. Тареева. Т. 3. 3-е изд., перераб. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1988. 728 с.

Статья поступила в редакцию 12 марта 2020 года

FORMING OF THE DIAMETER TOLERANCES OF THE INSULATED CORE TO PROVIDE THE GUARANTEED ACHIEVEMENT OF THE REQUIRED QUALITY INDICATORS OF THE SYMMETRICAL COMMUNICATION CABLE (LAN-CABLE)

V. Yu. Denisov

Samara Space Centre
18, Zemetsa str., Samara, 443009

Abstract. *A LAN-cable was considered as an object of research. A mathematical description of the mutual influence on the far and near ends in symmetrical communication cables is presented. It's assumed that the tightening of the tolerance for the diameter of the insulated core will ensure the guaranteed achievement of the required quality indicators of the symmetrical communication cable. An algorithm for calculating the mutual influence between two and four circuit is given. A mathematical description was obtained and a simulation model of the mutual influence on the near and far ends was constructed for two twisted pairs, taking into account the length of the chain and the frequency of the transmitted signal. Computer studies were performed when the diameters of isolated LAN-cable cores were varied, taking into account its length, the mutual influence on the near end of the coefficients*

Vladimir Yu. Denisov, Engineer.

of the capacitive coupling, and transient attenuation on the near end. The obtained results confirmed the hypothesis and are the basis for the synthesis of automatic control systems for the LAN-cable manufacturing process.

Keywords: the LAN-cable, the insulated core, transient attenuation, the tolerance for the diameter.

REFERENCES

1. Denisov V.Yu., Mitroshin V.N., Chostkovskiy B.K. Mathematical description of mutual influence in a symmetric circuit (LAN cable) based on the basis of the equation of partial capacities Maxwell // Vestn. Samar. Gos. Tekhn. Un-ta. Ser. Tekhnicheskie nauki. 2019. No. 1(61). Pp. 110–127.
2. Kleyin V. Theory of mutual influence in communication lines. Moscow. Leningrad. GEI, 1957. 326 p.
3. Semenov A.B., Strizhakov S.K., Suncheley I.R. Structured Cabling Systems. Moscow. IT Co., DMK Press, 2014. 640 p.
4. Samarskiy P.A. Basics of structured cabling systems. Moscow. DMK Pres, 2016. 216 p.
5. Grodnev I.I., Shvartsman O.V. Theory of guiding communication systems. Moscow. Svyaz', 1978. 296 p.
6. Cable CCA-UU004-5E-PVC-GY // Netlan. <http://www.netlancables.ru/CCA-UU004-5E-PVC-GY.cdr.pdf>
7. Plis A.I., Slivina N.A. Mathcad: mathematical workshop for economists and engineers. 1999. 656 p.
8. GOST R 54429-2011. Kabeli svyazi simmetrichnyye dlya stifrovyyh sistem peredachi. <http://docs.cntd.ru/document/1200088857>
9. Calculation and design of communication cables and radio frequency cables. Edited by E.T. Larina. Moscow. MEI, 1982. 104 p.
10. Chostkovskiy B.K. Strukturno-parametricheskii sintez sistem optimal'nogo upravleniya sovmeshchennymi tekhnologicheskimi protsessami proizvodstva kabeley svyazi po ekspluatatsionnym kriteriyam kachestva. Diss. ... dokt. tekhn. nauk. Samara, Samar. Gos. Tekhn. Un-t, 2007. 265 p.
11. Chostkovskiy B.K., Smorodinov D.A. Mathematical model of twisted pairs radio-frequency cable of control object // Vestn. Samar. Gos. Tekhn. Un-ta. Ser. Fiziko-matematicheskie nauki. 2008. No. 1 (16). Pp. 113–118.
12. Milovanov A.M., Chostkovskiy B.K. Regulation of capacitance coupling coefficients // Tekhnicheskaya kibernetika: Sbornik nauchn. tr. Kuibyshev. 1974. Pp. 120–123.
13. Elagin Yu.V. Information and measurement system for measuring and registering capacitance connections of cable fours during the twisting process // Vsesoyuznaya nachn.-tekhn. konf. «Avtomatizatsiya i mekhanizatsiya kabel'nogo proizvodstva»: Tez. dokladov. Moscow. Informelektro, 1977. Pp. 51–52.
14. Bronshteyn I.N., Semendyaev K.A. Math reference. Moscow, GITTL, 1957. 608 p.
15. Handbook of electrical materials. Edited by Yu.V. Korickiy, V.V. Pasyukov, B.M. Tareev. V. 3. 3rd ed. revised. Leningrad. Energoatomizdat. Leningr. otd-nie, 1988. 728 p.

УДК 681.5

ДВУХКАНАЛЬНОЕ ОПТИМАЛЬНОЕ ПО БЫСТРОДЕЙСТВИЮ УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА С УЧЕТОМ ФАЗОВОГО ОГРАНИЧЕНИЯ НА МАКСИМАЛЬНУЮ ТЕМПЕРАТУРУ

Н.А. Ильина

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

E-mail: ilina.natalyaa@yandex.ru

Аннотация. *Предлагается постановка и метод решения задачи оптимального по быстродействию управления процессом периодического индукционного нагрева бесконечной пластины с двумя управляющими воздействиями по величине внутренних источников тепла с учетом технологических ограничений применительно к одномерной модели температурного поля. 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 управляющими 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 управлениями, которая проводится в два этапа: на первом этапе рассматривается случай индукционного нагрева без учета фазового ограничения, на втором – на базе результатов первого этапа решение получено с учетом ограничения на максимальную температуру нагреваемой заготовки.*

Ключевые слова: *оптимальное управление, альтернансный метод, задача полубесконечной оптимизации, индукционный нагрев.*

Процесс нагрева металлических изделий и полуфабрикатов уже давно является неотъемлемой частью производственного процесса в различных отраслях промышленности. Технологии индукционного нагрева используются для подготовки металлических заготовок к пластической деформации, для чего их сначала предварительно нагревают до требуемой температуры [1].

Нередки случаи, когда возникает необходимость в коррекции оптимальных режимов нагрева, вызванной жесткими технологическими требованиями к поведению температурного поля в процессе управления. Подобные ограничения могут

накладываться на максимальное значение температуры по всему объему нагреваемой заготовки во избежание нежелательных изменений структурных свойств металла.

В рамках данной работы на первом этапе будет рассмотрена такая постановка задачи оптимального управления (ЗОУ), при которой фазовое ограничение не будет учитываться, чтобы определить, выполняется ли в таком варианте требование к максимальной температуре любой точки заготовки «автоматически». Если оно не выполняется, то необходимо проводить коррекцию оптимального режима индукционного нагрева с учетом фазового ограничения на температурное поле.

Как известно, решение задач, связанных с процедурой предварительного нагрева заготовки до требуемого температурного состояния, в большинстве своем требует привлечения теории оптимального управления объектами с распределенными параметрами (ОРП).

Общая постановка задачи оптимального управления

В качестве объекта управления рассматривается технологический процесс индукционного нагрева металлической заготовки с двумя управлениями по мощности внутренних источников тепла, воздействующих на различные поверхности неограниченной пластины. В условиях пренебрежения неравномерностью распределения температуры по длине и ширине заготовки 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]:

$$\frac{\partial Q(x, t)}{\partial t} = a \frac{\partial^2 Q(x, t)}{\partial x^2} + W_1(x)u_1(t) + W_2(x)u_2(t), \quad x \in [0, R]; t \in [0, T]. \quad (1)$$

Здесь a – коэффициент температуропроводности; R – толщина пластины; $W_1(x), W_2(x)$ – функция распределения электромагнитных внутренних источников тепла; $u_1(t), u_2(t)$ – удельные мощности тепловыделения, рассматриваемые в качестве управляющих воздействий и изменяющиеся в заранее заданных пределах:

$$0 \leq u_1(t) \leq u_{1\max}; \quad 0 \leq u_2(t) \leq u_{2\max}. \quad (2)$$

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

$$Q(x, 0) = Q_0(x) = Q_0 = \text{const} = 0. \quad (3)$$

На обеих поверхностях действуют одинаковые мощности внутренних источников тепла $W_1(x)$ и $W_2(x)$, определяемые известными выражениями [3]:

$$W_1(x) = \frac{\text{ch}\left(\sqrt{2}\xi \frac{x}{R}\right) - \cos\left(\sqrt{2}\xi \frac{x}{R}\right)}{\text{sh}\left(\sqrt{2}\xi\right) - \sin\left(\sqrt{2}\xi\right)} \sqrt{2}\xi, \quad W_2(x) = \frac{\text{ch}\left(\sqrt{2}\xi \frac{R-x}{R}\right) - \cos\left(\sqrt{2}\xi \frac{R-x}{R}\right)}{\text{sh}\left(\sqrt{2}\xi\right) - \sin\left(\sqrt{2}\xi\right)} \sqrt{2}\xi,$$

где ξ – характерный параметр, определяемый соотношением

$$\xi = \frac{R\sqrt{2}}{\delta}, \quad \delta = \sqrt{\frac{2}{\mu\omega\sigma}}.$$

Здесь δ – глубина проникновения тока в металл; ω – частота питающего тока; σ – электропроводность нагреваемого материала; μ – абсолютная магнитная проницаемость. Типовые граничные условия для модели объекта (1) – (2) в общем случае имеют вид [4]

$$\begin{aligned} -\lambda \frac{\partial Q(0,t)}{\partial x} &= Q_{cp}(t) - \alpha_1 Q(0,t), \quad t > 0; \\ \lambda \frac{\partial Q(R,t)}{\partial x} &= Q_{cp}(t) - \alpha_2 Q(R,t), \quad t > 0, \end{aligned} \quad (4)$$

где λ – коэффициент теплопроводности;
 α_1, α_2 – заданные теплофизические постоянные;
 $Q_{cp}(t) = 0$ – температура окружающей среды.

Соотношения (4) соответствуют граничным условиям 3-го рода [2]. Наглядное представление управляющих воздействий на поверхности заготовки представлено на рис. 1.

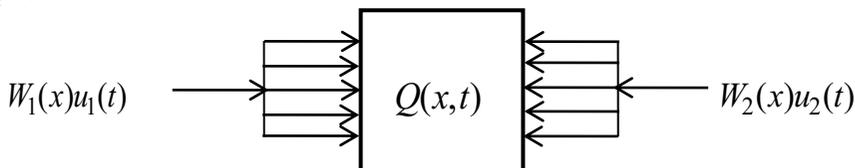


Рис. 1. Иллюстрация двухканального распределенного управления

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

$$\max_{x \in [0, R]} |Q(x, T) - Q^*| \leq \varepsilon. \quad (5)$$

На всем протяжении периодического нагрева может накладываться ограничение на максимальное значение температуры по всему объему заготовки, нарушение которого вызывает оплавление нагреваемой заготовки или приводит к недопустимому изменению структуры металла. Такое ограничение заключается в требовании к максимальной температуре не превышать некоторую заданную допустимую величину $Q_{доп}$ и описывается в форме следующего неравенства:

$$Q(x) = \max Q(x, t) \leq Q, \quad t \in [0, T]. \quad (6)$$

Как уже было сказано, на первом этапе решения ЗОУ требование (6) не будет приниматься в расчет при постановке задачи.

В качестве критерия оптимальности выступает общее время T процесса нагрева в виде следующего интегрального функционала качества:

$$I = \int_0^T dt = T \rightarrow \min_{u_1(t), u_2(t)}. \quad (7)$$

Объект, описываемый соотношениями (1) – (7), является объектом с распределенными параметрами. Для поиска вход-выходной характеристики ОРП с двумя

управляющими воздействиями применяется метод конечных интегральных преобразований. Применение этого метода, позволяющего описать ОРП соответствующим модальным представлением, подробно описано в [5] при решении подобной задачи.

Метод конечных интегральных преобразований [4-7] определяет функцию состояния температурного поля $Q(x, t)$ в зависимости от пространственной координаты $x \in [0, R]$ и времени $t \in [0, T]$ в форме разложения в ряд по собственным функциям $\varphi(\mu_n, x)$ с временными модами $\bar{Q}_n(\mu_n, t)$ начально-краевой задачи (1) – (5):

$$\frac{d\bar{Q}_n(\mu_n, t)}{dt} = -\mu_n^2 \bar{Q}_n(\mu_n, t) + \frac{1}{\lambda E_n} (W_{1n} u_1(t) + W_{2n} u_2(t)), \quad n=1, 2, \dots; \quad (8)$$

$$\bar{Q}_n(\mu_n, 0) = \bar{Q}_0(\mu_n) = 0; \quad (9)$$

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

где собственные функции $\varphi(\mu_n, x)$, собственные числа μ_n^2 , нормирующие множители $\frac{1}{E_n}$ и числа η_n определяются следующими соотношениями [4,5]:

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

$$\eta_n \operatorname{tg} \eta_n - Bi = 0; \quad \mu_n = \frac{\sqrt{a}}{R} \eta_n;$$

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

Выражение для $Q(x, t)$ в форме (10) находится в явном виде по алгоритму, описанному в [5].

Зависимость температурного поля от управляющих воздействий по мощности внутренних источников тепла в выражении (10) без учета фазовых ограничений описывается в виде следующего равенства:

$$Q(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \bar{Q}_n(\eta_n, t) \varphi(\eta_n, x) = \sum_{n=1}^{\infty} \varphi(\eta_n, x) \times \left[\int_0^R \int_0^t \left(W_1(\xi) \varphi(\eta_n, \xi) \frac{1}{a} u_1(\tau) + W_2(\xi) \varphi(\eta_n, \xi) \frac{1}{a} u_2(\tau) \right) \exp\left(-\eta_n^2 \frac{a}{R^2} (t - \tau)\right) d\xi d\tau \right]. \quad (11)$$

Выражение (11) представлено в форме двойных интегралов по пространственно-временной координате и определяет реакцию объекта на воздействия $W_1(x)u_1(t)$, $W_2(x)u_2(t)$.

В итоге может быть сформулирована следующая задача оптимального по быстродействию управления. Требуется найти такие стесненные ограничением (2) программные управляющие воздействия $u_1^*(t)$, $u_2^*(t)$, которые переводят объект управления (8) из заданного начального состояния (9) в требуемое конечное согласно (5), где $Q(x, t)$ определяется выражением (11), при минимальном значении

критерия оптимальности (7) в условиях, когда ограничение на поведение температурного поля (6) не учитывается на всем протяжении процесса управления.

Параметризация управляющих воздействий

На основании процедуры принципа максимума Понтрягина [8], применение которого распространяется на бесконечномерный объект управления [9] (9), (10), оптимальное по быстродействию управление *без* учета фазовых ограничений устанавливается в форме релейных функций времени, попеременно принимающих только свои предельно допустимые значения согласно (2) с точностью до числа N_1 и N_2 и длительностей $\Delta_{1i}^{(N_1)}$ и $\Delta_{2i}^{(N_2)}$ интервалов постоянства управляющих воздействий [3-9] соответственно $u_1(t)$ и $u_2(t)$:

$$\begin{aligned} u_1^*(\Delta_1^{(N_1)}, t) &= \frac{u_{1\max}}{2} + (-1)^{j+1} \frac{u_{1\max}}{2}, \sum_{i=0}^{j-1} \Delta_{1i}^{(N_1)} < t < \sum_{i=0}^j \Delta_{1i}^{(N_1)}, j = \overline{1, N_1}, \Delta_{10} = 0, \Delta_1^{(N_1)} = \Delta_{1i}^{(N_1)}; \\ u_2^*(\Delta_2^{(N_2)}, t) &= \frac{u_{2\max}}{2} + (-1)^{j+1} \frac{u_{2\max}}{2}, \sum_{i=0}^{j-1} \Delta_{2i}^{(N_2)} < t < \sum_{i=0}^j \Delta_{2i}^{(N_2)}, j = \overline{1, N_2}, \Delta_{20} = 0, \Delta_2^{(N_2)} = \Delta_{2i}^{(N_2)}. \end{aligned} \quad (12)$$

В пределах первого интервала постоянства согласно ограничениям (2) здесь и далее принимается $u_1^*(t) = u_{1\max}$, $u_2^*(t) = u_{2\max}$ в рассматриваемой задаче нагрева пластины до температуры $Q^* > Q_0 = 0$.

Выражение (12) свидетельствует о том, что в процессе нагрева объекта происходит скачкообразное (релейное) переключение управляющих воздействий с максимального значения, соответствующего нагреву заготовки с максимальной интенсивностью, когда каждый из индукторов включается на полную мощность, на минимальное значение мощности при отключении индукторов от сети.

Условимся, что далее будет рассмотрен наиболее употребительный на практике случай двухинтервального управления (рис. 2б), для этого примем $N_1 = N_2 = 2$. Поскольку оба управляющих воздействия (12) должны заканчиваться в один и тот же момент времени, то длительности интервалов каждого из управлений стесняются условием равенства отдельных сумм: $\Delta_{11}^{(2)} + \Delta_{12}^{(2)} = \Delta_{21}^{(2)} + \Delta_{22}^{(2)}$. После подстановки управления вида (12) в (11) и вычисления интегралов при $t = T$ получим параметризованное представление конечного температурного состояния:

$$\begin{aligned} Q(x, \Delta_{11}^{(2)}, \Delta_{12}^{(2)}, \Delta_{21}^{(2)}, \Delta_{22}^{(2)}) &= \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\lambda R^2}{a E_n \eta_n^2} \left(\cos\left(\eta_n \frac{x}{R}\right) + \frac{Bi_1}{\eta_n} \sin\left(\eta_n \frac{x}{R}\right) \right) \times \\ &\times \left[W_{1n} u_{1\max} \left(e^{-\eta_n^2 \frac{a}{R^2} \Delta_{12}^{(2)}} - e^{-\eta_n^2 \frac{a}{R^2} (\Delta_{11}^{(2)} + \Delta_{12}^{(2)})} \right) + W_{2n} u_{2\max} \left(e^{-\eta_n^2 \frac{a}{R^2} \Delta_{22}^{(2)}} - e^{-\eta_n^2 \frac{a}{R^2} (\Delta_{21}^{(2)} + \Delta_{22}^{(2)})} \right) \right], \end{aligned} \quad (13)$$

где W_{1n}, W_{2n} – моды разложения функций $W_1(x), W_2(x)$ в ряд по собственным функциям.

Релейный характер двухканального двухинтервального оптимального по быстродействию управления, найденный в (12), представлен на рис. 2а, из которого видно, что действие обоих управляющих воздействий начинается и заканчивается одномоментно. В связи с этим удобнее перейти к двум комбинациям искомым величин: в качестве трех независимо варьируемых параметров выберем

$\Delta_{11}^{(2)}, \Delta_{12}^{(2)}, \Delta_{21}^{(2)}$ и $\Delta_{21}^{(2)}, \Delta_{22}^{(2)}, \Delta_{11}^{(2)}$, а интервалы нагрева минимальной интенсивности для первого $\Delta_{12}^{(2)}$ и второго $\Delta_{22}^{(2)}$ управления обозначим в (13) как $\Delta_{22}^{(2)} = \Delta_{11}^{(2)} + \Delta_{12}^{(2)} - \Delta_{21}^{(2)}$ и $\Delta_{12}^{(2)} = \Delta_{21}^{(2)} + \Delta_{22}^{(2)} - \Delta_{11}^{(2)}$.

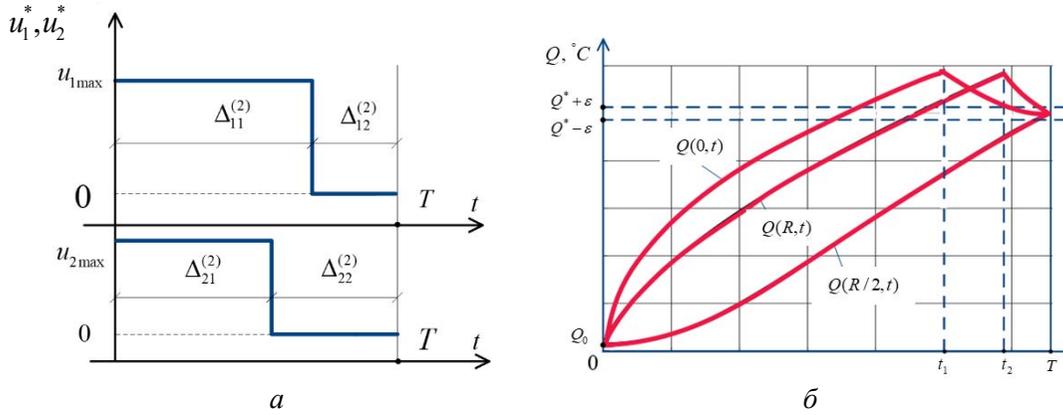


Рис. 2. Характер изменения оптимальных управляющих воздействий (а) и управляемой величины (б) в процессе индукционного нагрева

Редукция к задаче полубесконечной оптимизации

При полученном параметрическом представлении искомым управляющим воздействиям (13) критерий оптимальности (7) в соответствии с рис. 2а определяется в виде простой суммы длительностей отдельных интервалов постоянства оптимального управления:

$$I = \Delta_{11}^{(2)} + \Delta_{12}^{(2)} = \Delta_{21}^{(2)} + \Delta_{22}^{(2)} \rightarrow \min, \quad (14)$$

а условие (5) оценки конечного распределения температур будет иметь вид:

$$\Phi(\Delta_{ij}^{(2)}) = \max_{x \in [0, R]} |Q(\Delta_{ij}^{(2)}) - Q^*| \leq \varepsilon, \quad i, j = \overline{1, 2}, \quad \varepsilon > 0. \quad (15)$$

Здесь $Q(x, \Delta_{ij}^{(2)})$ определяется по формуле (13).

Таким образом, производится точная редукция исходной ЗОУ к задаче полубесконечной оптимизации (ЗПО) на минимум целевой функции (14) конечного числа переменных $\Delta_{ij}^{(2)}$, $i, j = \overline{1, 2}$ с бесконечным числом ограничений (15), порождаемых требованием обеспечения заданной точности равномерного приближения во всех точках $x \in [0, R]$ [9,10].

Решение задачи полубесконечной оптимизации по схеме альтернансного метода

Задача (14), (15) разрешима в условиях $N_1 = N_2 = 2$ не при всех ε , а только для $\varepsilon \geq \varepsilon_{\min}^{(2)}$ в (15), где $\varepsilon_{\min}^{(2)}$ – минимально достижимая величина ε в рассматриваемом классе граничных управлений:

$$\varepsilon_{\min}^{(2)} = \min_{\Delta_{ij}^{(2)}} \left\{ \max_{x \in [0, R]} |Q(\Delta_{ij}^{(2)}) - Q^*| \right\}. \quad (16)$$

Решение $\Delta_{ij}^{(2)}$, $i, j = \overline{1, 2}$ задачи (14), (15) при достаточно малостеснительных допущениях обладает базовыми альтернансными свойствами [11].

Основное свойство заключается в том, что число точек $x_j^0 \in [0, R]$, $j = \overline{1, R_x}$, в которых достигаются предельно допустимые абсолютные отклонения $Q(x, \Delta_{ij}^{(2)})$ от Q^* , равные ε , всегда оказывается равным числу всех неизвестных в ЗПО (14), (15).

В качестве неизвестных фигурируют длительности интервалов постоянства $\Delta_{11}^{(2)}, \Delta_{12}^{(2)}, \Delta_{21}^{(2)}$ или $\Delta_{21}^{(2)}, \Delta_{22}^{(2)}, \Delta_{11}^{(2)}$ оптимального управления и величина минимакса $\varepsilon_{\min}^{(2)}$ в случае $\varepsilon = \varepsilon_{\min}^{(2)}$ в (16).

Таким образом, на искомом решении $\Delta_{ij}^{(2)}$, $i, j = \overline{1, 2}$ задачи быстрогодействия выполняются R_x равенств вида

$$\left| Q(x_j^0, \Delta_{ij}^{(2)}) - Q^* \right| = \varepsilon, \quad j = \overline{1, R_x}; \quad (17)$$

$$R_x = \begin{cases} s, & \varepsilon > \varepsilon_{\min}^{(2)}; \\ s + 1, & \varepsilon = \varepsilon_{\min}^{(2)}. \end{cases} \quad (18)$$

Здесь s – число свободно варьируемых параметров в составе $\Delta_{ij}^{(2)}$, $i, j = \overline{1, 2}$, равное $s = N_1 + N_2 - 1$ в условиях одинаковой длительности процесса управления для обоих управляющих воздействий (см. рис. 2). В рассматриваемом случае двухинтервального характера управления при $N_1 = N_2 = 2$ имеем $s = N_1 + N_2 - 1 = 2 + 2 - 1 = 3$ в предельном случае $\varepsilon = \varepsilon_{\min}^{(2)}$. То есть искомыми параметрами будут $s = 3$ длительности интервалов нагрева.

Если требуемая точность температурного отклонения ε задается конкретным числом, превышающим минимаксное значение $\varepsilon_{\min}^{(2)}$, то задача характеризуется только искомыми параметрами в составе $\Delta_{ij}^{(2)}$, $i, j = \overline{1, 2}$, и тогда число точек R_x оказывается равным s согласно условию (18). В этом случае в качестве неизвестных будут фигурировать длительности интервалов постоянства оптимального управления.

Если же значение ε по заданным изначально условиям должно совпадать с заранее неизвестной величиной минимакса $\varepsilon_{\min}^{(2)}$, то в соответствии с (18) точек x_j должно быть на одну больше, то есть $R_x = s + 1$. Тогда наряду с длительностями интервалов $\Delta_{ij}^{(2)}$, $i, j = \overline{1, 2}$ величину $\varepsilon_{\min}^{(2)}$ надо отнести к искомым параметрам.

Рассмотрим наиболее интересный предельный вариант при $\varepsilon = \varepsilon_{\min}^{(2)}$, тогда число уравнений в (18) будет равно

$$R_x = s + 1 = 3 + 1 = 4, \quad (19)$$

при наличии четырех неизвестных: $\Delta_{11}^{(2)}, \Delta_{12}^{(2)}, \Delta_{21}^{(2)}, \varepsilon_{\min}^{(2)}$ или $\Delta_{21}^{(2)}, \Delta_{22}^{(2)}, \Delta_{11}^{(2)}, \varepsilon_{\min}^{(2)}$.

Таким образом, соотношения (17) с учетом (18), (19) оказываются замкнутыми относительно всех параметров процесса управления, что указывает на возможность решения исходной задачи оптимального управления.

Основное затруднение теперь состоит в том, что равенствам (17) формально соответствует множество вариантов по форме кривой пространственного распределения $Q(x_j^0, \Delta_{ij}^{(2)})$. Для однозначного определения вида этой кривой нужно установить знаки разностей $Q(x_j^0, \Delta_{ij}^{(2)}) - Q^*$ в каждом из уравнений и найти координаты точек x_j^0 . Эта задача может быть решена только при известной конфигурации кривой температурного распределения $Q(x_j^0, \Delta_{ij}^{(2)}) - Q^*$ на отрезке $[0, R] \ni x$ при двухинтервальном оптимальном управлении по мощности источников тепла, устанавливаемой на основании физических закономерностей процессов нестационарной теплопроводности в зависимости от величины ε .

Анализ этих закономерностей [11,12] приводит к двум вариантам конфигурации кривых температурного распределения $Q(x_j^0, \Delta_{ij}^{(2)}) - Q^*$ в условиях $\varepsilon = \varepsilon_{\min}^{(2)}$ в (17), представленным на рис. 3, где для кривой *a* принимаются длительности $\Delta_{11}^{(2)}, \Delta_{12}^{(2)}, \Delta_{21}^{(2)}$, а для кривой *б* – длительности $\Delta_{21}^{(2)}, \Delta_{22}^{(2)}, \Delta_{11}^{(2)}$.

Отметим, что на кривой *a* и кривой *б*, указанных на рис. 3, максимально допустимые отклонения $Q(x_j^0, \Delta_{ij}^{(2)})$ от Q^* оказываются знакоперевающими в последовательно расположенных точках $x_j \in [0, R]$, образуя чебышевский альтернанс.

Теперь, когда характер зависимости $Q(x_j^0, \Delta_{ij}^{(2)}) - Q^*$ найден из знаний предметной области процесса нестационарной теплопроводности, система (17) может быть однозначно определена для каждого из вариантов кривых конечного температурного распределения.

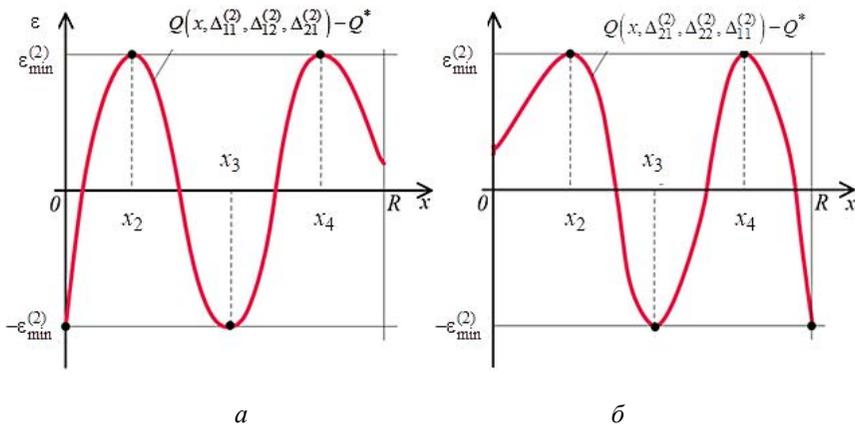


Рис. 3. Два варианта кривых результирующего температурного распределения при $\varepsilon = \varepsilon_{\min}^{(2)}$:

- a* – при поиске двух интервалов для управления u_1 ;
- б* – при поиске двух интервалов для управления u_2

Условимся, что будем рассматривать оба варианта кривой температурного распределения, приведенной на рис. 3, для каждой из которых запишем соответствующую систему уравнений, дополняемую условием существования экстремума во внутренних точках отрезка $[0, R]$ максимума или минимума разности температур:

$$\begin{aligned}
 Q(0, \Delta_{11}^{(2)}, \Delta_{12}^{(2)}, \Delta_{21}^{(2)}) - Q^* &= -\varepsilon_{\min}^{(2)}; \\
 Q(x_2, \Delta_{11}^{(2)}, \Delta_{12}^{(2)}, \Delta_{21}^{(2)}) - Q^* &= \varepsilon_{\min}^{(2)}; \\
 Q(x_3, \Delta_{11}^{(2)}, \Delta_{12}^{(2)}, \Delta_{21}^{(2)}) - Q^* &= -\varepsilon_{\min}^{(2)}; \\
 Q(x_4, \Delta_{11}^{(2)}, \Delta_{12}^{(2)}, \Delta_{21}^{(2)}) - Q^* &= \varepsilon_{\min}^{(2)}; \\
 \frac{\partial Q(x_j, \Delta_{11}^{(2)}, \Delta_{12}^{(2)}, \Delta_{21}^{(2)})}{\partial x} &= 0, j = 2, 3, 4
 \end{aligned}
 \tag{20, а}$$

$$\begin{aligned}
 Q(x_2, \Delta_{21}^{(2)}, \Delta_{22}^{(2)}, \Delta_{11}^{(2)}) - Q^* &= \varepsilon_{\min}^{(2)}; \\
 Q(x_3, \Delta_{21}^{(2)}, \Delta_{22}^{(2)}, \Delta_{11}^{(2)}) - Q^* &= -\varepsilon_{\min}^{(2)}; \\
 Q(x_4, \Delta_{21}^{(2)}, \Delta_{22}^{(2)}, \Delta_{11}^{(2)}) - Q^* &= \varepsilon_{\min}^{(2)}; \\
 Q(R, \Delta_{21}^{(2)}, \Delta_{22}^{(2)}, \Delta_{11}^{(2)}) - Q^* &= -\varepsilon_{\min}^{(2)}; \\
 \frac{\partial Q(x_j, \Delta_{21}^{(2)}, \Delta_{22}^{(2)}, \Delta_{11}^{(2)})}{\partial x} &= 0, j = 2, 3, 4
 \end{aligned}
 \tag{20, б}$$

Каждая из систем (20) состоит из семи уравнений с семью неизвестными и решается стандартными численными методами. Численные результаты решения систем уравнений (20, а) и (20, б) с использованием программной среды MATLAB [14-17] были получены применительно к исходным данным, указанным в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Характеристики нагреваемых заготовок

Параметр	Значение
Материал заготовки	титан
R , толщина заготовки, м	0,2
λ , коэффициент теплопроводности, Вт/(м · °С)	14
α_1 , коэффициент конвективной теплопередачи	32,5
α_2 , коэффициент конвективной теплопередачи	22,5
a , коэффициент температуропроводности, м ² /с	$4,3 \cdot 10^{-6}$

Исходные данные для процесса нагрева

Параметр	Значение
Bi_1 , критерий Био	0,4643
Bi_2 , критерий Био	0,3214
Q_0 , начальная температура, °C	0
Q^* , конечная температура, °C	960
$P_{1\max}$, максимальная величина поверхностной мощности нагрева по первому каналу управления, кВт/м ²	106
$P_{2\max}$, максимальная величина поверхностной мощности нагрева по второму каналу управления, кВт/м ²	180

Результаты расчета оптимального по быстродействию индукционного процесса управления без учета технологических ограничений на максимальную температуру для системы (20, а), соответствующей кривой *a* на рис. 3: $\Delta_{11}^{(2)} = 1524$ с, $\Delta_{12}^{(2)} = 606$ с, $\Delta_{21}^{(2)} = 1853$ с, $\varepsilon_{\min}^{(2)} = 16,54$ °C.

Результаты решения системы (20, б), соответствующей кривой *b* на рис. 3: на рис. 3: $\Delta_{11}^{(2)} = 1732$ с, $\Delta_{12}^{(2)} = 312$ с, $\Delta_{21}^{(2)} = 1416$ с, $\varepsilon_{\min}^{(2)} = 13,67$ °C.

Полученные при расчетах кривые температурного отклонения от заданной величины представлены на рис.4.

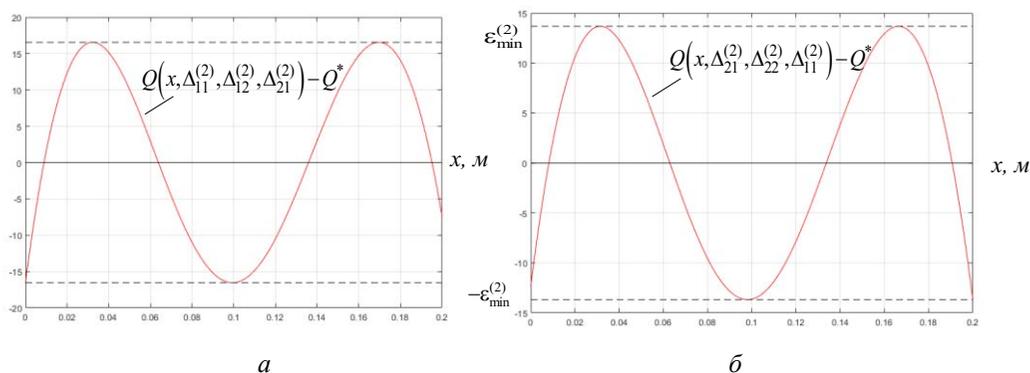


Рис. 4. Кривые температурного распределения при $\varepsilon = \varepsilon_{\min}^{(2)}$, полученные при решении систем (20, а) и (20, б) без учета фазового ограничения:

a – при поиске двух интервалов для управления u_1 ;

b – при поиске двух интервалов для управления u_2

Решение систем уравнений производилось с учетом первых 30 членов бесконечного ряда в выражении (13).

Таким образом, решение системы (20, б) является оптимальным и по быстродействию, и по точности нагрева. Именно для этого варианта решения построим

график изменения температуры в процессе нагрева. На рис. 5 можно увидеть характер изменения температурного поля в трех точках: на крайних границах $x=0, x=R$ и в центре пластины.

Остановимся на рис. 5 подробнее. Можно видеть, что максимальная температура достигает значения более $1500\text{ }^{\circ}\text{C}$. Очевидно, что если такой оптимальный процесс с управлением вида (12), рассчитанный без учета (6), не нарушает этого ограничения, то он является оптимальным и с учетом данных ограничений, которые выполняется в некотором роде «автоматически».

Результаты решения задачи оптимального процесса управления во времени без учета технологических ограничений, отвечающие алгоритму (12), указывают, в пределах какого интервала постоянства оптимального управляющего воздействия может возникнуть нарушение ограничения на максимум допустимой температуры и как его следует изменить, чтобы выполнить неравенство (6). То есть первый этап решения задачи заключается в обнаружении выполнения или невыполнения условия (6) в каждом отдельном случае.

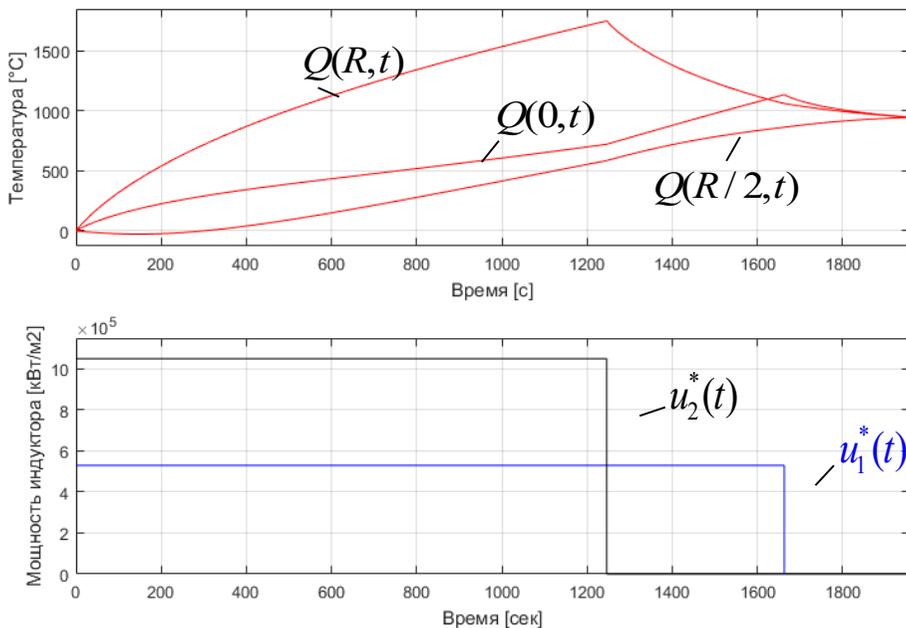


Рис. 5. Изменение управляемой величины и управляющих воздействий на всем протяжении оптимального процесса управления без учета фазового ограничения

Рассмотрим случай, когда условие (6) не выполняется «автоматически» и возникает необходимость ограничения, например, управления $u_2^*(t)$ из-за превышения допустимого уровня температуры $Q_{\text{доп}} = 1400\text{ }^{\circ}\text{C}$. Очевидно, что коррекция оптимального режима нагрева в связи с фазовым ограничением оказывается необходимой только в пределах первого интервала процесса нагрева с максимальной мощностью $u_2^*(t) = u_{2\text{max}}$, что соответствует наиболее распространенному на практике случаю.

В источнике [3] показано, что процедура коррекции сводится к подбору таких управляющих воздействий на соответствующих участках в пределах первого интервала, которые поддерживают максимальную температуру Q_{\max} на предельно допустимом уровне $Q_{\text{доп}}$. В [3] предлагается несколько вариантов оптимальной программы мощности нагрева, выбор конкретной из них зависит от специфики отдельной рассматриваемой задачи.

В итоге алгоритм оптимального управления усложняется на первом интервале наличием «участка движения по ограничениям», когда $Q_{\max} = Q_{\text{доп}}$. На втором интервале нагрева в данной постановке задачи оптимальный режим нагрева остается неизменным.

Физика построения нового алгоритма управления с учетом фазового ограничения заключается в следующем. На первом этапе проводится форсированный нагрев заготовки с максимальной интенсивностью при $u_2^*(t) = u_{2\max}$ применительно к рассмотренной выше задаче. В момент, когда температура $Q(x, t)$ достигает величины $Q_{\text{доп}}$, следует участок поддержания на этом уровне управляющим воздействием $\bar{u}_2(t)$ по мощности нагрева, которое скачкообразно уменьшается относительно $u_{2\max}$ с целью снижения скорости роста температуры. Поддержание равенства $Q_{\max} = Q_{\text{доп}}$ требует непрерывного уменьшения мощности тепловыделения по мере выравнивания температурных перепадов.

В соответствии со сказанным алгоритм оптимального по быстрдействию управления с учетом фазовых ограничений (6) вместо (12) принимает следующий вид:

$$u_2^* = \begin{cases} u_{2\max}, & t \in (0, \varphi_0); \\ \bar{u}(t), & t \in (\varphi_0, \Delta_{21}^{(2)}); \\ 0, & t \in (\Delta_{21}^{(2)}, T); \end{cases} \quad (21)$$

где $\bar{u}(t)$ – стабилизирующее управление, которое находится [14]:

$$\bar{u}(t) \cong a_Q + b_Q e^{-\beta_Q(t-\varphi_0)}. \quad (22)$$

Здесь φ_0 – момент достижения $Q_{\text{доп}}$. Коэффициенты a_Q, b_Q, β_Q находятся по выражениям [14]:

$$a_Q = \frac{L_1 \mu_2^2 + L_2 \mu_1^2}{E_1 \mu_2^2 + E_2 \mu_1^2}; \quad b_Q = \frac{(\mu_2^2 - \mu_1^2)(E_1 L_2 + E_2 L_1)}{(E_1 + E_2)(E_1 \mu_2^2 + E_2 \mu_1^2)}; \quad \beta_Q = \frac{E_1 \mu_2^2 + E_2 \mu_1^2}{E_1 + E_2};$$

$$L_n = \theta_n A_n \eta_n^2 - \frac{u_{1\max}}{u_{2\max}}; \quad \theta_n = \int_0^R Q \left(\frac{x}{R} \nu_0 \right) \cos \left(\frac{x}{R} \eta_n \right) dx; \quad (23)$$

$$A_n = \frac{2\eta_n^2 \cos(\eta_n R)}{(\eta_n^2 + Bi_2^2 + Bi_2) \sin(\eta_n)}; \quad E_n = A_n \cdot W_n(\xi),$$

где η_1^2, η_2^2 – первые два из собственных числа в (10). Именно в выражении (23) для коэффициента L_n заключена особенность корректировки оптимального режима

нагрева при двухканальном управлении по сравнению с выражением, представленным в [14], за счет управляющего воздействия $u_{1\max}$ по первому каналу, в котором управление не ограничивается.

Первый временной момент достижения допустимой величины v_0 может быть определен по рис. 5 и равен $v_0 = 1149$ с.

При известных $v_0, \bar{u}(t)$ результирующее температурное поле вместо (13) вычисляется по следующей формуле для конечного момента времени процесса после подстановки управления вида (21):

$$Q(x, \Delta_{21}^{(2)}, \Delta_{22}^{(2)}, \Delta_{12}^{(2)}) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\lambda R^2}{a E_n \eta_n^2} \left(\cos\left(\eta_n \frac{x}{R}\right) + \frac{B i_1}{\eta_n} \sin\left(\eta_n \frac{x}{R}\right) \right) \times$$

$$\times \left[W_{1n} u_{1\max} \left(e^{-\eta_n^2 \frac{a}{R^2} \Delta_{11}^{(2)}} - e^{-\eta_n^2 \frac{a}{R^2} (\Delta_{21}^{(2)} + \Delta_{22}^{(2)} - \Delta_{11}^{(2)})} \right) + W_{2n} \left(-1 + e^{\eta_n^2 v_0} + \right. \right. \quad (24)$$

$$\left. \left. + a_Q \left(e^{\eta_n^2 \Delta_{22}^{(2)}} - e^{\eta_n^2 v_0} \right) + \frac{b_Q \eta_n^2}{\eta_n^2 - \beta_Q} \left(e^{\eta_n^2 - \beta_Q (\Delta_{22}^{(2)} - v_0)} - e^{\eta_n^2 v_0} \right) \right) e^{-\eta_n^2 (\Delta_{21}^{(2)} + \Delta_{22}^{(2)})} \right].$$

В (24) отражен тот факт, что коррекция режима оптимального управления с помощью стабилизирующего управления $\bar{u}(t)$ накладывается согласно динамике изменения температурного поля (см. рис. 5) на максимальную мощность второго источника тепла $u_{2\max}$ на интервале интенсивного нагрева.

Теперь по описанной ранее схеме альтернативного метода остается решить систему (20, б), где $Q(x_j^0, \Delta_{ij}^{(2)})$, $i, j = \overline{1, 2}$ определяется выражением (24).

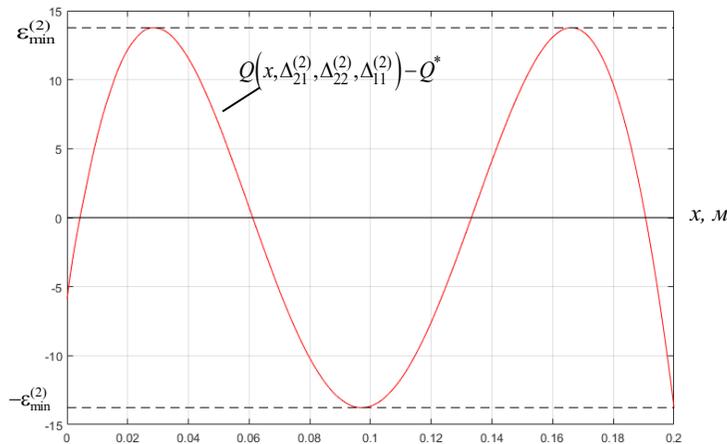


Рис. 6. Кривая температурного отклонения при $\varepsilon = \varepsilon_{\min}^{(2)}$, полученная при расчетах с учетом фазового ограничения при коррекции управления $u_{2\max}$

Результаты расчета оптимального по быстродействию процесса индукционного нагрева заготовки с ограничением на максимальную температуру при коррекции управления $u_{2\max}$: $\Delta_{21}^{(2)} = 1560 \text{ с}$, $\Delta_{22}^{(2)} = 336 \text{ с}$, $\Delta_{12}^{(2)} = 1275 \text{ с}$, $\varepsilon_{\min}^{(2)} = 13,76 \text{ }^\circ\text{C}$. Найденные координаты внутренних точек, в которых достигается минимаксное отклонение, можно видеть на полученной кривой температурного отклонения от заданной величины, представленной на рис. 6.

На рис. 7 представлен график изменения динамики температурного распределения и управляющего воздействия в процессе оптимального по быстродействию индукционного нагрева с ограничением на максимальную температуру точек нагреваемой заготовки. Наглядно виден участок, на котором происходит скачкообразное уменьшение $u_{2\max}$ с целью удержания температуры на уровне $Q_{\text{доп}}$ с того момента u_0 , когда она впервые достигает допустимого предела при $Q_{\text{max}} > Q_{\text{доп}}$

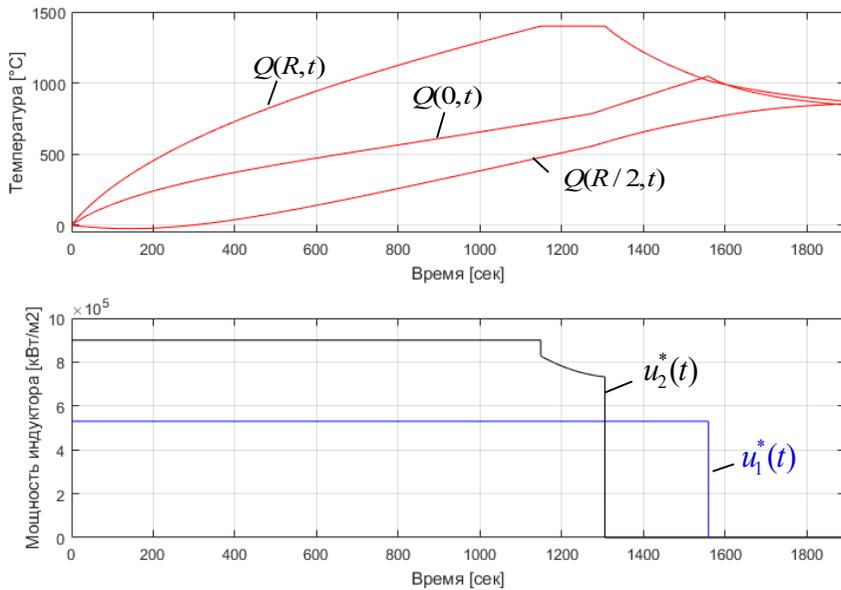


Рис. 7. Изменение управляемой величины и управляющих воздействий с учетом фазового ограничения при коррекции управления $u_{2\max}$

Рассмотрим вариант с ограничением на максимальную мощность первого источника тепла $u_{1\max}$ на интервале интенсивного нагрева неограниченной пластины. Логика построения алгоритма управления не будет иметь серьезных изменений по сравнению с предыдущим случаем. Главное отличие будет заключаться в коэффициенте L_n и в описании конечного температурного поля, то есть вместо (23) и (13) запишем:

$$L_n = \theta_n A_n \eta_n^2 - \frac{u_{2\max}}{u_{1\max}}; \quad (25)$$

$$\begin{aligned}
Q(x, \Delta_{21}^{(2)}, \Delta_{22}^{(2)}, \Delta_{11}^{(2)}) = & \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\lambda R^2}{a E_n \eta_n^2} \left(\cos\left(\eta_n \frac{x}{R}\right) + \frac{Bi_1}{\eta_n} \sin\left(\eta_n \frac{x}{R}\right) \right) \times \\
& \times \left[W_{1n} \left(-1 + e^{\eta_n^2 v_0} + a_Q \left(e^{\eta_n^2 \Delta_{11}^{(2)}} - e^{\eta_n^2 v_0} \right) + \frac{b_Q \eta_n^2}{\eta_n^2 - \beta_Q} \left(e^{\eta_n^2 - \beta_Q (\Delta_{11}^{(2)} - v_0)} - e^{\eta_n^2 v_0} \right) \right) \right. \\
& \left. \times e^{-\eta_n^2 (\Delta_{21}^{(2)} + \Delta_{22}^{(2)})} + W_{2n} u_{2\max} \left(e^{-\eta_n^2 \frac{a}{R^2} \Delta_{22}^{(2)}} - e^{-\eta_n^2 \frac{a}{R^2} (\Delta_{21}^{(2)} + \Delta_{22}^{(2)})} \right) \right]. \quad (26)
\end{aligned}$$

Далее по схеме альтернансного метода остается решить систему (20, б), где $Q(x_j^0, \Delta_{ij}^{(2)})$, $i, j = \overline{1, 2}$ определяется уже выражением (26).

Результаты расчета оптимального по быстродействию процесса индукционного нагрева заготовки с ограничением на максимальную температуру при коррекции управления $u_{1\max}$: $\Delta_{21}^{(2)} = 1681 \text{ с}$, $\Delta_{22}^{(2)} = 318 \text{ с}$, $\Delta_{11}^{(2)} = 1357 \text{ с}$, $\varepsilon_{\min}^{(2)} = 13,35 \text{ }^\circ\text{C}$. Найденные координаты внутренних точек, в которых достигается минимаксное отклонение, можно видеть на полученной кривой температурного отклонения от заданной величины (рис. 8), а графики изменения температуры металлической заготовки в процессе нагрева, а также изменение мощности обоих управляющих воздействий – на рис. 9.

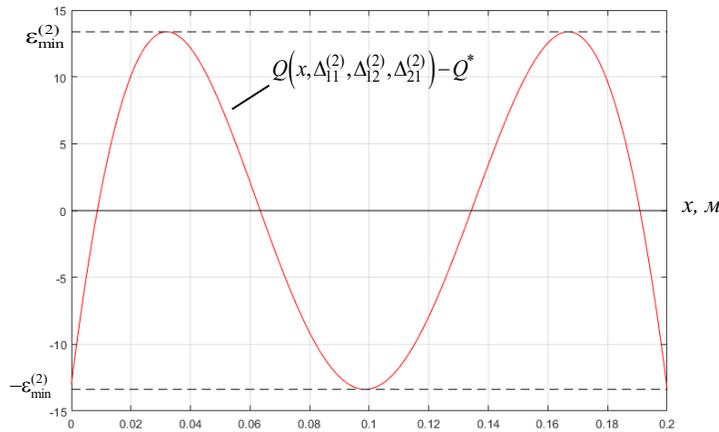


Рис. 8. Кривая температурного отклонения при $\varepsilon = \varepsilon_{\min}^{(2)}$, полученная при расчетах с учетом фазового ограничения при коррекции управления $u_{1\max}$

Из двух полученных вариантов решения ЗОУ первый является предпочтительным в силу меньшего времени процесса нагрева.

Существует третий вариант процедуры коррекции режима оптимального управления при поддержании максимальной температуры Q_{\max} на предельно допустимом уровне $Q_{\text{доп}}$ с постепенным уменьшением мощности обоих управляющих воздействий. Каждому из управлений в таком случае должен соответствовать некоторый весовой коэффициент исходя из понимания о соотношении этих составляющих. Это отдельная трудоемкая задача, рассмотрение которой не будет приведено в рамках данной работы.

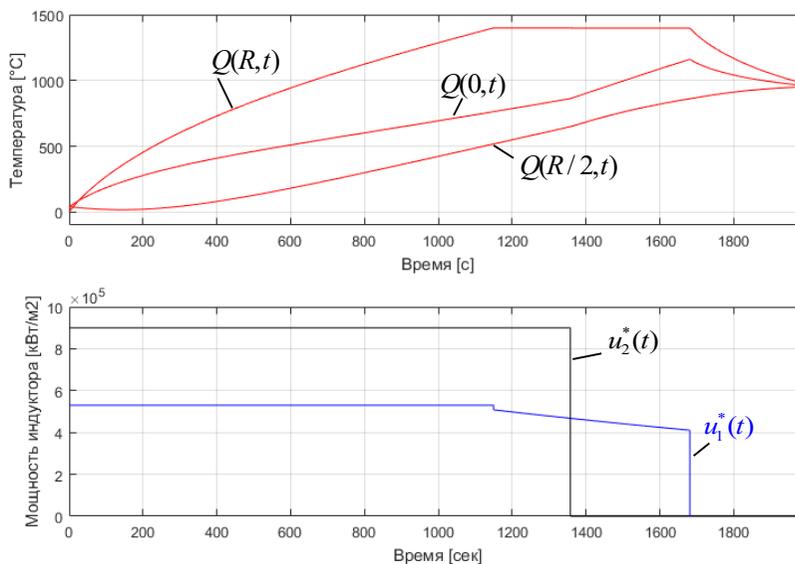


Рис. 9. Изменение управляемой величины и управляющих воздействий с учетом фазового ограничения при коррекции управления $u_{1\max}$

Таким образом, методика расчета оптимального процесса нагрева с учетом технологического ограничения на поведение температурного поля на протяжении всего процесса реализуется в два этапа: на первом этапе необходимо решить задачу быстрогодействия без учета фазового ограничения и по найденному алгоритму управления построить зависимость $Q(x, \Delta_{21}^{(2)}, \Delta_{22}^{(2)}, \Delta_{11}^{(2)})$, по которой проверяется выполнение условий (6). Если условие (6) не выполняется, то алгоритм оптимального по быстродействию управления корректируется по выражениям (21) – (24).

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., Плишивцева Ю.Э. Оптимальное управление температурными режимами индукционного нагрева. М.: Наука, 2012. 309 с.
4. Рапопорт Э.Я. Структурное моделирование объектов и систем управления с распределенными параметрами. М.: Высшая школа, 2003. 299 с.
5. Рапопорт Э.Я., Ильина Н.А. Оптимальное по быстродействию управление нестационарным процессом теплопроводности с комбинированными внешними воздействиями по граничным условиям // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. 2019. Вып. 2 (62). С. 36–51.
6. Кошляков Н.С., Глинер Э.Б., Смирнов М.М. Уравнения в частных производных математической физики. М.: Наука, 1970. 707 с.
7. Мартыненко Н.А., Пустыльников Л.М. Конечные интегральные преобразования и их применение к исследованию систем с распределенными параметрами. М.: Наука, 1986. 303 с.
8. 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.
9. Рапопорт Э.Я. Оптимальное управление системами с распределенными параметрами. М.: Высшая школа, 2009. 677 с.
10. Понтелеев А.В., Бортакровский А.С. Теория управления в примерах и задачах. М.: Высшая школа, 2017.

11. *Рапопорт Э.Я.* Альтернативный метод в прикладных задачах оптимизации. М.: Наука, 2000. 336 с.
12. *Рапопорт Э.Я., Плишивцева Ю.Э.* Алгоритмически точный метод параметрической оптимизации в краевых задачах оптимального управления системами с распределенными параметрами // Автоматизация. 2009. Т. 45. № 5. С. 103–112.
13. *Рапопорт Э.Я., Ильина Н.А.* Двухканальное оптимальное по быстродействию управление процессом нестационарной теплопроводности // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. 2018. Вып. 1 (57). С. 7–18.
14. *Дьяконов В.П.* MATLAB. Полный самоучитель. М.: ДМК Пресс, 2012. 768 с.
15. *Потемкин В.Г.* Введение в Matlab. М.: Softline Co, 2001 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://matlab.exponenta.ru/ml/book1/index.php> (дата обращения: 2 марта 2019).
16. MATLAB.Exponenta. Optimization Toolbox 2.2 Руководство пользователя / авт. А.Г. Трифонов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://matlab.exponenta.ru/optimiz/book_1/ (дата обращения: 2 марта 2019).
17. MATLAB.Exponenta: Введение в современные методы оптимизации систем управления [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://matlab.exponenta.ru/optimrobast/book1/index.php> (дата обращения: 10 февраля 2019).

Статья поступила в редакцию 1 марта 2020 г.

TWO-CHANNEL TIME-OPTIMAL CONTROL OF INDUCTION HEATING PROCESS WITH MAXIMUM TEMPERATURE CONSTRAINT

N.A. Il'ina

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

E-mail: ilina.natalyaa@yandex.ru

Abstract. *The formulation and method of solution of the problem of time-optimal control of induction heating process of an unlimited plate with two control actions on the value of internal heat sources with technological constraint in relation to a one-dimensional model of the temperature field are proposed. The problem is solved under the conditions of a given accuracy of uniform approximation of the final temperature distribution over the thickness of the plate to the required. The method of finite integral transformations is used to search for the input-output characteristics of an object with distributed parameters with two control actions. The preliminary parameterization of control actions based on analytical optimality conditions in the form of the Pontryagin maximum principle is used. At the next stage reduction is performed to the problem of semi-infinite optimization, the solution of which is found using the alternance method. The alternance properties of the final resulting temperature state at the end of the optimal process lead to a basic system of relations, which, if there is additional information about the shape of the temperature distribution curve, is reduced to a system of equations that can be solved. An example of solving the problem of time-optimal control of temperature field of an unlimited plate with two offices is carried out in two stages. At first stage the case of induction heating without maximum temperature constraints is considered, at the second stage is carried out on the basis of the results of the first stage to obtain the solution subject to the limitation on the maximum temperature of the heated billet.*

Natalya A. Il'ina, Graduate student.

Keywords: *optimal control, alternance method, semi-infinite optimization, induction heating.*

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 metodu 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., Pleshivtseva Yu.E.* Optimal'noe upravlenie temperaturnymi rezhimami nagreva [Optimal Control of Induction Heating Processes]. Moscow: Nauka, 2012. 309 p. (In Russian).
4. *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).
5. *Rapoport E.Ya., Il'ina N.A.* Optimal'noe po bystrodeystviyu upravlenie nestatsionarnum protsessom teploprovodnosti s kombinirovannymi vneshnimi vozdeystviyami po granichnym ysloviyam [Time-optimal control of nonstationary heating process with combined external influences under boundary conditions]. *Vestn. Samar. Gos. Tekhn. Un-ta. Ser. Tekhn. Nauki.* 2019. No. 2 (62). Pp. 36–51. (In Russian).
6. *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).
7. *Martynenko N.A., Pustyl'nikov L.M.* Konechnye integralnye preobrazovaniya i ih primeneniye k issledovaniju 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).
8. *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.
9. *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).
10. *Ponteleev A.V., Bortakovskiy A.S.* Teoriya upravleniya v primerakh i zadachakh [The theory of control in examples and problems]. Moscow: Vyssh. Shkola, 2017.
11. *Rapoport E.Ya.* Al'ternatsionnyy metod v prikladnykh zadachakh optimizatsii [*Alternance Method for Solving Applied Optimization Problems*]. Moscow: Nauka, 2000. 336 p. (In Russian).
12. *Rapoport E.Ya., Pleshivtseva Yu.E.* Algoritmicheski 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. Pp. 103–112. (In Russian).
13. *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.* 2018. No. 1 (57). Pp. 7–18. (In Russian).
14. *Dyakonov V.P.* MATLAB. Polnuy samouchitel' [MATLAB.Full tutorial]. Moscow: DMK Press, 2012. 768 p. (In Russian).
15. *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).
16. *Optimization Toolbox 2.2 Rukovodstvo pol'zovatelya* [Optimization Toolbox 2.2 User manual]. http://matlab.exponenta.ru/optimiz/book_1/ (accessed March 02, 2019).
17. *MATLAB.Exponenta* Vvedenie v sovremennyye metodu optimizatsii system upravleniya [Introduction to modern methods of control systems optimization]. <http://matlab.exponenta.ru/optimrobast/book1/index.php> (accessed February 10, 2019).

УДК 681.5.015

ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КОТЛА-УТИЛИЗАТОРА НА БАЗЕ РЕКУРРЕНТНОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ*

Д.С. Лысенко, И.А. Данилушкин

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

E-mail: Dmitry-Lusenko@yandex.ru, idanilushkin@mail.ru

Аннотация. Работа посвящена разработке динамической модели водогрейного котла-утилизатора на базе рекуррентной нейронной сети. Разработанная модель может быть использована при создании компьютерных тренажеров для операторов газотурбинных установок, технологов и эксплуатирующего персонала. Объект моделирования представлен как сложная термодинамическая система. Динамические процессы, протекающие внутри котла, нелинейны и взаимосвязаны. Изменения технологических параметров отработанных газов происходят в диапазонах, не позволяющих получить приемлемое качество линеаризованной модели. В связи со сложностью создания математического описания, учитывающего работу установки в разных режимах, для реализации задачи моделирования были выбраны рекуррентные нейронные сети. На базе рекуррентной нейронной сети была синтезирована динамическая модель, которая описывает изменение технологических параметров котла-утилизатора в режимах работы «Разгон», «Номинальная нагрузка», «Останов». В качестве выхода модели выступает температура сетевой воды за котлом. Созданная модель учитывает изменение расхода сетевой воды, изменение температуры воды на входе, рост и уменьшение температуры и давления отработанного газа на входе котла-утилизатора. При формировании обучающих и тестовых выборок для нейронной сети были использованы архивные тренды, полученные в процессе эксплуатации котла-утилизатора. В статье приводятся экспериментальные данные, описание этапов синтеза нейросетевой модели, структурные и графические схемы, результаты моделирования с пояснениями.

Ключевые слова: синтез нейросетевой модели, динамическая модель, котел-утилизатор, идентификация модели, рекуррентная нейронная сеть, компьютерный тренажер, энергетика.

Введение

Котлы-утилизаторы – это сложные термодинамические системы. Процессы, протекающие в них, имеют нелинейную динамику. Котлы-утилизаторы используют энергию отработанного газа от различных технологических установок, например газотурбинных (ГТУ). Характерных для топливосжигающих котлоагрегатов горелок, систем подготовки и подачи топлива котлы-утилизаторы не имеют [1, 2]. Самыми сложными этапами в процессе эксплуатации котла-утилизатора являются режим разгона газотурбинной установки и начало процесса утилизации энергии газа, режим останова газотурбинной установки с завершением процесса утилизации [3].

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

Лысенко Дмитрий Сергеевич, аспирант.

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

Когда объектом моделирования выступает сложная система и нет необходимости структурного соответствия, хороший результат могут обеспечить адаптивные методы моделирования. К адаптивным методам моделирования относятся аппарат нечеткой логики и нейронные сети [4]. Широкий спектр решаемых задач, включая моделирование сложных систем, синтез моделей без наличия «строгого» математического описания, возможность создания динамических моделей и заложенная в архитектуру адаптивность определяют выбор рекуррентных нейронных сетей [5]. Для синтеза нейросетевой модели необходима методика.

Синтез нейросетевой модели – это комплексный процесс, состоящий из ряда последовательных этапов. От решений, применяемых на каждом этапе, зависит конечный результат – адекватное поведение модели, ее схожесть с реальным объектом [6]. Непосредственно этапу синтеза модели предшествует этап сбора, обработки и анализа данных. После того как модель будет синтезирована, она должна пройти процесс верификации.

В результате анализа методик создания и обучения нейронных сетей обнаружен ряд общих рекомендаций [7–11], на основании которых была разработана нейросетевая модель котла-утилизатора с учетом особенностей объекта моделирования и технологического процесса утилизации газа.

Для создания динамической модели котла-утилизатора на базе рекуррентной нейронной сети необходимо решить следующие задачи:

- 1) сформировать обучающую выборку для нейронной сети;
- 2) построить и обучить нейросетевую модель котла-утилизатора;

провести верификацию разработанной модели для подтверждения соответствия реальной системе.

Модель должна удовлетворять трем требованиям:

- адекватность – разрабатываемая модель должна соответствовать реальной системе, учитывать наиболее важные качества объекта, связи и характеристики;
- точность – модель должна давать результат, который укладывается в заранее установленные погрешности моделирования;
- универсальность – модель должна быть применима для анализа системы, работающей в разных режимах.

Область применения модели – компьютерные тренажеры для операторов ГТУ, технологов и эксплуатирующего энергетическую установку персонала [12].

В статье представлены этапы синтеза нейросетевой модели, процесс обучения нейронной сети и результаты верификации модели. При формировании обучающих и тестовых выборок для нейронной сети были использованы архивные тренды, полученные в процессе эксплуатации реального котла-утилизатора. Инструментом реализации были выбраны пакет прикладных программ MATLAB с библиотекой Neural Network Toolbox и пакет моделирования динамических систем Simulink.

Описание технологического процесса

Функциональная схема котла-утилизатора водогрейного типа представлена на рис. 1. Теплообменник котла представляет собой набор пакетов змеевиков, по трубам которых циркулирует вода. Котлы предназначены для подогрева сетевой воды, которая используется для обеспечения технологических процессов или отопления и горячего водоснабжения промышленных или жилых комплексов [13].

Внутри котла утилизируется энергия газа, поступающего с газотурбинной установки.

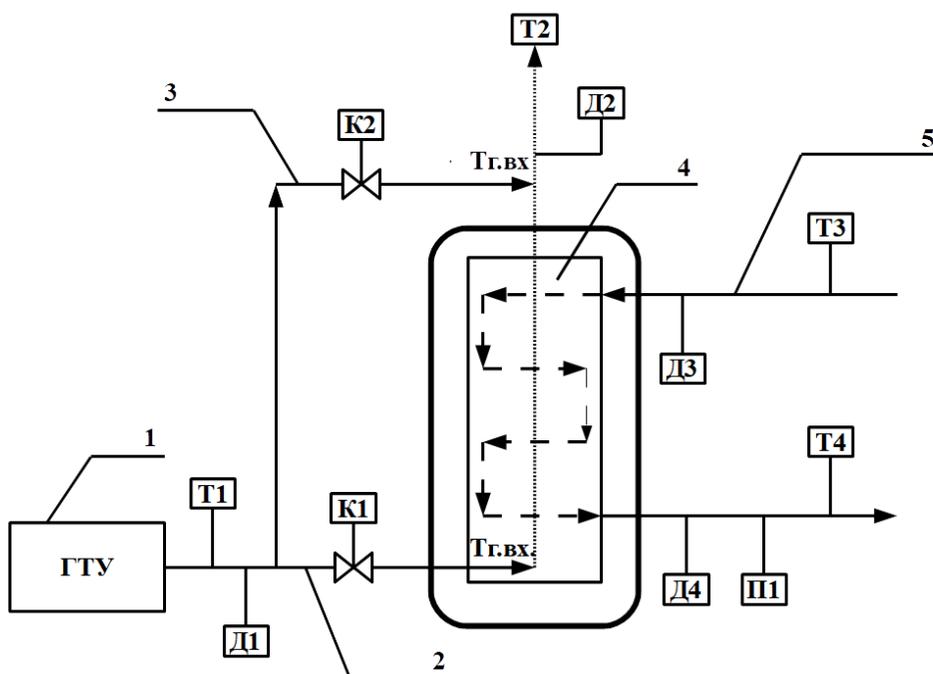


Рис. 1. Функциональная схема котла-утилизатора:

1 – газотурбинная установка; 2 – основной газопровод подачи отработанного газа; 3 – обводной газопровод подачи отработанного газа; 4 – теплообменник котла-утилизатора; 5 – трубопровод подачи сетевой воды; Т1 – датчик температуры отработанного газа на входе в котел; Д1 – датчик давления отработанного газа на входе в котел; К1 – клапан основного газопровода; К2 – клапан обводного газопровода; Т2 – датчик температуры газа на выходе из котла; Д2 – датчик давления газа на выходе из котла; Т3 – датчик температуры сетевой воды на входе в котел; Д3 – датчик давления сетевой воды на входе в котел; Т4 – датчик температуры сетевой воды на выходе из котла; Д4 – датчик давления сетевой воды на выходе из котла; П1 – датчик расхода сетевой воды

Режим «Холодное состояние». В режиме «Холодное состояние» утилизации энергии газа не происходит. Клапан основного газопровода подачи газа закрыт, клапан обводного газопровода открыт. Температура сетевой воды на выходе котла равна температуре сетевой воды на входе.

Режим «Разгон». В режим «Разгон» котел переходит после запуска газотурбинной установки. Запуск газотурбинной установки осуществляется на обводной газопровод. После запуска ГТУ клапан основного газопровода переводится в открытое состояние, клапан обводного газопровода закрывается, в котел-утилизатор поступает отработанный газ. Температура и давление газа возрастают с 0 до 500 °С и с -0,2 до 0,75 кПа. На вход котла подается вода температурой 42–52 °С; отработанный газ, проходя через котел, нагревает трубы теплообменника. Расход воды через котел-утилизатор составляет от 200 до 450 м³/час. В режиме «Разгон» температура сетевой воды за котлом изменяется в пределах 43–90 °С.

Режим «Номинальная нагрузка». В этот режим котел-утилизатор переходит после выхода ГТУ на номинальную мощность. Клапан основного газопровода полностью открыт, клапан обводного газопровода закрыт, в установку подается газ с постоянной температурой и давлением. Температура отработанного газа равна 500–520 °С, давление 0,5–0,75 кПа. Расход сетевой воды изменяется в диапазоне 450–700 м³/час. Диапазон изменения температуры воды на выходе из котла равен 80–94 °С. Номинальная температура сетевой воды на выходе из котла 95 °С [14].

Режим «Останов». В режим «Останов» котел-утилизатор переходит после останова ГТУ. Температура отработанного газа понижается с 500 до 0 °С, давление с 0,7 до -0,2 кПа, клапан основного газопровода переводится в закрытое состояние, клапан обводного газопровода переводится в открытое состояние или частично закрытое, котел переходит в режим «Холодное состояние». Температура сетевой воды за котлом понижается с 90 до 45–50 °С.

Создание модели котла-утилизатора на базе рекуррентной нейронной сети

Конечной точкой работы является модель, которая отображает реальные процессы, протекающие внутри котла-утилизатора, и которую можно использовать при создании компьютерных тренажеров. Синтез нейросетевой модели котла-утилизатора включает три последовательных этапа:

- этап, на котором подготавливаются данные для обучения нейронной сети;
- этап, на котором разработчик синтезирует модель;
- этап, на котором тестируется модель.

Этап «Подготовка данных». На этапе подготовки данных были определены входы и выходы модели. При выборе входных параметров следует выбирать параметры, которые оказывают существенное влияние на выходную переменную. Выходным параметром нейросетевой модели выступает температура сетевой воды за котлом (Two). В качестве входных параметров используются: расход сетевой воды (Fw), температура сетевой воды на входе в котел (Twi), давление отработанного газа на входе в котел (Pg), температура газа на входе в котел (Tg).

После определения входных и выходных параметров нейросетевой модели дальнейшей задачей является формирование обучающих и тестовых выборок. При формировании обучающей выборки необходимо исходить из поставленной цели и задачи моделирования. Данные обучающей выборки должны включать информацию обо всех режимах работы, для которых создается модель.

Для обучения и верификации нейронной сети использовались архивные тренды, полученные в процессе эксплуатации котла-утилизатора. Данные регистрировались с интервалом в одну минуту. В распоряжении было шесть выборок. Выборки № 1 и № 2 были получены в процессе разгона котла из холодного состояния (841 и 722 минут соответственно), выборки № 3 и № 4 связаны с режимом «Номинальная нагрузка» (1440 минут каждая), выборки № 5 и № 6 содержат данные последовательного перехода котла через режимы «Номинальная нагрузка», «Останов», «Холодное состояние», «Разгон» (1440 минут каждая). Изначально для обучения нейронной сети использовалось практически 100 % данных выборок № 1, № 3, № 6 – данные не были обработаны. Использование обучающей выборки, сформированной из необработанных данных, привело к низкой обобщающей способности нейронной сети, при этом

ошибки моделирования превысили заранее установленные пределы. В процессе обработки данных из обучающей выборки были исключены аномальные выбросы, при которых значение одного из параметров резко изменяется на одну-две минуты; также в обучающую выборку не были включены интервалы, соответствующие установившимся режимам работы котла-утилизатора. После исключения аномальных выбросов и данных установившихся режимов полный объем обучающей выборки составил 20 % данных выборки № 1, 20 % данных выборки № 3 и 15 % данных выборки № 6. Диапазоны изменения параметров модели: температура сетевой воды за котлом 43–94 °С; расход сетевой воды 230–700 м³/час; температура сетевой воды на входе в котел 43–52 °С; давление газа на входе -0,2–данные, соответствующие режиму «Останов», данные режима «Номинальная нагрузка» имеют нехарактерное по сравнению с остальными выборками поведение параметра «Температура сетевой воды за котлом». Предположительно отличие данных из выборки № 6 связано с положением регулирующих клапанов на основном и обводном газопроводе. Для моделирования данной ситуации необходимо вводить дополнительные признаки и вектор входов. Исходные данные обучающей выборки приведены на рис. 2–6.

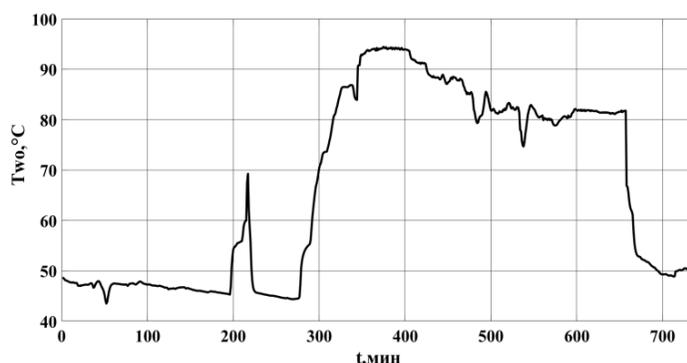


Рис. 2. График изменения параметра «Температура сетевой воды за котлом»

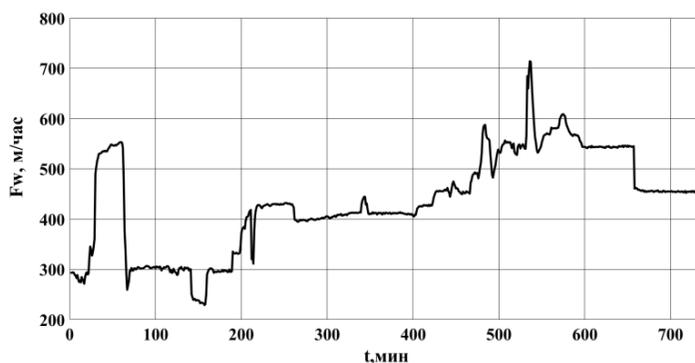


Рис. 3. График изменения параметра «Расход сетевой воды»

Качество обучающих данных, их полнота и достоверность в наибольшей степени определяют конечный результат моделирования, поэтому этап подготовки данных является главным этапом при синтезе нейронной модели.

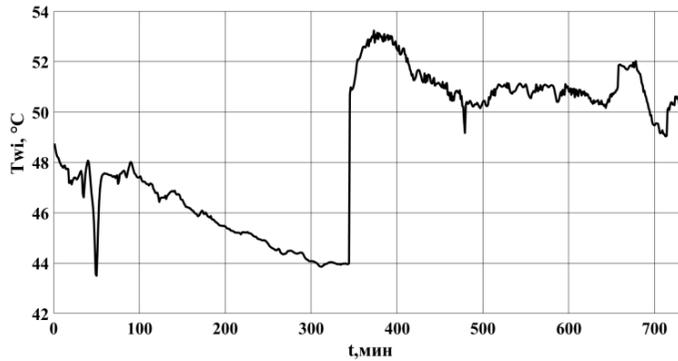


Рис. 4. График изменения параметра «Температура сетевой воды на входе в котел»

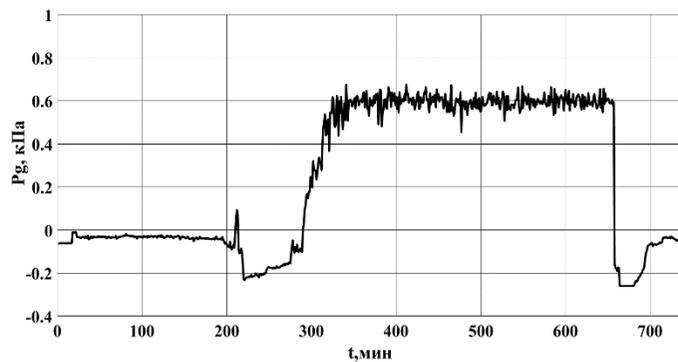


Рис. 5. График изменения параметра «Давление газа на входе в котел»

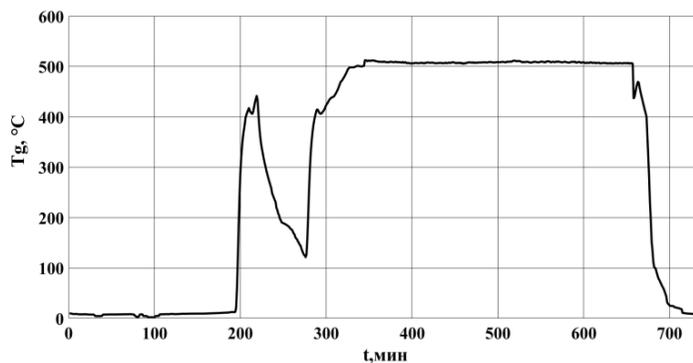


Рис. 6. График изменения параметра «Температура газа на входе в котел»

Этап «Синтез модели». Синтез нейросетевой модели заключается в выборе типа нейронной сети, алгоритма обучения, количества нейронов в слое и соотношения тренировочных, валидационных, тестовых данных.

Согласно требованиям модель котла-утилизатора должна учитывать динамику объекта. Нелинейная авторегрессионная нейронная сеть с внешним входом позволяет принимать решения, основываясь на входных данных и состоянии объекта на предыдущих тактах моделирования [15, 16]. Вид синтезируемой

нейросетевой модели аналогичен представленному на рис. 7. Данная модель представляет двухслойную сеть с задержками входного и выходного сигнала. Задержки позволяют нейронной сети принимать решения на основании не только текущих значений входа и выхода, но и значений на предыдущих тактах [17]. Такая структура нейронной сети позволяет реализовать динамическое отображение вида

$$y[t] = f(y[t-1], y[t-2], \dots, y[t-N], x[t-1], x[t-2], \dots, x[t-M]), \quad (1)$$

где выходной сигнал $y[t]$ для t -того такта квантования по времени рассчитывается на основании входного сигнала $x = [Fw Twi Pg Tg]^T$ и выходного сигнала y на предыдущих тактах. Число тактов, учитываемых при вычислении, определяется значениями N и M .

Обучение нейронной сети – это параметрическая идентификация, в ходе которой подбираются значения синаптических весов нейронной сети. Лучший результат обучения на данных обучающей выборки (см. рис. 2–6) был получен при использовании алгоритма обучения «байесовская регрессия». Количество нейронов в скрытом слое равно 10. Соотношение тренировочных, валидационных, тестовых данных было равно 60; 20; 20 %. В качестве функции активации для нейронов скрытого слоя была выбрана функция гиперболического тангенса, для нейронов внешнего слоя выбрана линейная функция активации. Показатель эффективности нейронной сети рассчитывался по методу средней квадратичной ошибки (MSE):

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

где y_i – фактический ожидаемый результат;
 \hat{y}_i – прогноз модели;
 n – размер обучающей выборки.

Этап «Верификация модели». На этапе верификации формируется методология проверки и оценки созданной модели. Самым простым способом проверки схожести созданной модели и реального объекта является тестирование модели на реальных данных. Для верификации нейросетевой модели использовались выборки, из которых была взята часть данных для обучения нейронной сети; выборки, данные которых не были включены в процесс обучения. Было поставлено требование о валидности – модель должна имитировать поведение котла-утилизатора в трех режимах: «Разгон», «Номинальная нагрузка», «Останов». Требования к точности моделирования были сформированы на основании экспертной оценки поведения модели объекта [18, 19]. Были приняты следующие численные величины отклонения выходных параметров модели в сравнении с данными реального объекта: для режима «Разгон» и «Останов» погрешность моделирования должно быть не более 10 %, для режима «Номинальная нагрузка» отклонение моделируемых величин не должно превышать

Вычислительный эксперимент

В результате выполнения действий, описанных в предыдущем пункте, была синтезирована модель. На рис. 7 представлена структурная схема нейронной сети, реализованная в библиотеке Neural Network Toolbox пакета MATLAB.

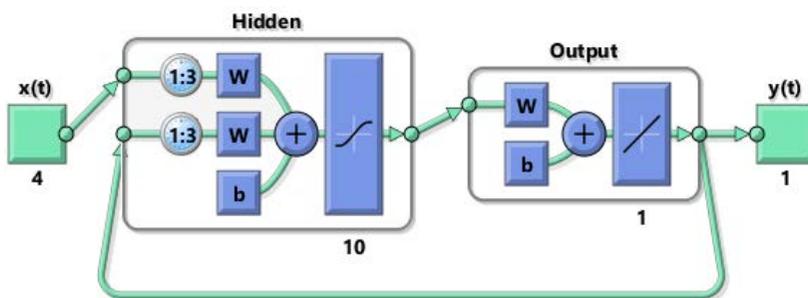


Рис. 7. Структурная схема нейронной сети

Выходное значение $y(t)$ формируется на основании трех предыдущих тактов значений вектора $x(t)$ и значений выходной координаты $y(t)$ на трех предыдущих тактах.

При проведении вычислительного эксперимента на вход нейросетевой модели подавались данные выборки № 1–5. Вычислительный эксперимент включает:

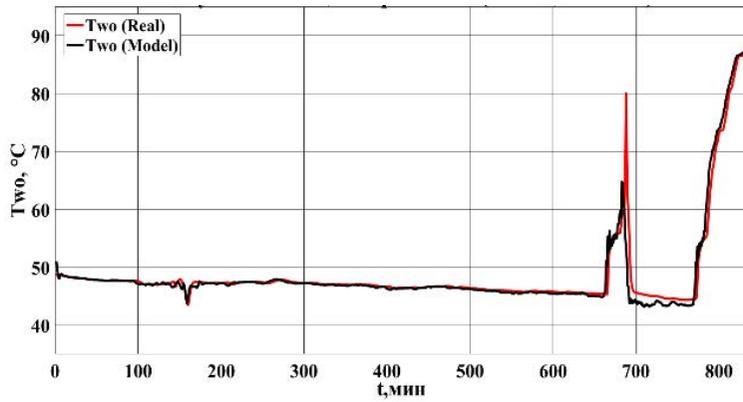
- 1) тестирование на данных, часть которых была включена в обучающую выборку (рис. 8, рис. 10);
- 2) тестирование на независимых данных – данные не были включены в обучающую выборку (рис. 9, рис. 11, рис. 12).

На рис. 8 приведены результаты моделирования при подаче на вход нейронной сети внешних воздействий, взятых из выборки № 1. Данные выборки № 1 относятся к режиму «Разгон». Для выборки характерны следующие диапазоны изменения входных параметров: расход сетевой воды 230–450 м³/час, температура сетевой воды на входе 43–49 °С, давление газа -0,2–0,6 кПа, температура газа 0–500 °С. На рисунке приведен результат моделирования на всем диапазоне изменения и на участке разгона.

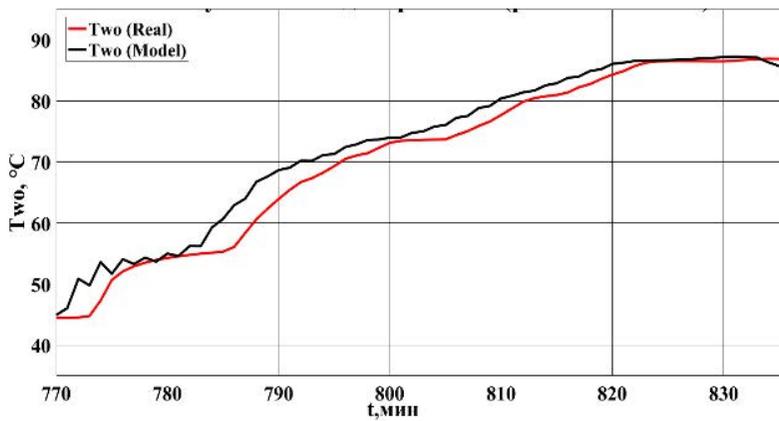
На рис. 9 приведены результаты моделирования при подаче на вход нейронной сети внешних воздействий, взятых из выборки № 2. Данные выборки № 2 относятся к режиму «Разгон». Для выборки характерны следующие диапазоны изменения входных параметров: расход сетевой воды 420–450 м³/час, температура сетевой воды на входе 50–52 °С, давление газа -0,2–0,7 кПа, температура газа 0–510 °С. На рисунке приведен результат моделирования как на всем диапазоне изменения, так и на участке разгона.

На рис. 10 приведены результаты моделирования при подаче на вход нейронной сети внешних воздействий, взятых из выборки № 3. Данные выборки № 3 относятся к режиму «Номинальная нагрузка». Для выборки характерны следующие диапазоны изменения входных параметров: расход сетевой воды 400–720 м³/час, температура сетевой воды на входе 50–54 °С, давление газа 0,5–0, 6 кПа, температура газа 500–510 °С.

На рис. 11 приведены результаты моделирования при подаче на вход нейронной сети внешних воздействий, взятых из выборки № 4. Данные выборки № 4 относятся к режиму «Номинальная нагрузка». Для выборки характерны следующие диапазоны изменения входных параметров: расход сетевой воды 450–550 м³/час, температура сетевой воды на входе 50–53 °С, давление газа 0,5–0,75 кПа, температура газа 500–515 °С.

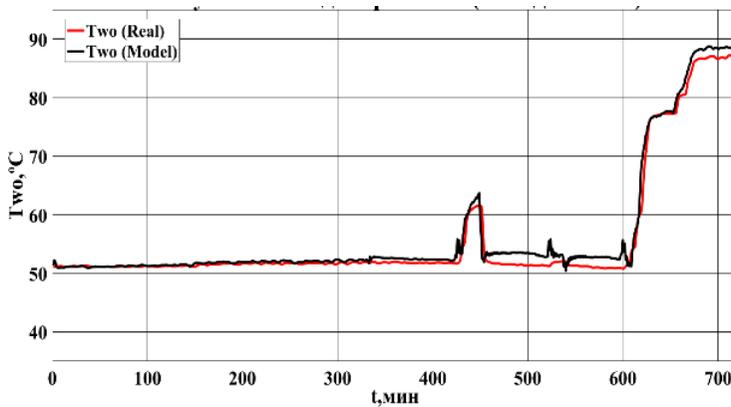


a



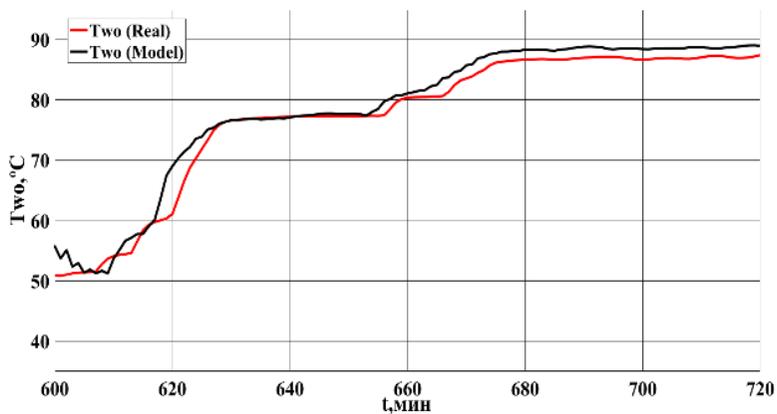
б

Рис. 8. Результат моделирования на данных выборки № 1:
a – весь диапазон; *б* – режим «Разгон»



a

Рис. 9. Результат моделирования на данных выборки № 2:
a – весь диапазон; (начало)



б

Рис. 9. Результат моделирования на данных выборки № 2:
б – режим «Разгон» (продолжение)

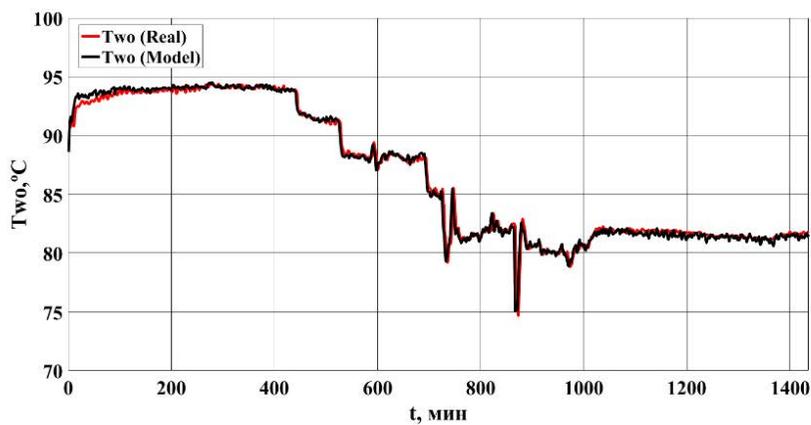


Рис. 10. Результат моделирования на данных выборки № 3

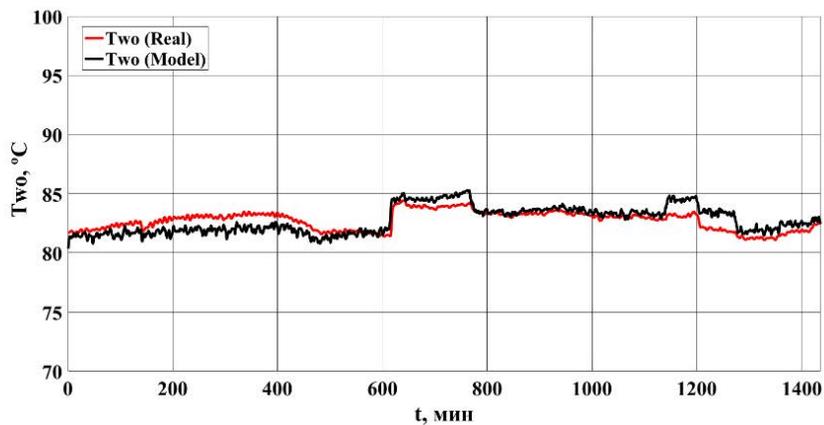


Рис. 11. Результат моделирования на данных выборки № 4

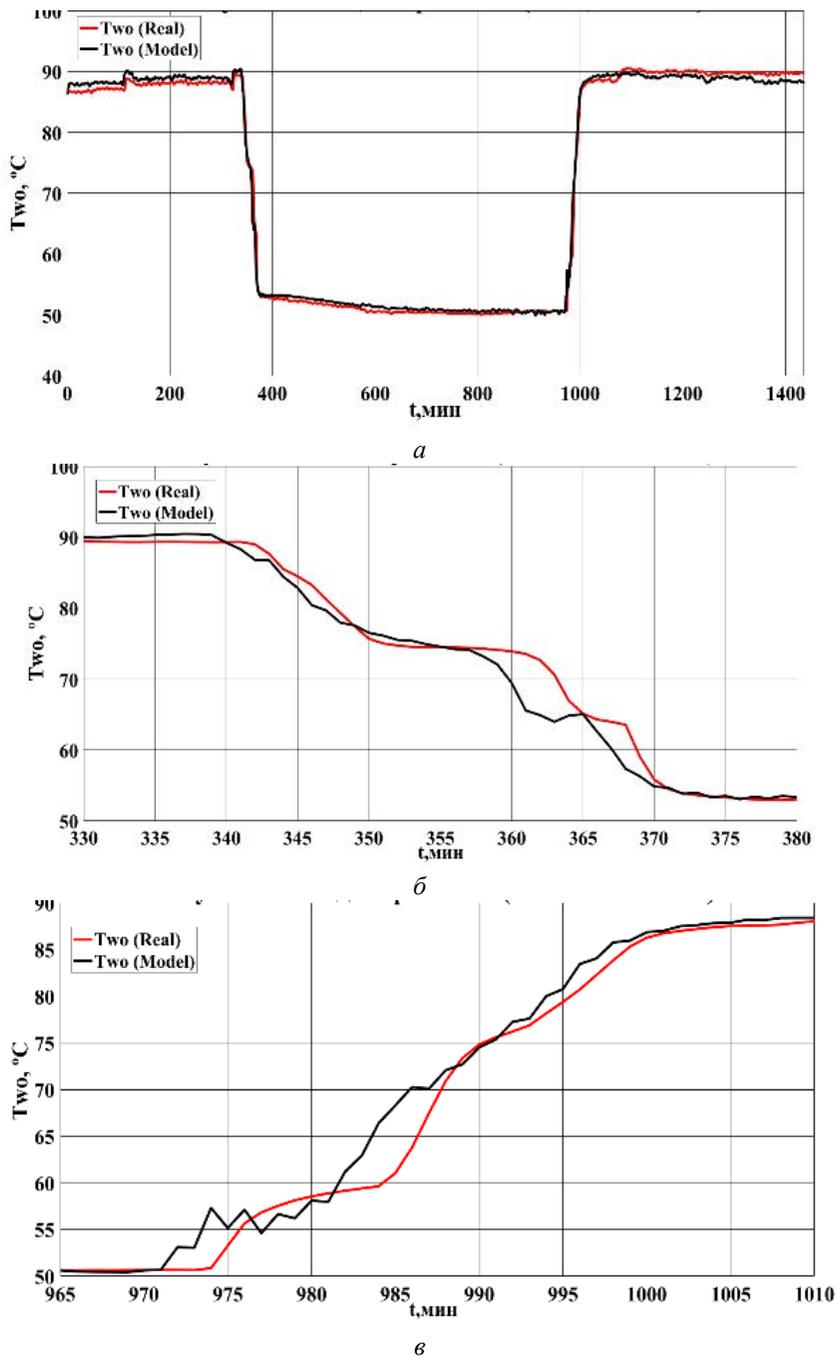


Рис. 12. Результат моделирования на данных выборки № 5:
а – весь диапазон; *б* – режим «Останов»; *в* – режим «Разгон»

На рис. 12 приведены результаты моделирования при подаче на вход нейронной сети внешних воздействий, взятых из выборок № 5. Данная выборка включает данные трех режимов работы. Из режима «Номинальная нагрузка» котел переводится в режим «Останов», вторая часть выборки содержит данные перехода из режима «Разгон» в режим «Номинальная нагрузка». Для выборки характерны следующие диапазоны изменения входных параметров: расход сетевой воды 420–

450 м³/час, температура сетевой воды на входе 50–53 °С, давление газа -0,2–0,7 кПа, температура газа 0–510 °С. На рисунке приведен результат моделирования как на всем диапазоне изменения, так и на участках, соответствующим режимам «Останов» и «Разгон».

Точность модели оценивалась по величине средней ошибки. В таблице приведены данные средней ошибки моделирования на выборках № 1–5.

Данные средней ошибки моделирования на выборках № 1–5

Средняя ошибка	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5
Весь диапазон, °С					
Режим «Разгон», °С			–	–	
Режим «Останов», °С	–	–	–	–	

Заключение

Работа посвящена синтезу модели котла-утилизатора на базе рекуррентной нейронной сети. В ходе работы была синтезирована модель, учитывающая изменение четырех технологических параметров и значение выходной координаты на предыдущих тактах. Разработанная модель актуальна для трех режимов работы котла-утилизатора: «Разгон», «Номинальная нагрузка» и «Останов». Модель корректно описывает поведение технологического параметра «Температура сетевой воды за котлом» в диапазоне 43–95 °С, при изменении расхода воды через котел в диапазоне 230–710 м³/час, температуры сетевой воды на входе в диапазоне 43–54 °С, температуры и давления газа в диапазоне 0–515 °С, -0,2–0,75 кПа. Синтез нейросетевой модели производился в три последовательных этапа: этап сбора и обработки данных, этап синтеза нейронных моделей и этап верификации. Каждый этап включал в себя несколько взаимосвязанных фаз. Наиболее важным этапом, по мнению авторов, является этап сбора и обработки данных. На данном этапе формируется обучающая выборка, которая определяет качество дальнейших результатов. В ходе вычислительного эксперимента была подтверждена точность разработанных моделей. Погрешности моделирования не превышают заранее определенных значений как для динамических режимов работы котла «Разгон» и «Останов», так и для режима «Номинальная нагрузка».

Таким образом, предлагаемый в данной работе подход может быть использован для синтеза моделей сложных систем на базе рекуррентной нейронной сети. Областью применения разработанной модели могут быть компьютерные тренажеры для операторов ГТУ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Воинов А.П., Куперман Л.Н.* Котлы-утилизаторы и энерготехнологические агрегаты. М.: Энергоатомиздат, 1989. 272 с.
2. *Липов Ю.М., Третьяков Ю.М.* Котельные установки и парогенераторы. М.; Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2005. 592 с.
3. *Зыков А.К.* Паровые и водогрейные котлы. М.: Энергоатомиздат, 1987. 128 с.
4. *Лысенко Д.С., Данилушкин И.А.* Разработка модели котла-утилизатора на базе аппарата нечеткой логики // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды XXI международной конференции. Т. 2. Самара: Офорт, 2019. С. 268–271.

5. *Круглов В.В., Дли М.И., Голунов Р.Ю.* Нечеткая логика и искусственные нейронные сети. М.: Физматлит, 2001. 221 с.
6. *Замятин Н.В., Медянцева Д.В.* Методика нейросетевого моделирования сложных систем // Известия Томского политехнического университета. 2006. Т. 309. № 8. С. 100–106.
7. *Аксёнов С.В., Новосельцев В.Б.* Организация и использование нейронных сетей (методы и технологии). Томск, 2006.
8. *Слепнёв Е.С.* Применение искусственных нейронных сетей для анализа предварительных ситуаций турбоагрегатов электростанций // Интернет-журнал Науковедение. 2014. № 3(22). С. 124.
9. *Palme T.* Compressor map prediction by neural networks / T. Palme, P. Waniczek, H. Honen, M. Assadi, P. Jeschke. Journal of energy and power engineering. 2012. № 6. Pp. 1651–1662.
10. *Livshits M.Yu., Elnur Mohammad A.H.* Nonlinear dynamic model of steam boiler furnace. MATEC Web Conf. 110, 01051. 2017.
11. *Eremenko Y.I., Poleshchenko D.A., Tsygankov Y.A.* Development of neural network model of the multiparametric technological object. J. Fundam. Appl. Sci., 2017. 9 (7S). Pp. 706–721.
12. *Соркин Л.Р.* Имитационное моделирование для обучения операторов и оптимизации производства // Промышленные АСУ и контроллеры. 2008. № 8.
13. *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. 2017. Vol. 59. Pp. 79–162.
14. *Днепров Ю.В., Смирнов Д.Н., Файнштейн М.С.* Монтаж котельных установок малой и средней мощности. М.: Высш. школа, 1980. 334 с.
15. *Головкин В.А.* Нейронные сети: обучение, организация, применение. Кн. 4. М.: ИПРЖР, 2001. 256 с.
16. *Круглов В.В., Борисов В.В.* Искусственные нейронные сети. Теория и практика. 2-е изд. М.: Горячая линия – Телеком, 2002. 382 с.
17. *Хайкин С.* Нейронные сети: полный курс. 2-е изд. М.: И.Д. Вильямс, 2006. 1104 с.
18. *Данилушкин И.А., Колпацников С.А.* Моделирование водяного тракта парового котла // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. 2019. Вып. 2 (62). С. 20–35.
19. *Афанасьев В.Н.* Управление неопределенными динамическими объектами. М.: Физматлит, 2008. 208 с.

Статья поступила в редакцию 1 марта 2020 года

DYNAMIC MODEL OF WASTE HEAT BOILER BASED ON RECURRENT NEURAL NETWORK

D.S. Lusenko, I.A. Danilushkin

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

Abstract. *The work is devoted to the development of a dynamic model of a waste heat boiler based on a recurrent neural network. The developed model can be used to create computer simulators for gas turbine plant operators, technologists and operating personnel. The object of modeling is presented as a complex thermodynamic system. The dynamic processes taking place inside the boiler are non-linear and interconnected. Changes in the technological parameters of the exhaust gases occur in ranges that do not allow to obtain an acceptable quality of the linearized model. Due of the difficulty of creating a mathematical description that takes into account the operation of the installation in different modes, recurrent neural networks were chosen to implement the simulation task. Based on the recurrent neural network, a dynamic model was synthesized that describes the change in the technological parameters of the waste heat boiler in the “Power boost”, “Rated Load”, “Power reduction” operating modes. The model output is the temperature of the network water behind the*

*Dmitry Lusenko, Postgraduate Student.
Ivan Danilushkin (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.*

boiler. The created model takes into account the change in the water flow through the boiler, the change in the inlet water temperature, the increase and decrease in the temperature and pressure of the exhaust gas at the inlet of the waste heat boiler. In the formation of training and test samples for the neural network, archival trends obtained during the operation of the waste heat boiler were used. The article provides experimental data, a description of the stages of the synthesis of a neural network model, structural and graphic schemes, simulation results with explanations.

Keywords: synthesis of a neural model, dynamic model, waste heat boiler, model identification, recurrent neural network, computer simulator, energy.

REFERENCES

1. Voinov A.P., Kuperman L.N. Waste heat boiler and energy-technological units. Moscow: Energoatomizdat, 1989. 272 p. (In Russian).
2. Lipov Y.M., Tretyakov Y.M. Boiler plants and steam generators. Moscow: Regular and chaotic dynamics, 2005. 592 p. (In Russian).
3. Zykov A.K. Steam and hot water boilers. Moscow: Energoatomizdat, 1987. 128 p. (In Russian).
4. Lusenko D.S., Danilushkin I.A. Development of a waste-heat boiler model based on a fuzzy logic device // Control and modeling problems in complex systems: Proceedings of the XXI international conference. Vol. 2. Samara: Ofort LLC, 2019. Pp. 268–271.
5. Kruglov V.V., Dli M.I., Gohunov R.Y. Fuzzy logic and artificial neural networks. Moscow: Fizmatlit, 2001. 221 p. (In Russian).
6. Zamyatin N.V., Medyantsev D.V. Methods of neural network modeling of complex systems // Izvestia Tomsk. Pol-teh Un-ta, 2006. No. 8. Pp. 100–106. (In Russian).
7. Aksenov S.V., Novoseltsev V.B. Organization and use of neural networks (methods and technologies). Tomsk, 2006. (In Russian).
8. Slepnev E.S. Application of artificial neural networks for analyzing emergency situations of turbine power plants. Online Journal of Science. 2014. No. 3 (22). P. 124. (In Russian).
9. Palme T. Compressor map prediction by neural networks / T. Palme, P. Waniczek, H. Honen, M. Assadi, P. Jeschke // Journal of energy and power engineering. 2012. No. 6. Pp. 1651–1662.
10. Livshits M.Yu., Elnur Mohammad A.H. Nonlinear dynamic model of steam boiler furnace // MATEC Web Conf. 110, 01051. 2017.
11. Eremenko Y.I., Poleshchenko D.A., Tsygankov Y.A. Development of neural network model of the multiparametric technological object // J. Fundam. Appl. Sci., 2017. 9 (7S). Pp. 706–721.
12. Sorkin L.R. Simulation modeling for operator training and production optimization // Industrial control systems and controllers. 2008. No. 8. (In Russian).
13. Alobaid F., Mertens N., Starkloff R., Lanz T., Heinze C., Eppe B. Progress in dynamic simulation of hermal power plants // Progress in Energy and Combustion Science. 2017. Vol. 59. Pp. 79–162.
14. Dneprov Y.V., Smirnov D.N., Feinstein M.S. Installation of boiler plants of small and medium power. Moscow: Higher school, 1980. 334 p. (In Russian).
15. Golovko V.A. Neural networks: training, organization, application. Book 4. M.: IPRJR, 2001. 256 p. (In Russian).
16. Kruglov V.V., Borisov V.V. Artificial neural networks. Theory and practice. 2nd ed. M.: Hot line – Telecom, 2002. 382 p. (In Russian).
17. Haykin S. Neural networks: full course, 2nd ed., Rev. M.: I.D. Williams, 2006. 1104 p. (In Russian).
18. Danilushkin I.A., Kolpashchikov S.A. Simulation of the water flow system of a steam // Vestn. Samar. Gos. Tehn. Un-ta. Tehn. Nauki, 2019. No. 2 (62). Pp. 20–35. (In Russian).
19. Afanasyev V.N. Upravleniye neopredelennymi dinamicheskimi obyektami. Moscow: Fizmatlit, 2008. 208 pp. (In Russian).

Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы

УДК 549.08; 622.276.5:550.064.45

ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ АБСОЛЮТНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД

А.В. Песков

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

Аннотация. Рассмотрены аспекты измерения газопроницаемости на образцах терригенных и карбонатных пород коллекторов нефти и газа, а также искусственных образцах на отечественной установке «Дарсиметр». Для исследования использовались следующие типы пород коллекторов: поровые, трещиноватые, кавернозные. Уточнялась область применения закона Дарси для пород порового типа в интервале абсолютной проницаемости от 0.015 до 100 мД. Определялись коэффициенты проницаемости с учетом эффекта проскальзывания газа по уравнениям регрессии. Определялась кажущаяся проницаемость при малых перепадах давления. Для ряда образцов с низкой проницаемостью рассчитывался размер пор для связи со значением кажущейся проницаемости. Расчет производился по полученным величинам структурных коэффициентов пород методом электрического удельного сопротивления и по значениям пористости, определенным с использованием метода Преображенского. Для ряда образцов с естественной и искусственными трещинами и капилляром зависимость между градиентом давления и скоростью фильтрации становилась нелинейной и были определены виды законов фильтрации. Установление линейного или нелинейного закона контролировалось построением индикаторных кривых и расчетом числа Рейнольдса. Для терригенных пород высокой проницаемости определялись погрешности измерения коэффициентов газопроницаемости в различных интервалах перепада давления: подсчитывались дисперсия и коэффициент вариации, показавшие низкие значения.

Ключевые слова: коэффициент газопроницаемости, эффект скольжения газа, карбонатные и терригенные породы, число Рейнольдса, индикаторная диаграмма, поры.

Изучение абсолютной проницаемости горных пород на образцах пород является основным и начальным этапом для получения фильтрационно-емкостной характеристики пластов-коллекторов и покрышек [11]. Эти данные применяются при подсчете запасов месторождений и эксплуатации подземных хранилищ газа. Абсолютная проницаемость определяет качество флюидоупоров и дебиты скважин. Коэффициент абсолютной проницаемости определяется в петрофизических

лабораториях, как правило, согласно ГОСТ 26450.2-85 «Породы горные. Метод определения коэффициента абсолютной проницаемости при стационарной и нестационарной фильтрации» или по сведениям, изложенным в отечественной и зарубежной литературе по петрофизическим исследованиям [2, 5, 6]. Проницаемость пород изменяется широко – от 10^{-18} до 10^{-11} м². Фильтрация флюида может осуществляться через поры, естественные и искусственно созданные трещины, каверны. Структура пустотного пространства различна у терригенных и карбонатных пород. У терригенных пород диаметры пор и соединяющие их каналы изменяются незначительно. В карбонатных коллекторах диаметры поровых каналов на 1–2 порядка меньше диаметра микрокаверн, составляющих основную емкость коллекторов. Сложный тип карбонатных пород коллекторов включает в пустотное пространство поры, каверны и трещины. Ширина эффективных трещин варьирует от 10 до 20 мкм, а длина – от 2 мм до максимальных значений [16]. Трещины могут быть извилистыми и прямолинейными.

Абсолютная газопроницаемость определяется по эмпирическому закону Дарси.

Закон Дарси для определения газопроницаемости определяется выражением

$$Q = \frac{k F}{\mu l} \cdot \left(\frac{P_A^2 - P_B^2}{2P_B} \right), \quad (1)$$

где Q – объемный расход газа через образец;
 P_A, P_B – давление на входе и выходе образца;
 F – площадь поперечного сечения образца;
 k – проницаемость;
 μ – вязкость газа;
 l – длина образца.

Впервые исследованиями Л. Клинкаберга [1] было обнаружено, что проницаемость пород по газу k_g может быть выше проницаемости по жидкости $k_{жс}$, что объясняется эффектом проскальзывания газа в условиях, когда длина среднего пробега молекул газа соизмерима с диаметром капилляра.

Значение проницаемости зависит от среднего внутривязкого давления и определяется выражением [9]

$$K_{пр} = K_{жс} \left(1 + \frac{b}{P_{cp}} \right), \quad (2)$$

где b – константа Клинкаберга (коэффициент скольжения);
 P_{cp} – среднее давление при определении газопроницаемости.

Закон Дарси с учетом эффекта Клинкаберга определяется зависимостью

$$Q = \frac{k_{жс} F}{\mu l} \cdot \left(1 + \frac{2b}{P_A + P_B} \right) \cdot \left(\frac{P_A^2 - P_B^2}{2P_B} \right). \quad (3)$$

Приближенно константу Клинкаберга можно определить согласно уравнению [3]

$$b = 0,77 k_{жс}^{-0,39}. \quad (4)$$

Эффект проскальзывания газа (воздуха) тем больше, чем меньше коэффициент проницаемости горных пород и перепад давления, что было уточнено в работе [5].

Согласно [14] эффект Клинкенберга может проявляться только в лабораторных экспериментах при фильтрации разреженных газов в образцах керна низкой газопроницаемости – меньше 1 мД; в пластовых условиях месторождений (при давлениях больше 1–1,5 МПа) эффект Клинкенберга ничтожно мал.

Закон Дарси при фильтрации газа через трещину определяется из зависимости [8]

$$Q = \frac{k_T F}{\mu l} \cdot \left(\frac{P_A^2 - P_B^2}{2P_B} \right), \quad (5)$$

где k_T – проницаемость трещин.

Различают также изменение проницаемости трещины, связанное с изменением неровностей, шероховатостей берегов трещин введением коэффициента относительной шероховатости [10].

В ряде случаев линейная зависимость между скоростью течения флюида и давлением нарушается за счет проявления инерционных сопротивлений при увеличении скорости фильтрации. Связь между расходом флюида и градиентом давления при нелинейном законе фильтрации можно установить в виде [4, 6, 12]

$$\frac{\Delta P}{L} = aQ + bQ^2, \quad (6)$$

где a , b – коэффициенты, учитывающие влияние вязкости и плотности флюида.

Границы применимости линейного закона фильтрации можно определить исходя из числа Re. В.Н. Щелкачев [7] получил выражение для числа Re:

$$Re = \frac{V10\sqrt{k}}{m^{2.3}\mu}, \quad (7)$$

где V – скорость фильтрации;

k – проницаемость;

μ – кинематическая вязкость флюида;

m – пористость.

Критические значения числа Re в этой зависимости 1–12. При превышении этого значения определение фильтрационных параметров возможно проводить по зависимости (6).

Соответствие фильтрации линейному закону согласно [6] можно контролировать по параметру Дарси:

$$Da = \frac{V\mu L}{\Delta p k}, \quad (8)$$

где V – скорость фильтрации;

k – проницаемость;

μ – динамическая вязкость флюида;

Δp – перепад давления;

L – длина образца.

Исходя из выражения (6) получают коэффициенты, характеризующие пропускную способность пористой среды [4]: K_{μ} – вязкостной коэффициент, характеризующий пропускную способность породы для вязкого флюида, который измеряется в дарси; K_{ρ} – плотностной коэффициент, характеризующий пропускную способность породы для невязкого флюида. Плотностной коэффициент имеет размерность длины:

$$K_{\rho} = \frac{Q^2 \rho L}{F^2 \Delta P} = \frac{\rho}{b F^2}. \quad (9)$$

Чем больше площадь сечения поровых каналов, тем выше значение K_{μ} . С уменьшением извилистости поровых каналов возрастает K_{ρ} . Еще один способ контроля линейности потока флюида – с помощью графика $Q=f(\Delta p)$. При линейном характере фильтрации расход флюида Q прямо пропорционален перепаду давления, под действием которого происходит фильтрация, и все точки лежат на прямой, выходящей из начала координат. Точки, выпадающие из этой зависимости, указывают на отклонение от линейного закона.

Целью данных экспериментальных исследований явилось изучение газопроницаемости пород в широком интервале абсолютной проницаемости – от 0,15 до 100 мД при наличии в породах трех типов пустот: пор, каверн, трещин. Определялось соответствие фильтрации линейному закону и погрешность измерения проницаемости. Исследования проводились как на природном керне, так и на искусственных образцах, содержащих капилляры и трещины. Исследования проводились на отечественном приборе «Дарсиметр» в лаборатории физики пласта СамГТУ. Определялись погрешности определения газопроницаемости для нескольких интервалов перепадов давления на образцах. Для серии образцов рассчитывались величины $k_{жс}$ по графику Клинкенберга, отношение максимального значения проницаемости $K_{мин}$, измеренного при минимальном давлении $P_{мин}$, к проницаемости по жидкости $k_{мак}/k_{жс}$, константа Клинкенберга b_p по зависимости (4) и константа Клинкенберга по приближенной формуле b_{np} (табл. 1). Стоит уточнить, что $k_{жс}$ – это истинная газопроницаемость, рассчитанная по графику Клинкенберга, а $k_{мак}$ – кажущаяся повышенная проницаемость, измеренная при минимальном перепаде давления. Исходя из полученных данных по табл. 1 максимальным значением $k_{мак}/k_{жс}$ характеризуются образцы с минимальной абсолютной проницаемостью (образцы № 59, 69, 63, 10), b_p – константа Клинкенберга – была максимальной, хотя для образцов № 85, 9 (содержащего каверны), искусственной щели, капилляра значения b_p имеют минимальные значения при относительно средних значениях абсолютной проницаемости в рассматриваемой выборке. Для капилляра № 1 и искусственной щели не наблюдается отклонения в законе Дарси в связи с незначительным значением сечения пустот. Для образца естественной трещины № 3, капилляра 2, искусственных трещин значения b_p не рассчитывались в связи с тем, что фильтрация газа через образцы осуществлялась по нелинейному закону.

Рассмотрим измерения параметров фильтрации через образцы № 31, 19. Согласно табл. 2 число Re не превышает 1,1, что соответствует линейному закону фильтрации. Это также подтверждает индикаторная диаграмма, являющаяся линейной при всех градиентах давления. Подсчитанные средние выборочные проницаемости при близких давлениях характеризуются незначительными дисперсиями

$D=0.273$ и коэффициентом вариации не более $\nu = 0.85 \%$, что характеризует оптимальные условия регистрации параметров фильтрации и качество прибора.

Таблица 1

Результаты измерения проницаемости $k_{жс}$, b_p , b_{np} изученных образцов

№	Описание	$p_{мин}$	$p_{мак}$	$K_{мин}$	$K_{мак}$	$K_{ж}$	$K_{мак}/k_{жс}$	b_p	b_{np}
–	Эталон	0.286	1.6	1.275	1.5	0.806	1.86	0.98	0.65
69	Известняк	0.367	1.55	0.126	0.17	0.057	3.05	2.4	1.53
59	Известняк	0.24	1.47	0.028	0.04	0.006	7.1	7.3	3.35
85	Известняк	0.32	1	0.2	0.2	0.19	1.05	0.06	1.1
76	Известняк	0.43	1.54	0.49	0.54	0.42	1.27	0.31	1.02
60	Известняк	0.43	1.7	0.048	0.058	0.32	1.82	0.97	2.46
63	Известняк	0.38	1.7	0.047	0.067	0.016	4.07	3.67	2.59
10	Песчаник	0.35	1.6	0.13	0.18	0.035	5.2	4.74	1.5
49	Известняк каверны	0.27	1.47	3.84	4.31	1.16	3.72	2.85	0.43
56	Известняк каверны	0.285	1.74	12.08	13.4	11.1	1.2	0.23	0.28
15	Искусственная микрощель	0.26	1.68	11.49	12.09	10.7	1.11	0.07	0.308
11	Капилляр 1	0.407	1.86	2.64	2.7	2.63	1.08	0.11	0.52
31	Песчаник	0.32	1.88	51.2	61.1	28.68	2.1	0.17	0.17
19	Песчаник	0.28	1.82	101	90	78.3	1.36	0.39	0.13
1	Песчаник	0.39	1.7	9.9	8.54	6.7	1.48	0.5	0.33
3	Трещина известняк	0.26	1.64	229	111	–	–	–	–

Погрешность измерения снижается при увеличении Δp от 0.25 до 1.3 атм и максимальна при $\Delta p = 0.25$ атм. Согласно графику Клинкаберга $k_{жс} = 28.68$ мД, а $K_{мак}/k_{жс} = 2.13$ для образца № 31. Для образца № 19 $K_{мак}/k_{жс} = 1.36$. Значения $K_{мак}/k_{жс}$ для рассматриваемых образцов № 19, 31 имеют высокие величины, которые были ожидаемы так же, как для малопроницаемых образцов, например № 76 и 1. Для образца № 19 индикаторная диаграмма и число Re также соответствуют линейному закону фильтрации. Параметр Дарси Da оказался малоэффективным для определения характера фильтрации. Согласно графикам Клинкаберга истинная проницаемость для образца № 19 составила 76.67 мД. Для изученных образцов песчаника № 19–31, содержащих поры без трещин и капилляров с абсолютной проницаемостью 50–100 мД, с увеличением перепада давлений Δp до 1,65 атм расход Q , см³/с возрастает до 38,50 см³/с и проявляется эффект Клинкаберга.

Таблица 2

Результаты измерения проницаемости k при различных давлениях Δp образца 31

№	Q , см ³ /с	P , атм	K , атм	Da	Re	$K_{ср}$, мД	D , мД ²	V , %
1	6.18	0.59	61.1	1.01	0.48	61.0	0.273	0.85
2	6.09	0.59	60.2	1.01	0.48			
3	6.23	0.59	61.6	1.01	0.49			

№	Q , см ³ /с	P , атм	K , атм	Da	Re	K_{CP} , мД	D , мД ²	V , %
4	6.17	0.59	61.3	1.01	0.49	55.7	0.055	0.420
5	6.73	0.64	60.4	1.01	0.52			
6	11.46	1.02	56.2	1.01	0.77			
7	11.67	1.04	55.8	1.01	0.75			
8	10.82	0.99	55.6	1.01	0.71			
9	10.78	0.98	55.5	1.01	0.70			
10	10.81	0.98	55.7	1.01	0.70			
11	11.62	1.04	55.8	1.01	0.75			
12	10.76	0.98	55.4	1.01	0.70			
13	10.76	0.98	55.7	1.01	0.70			
14	11.54	1.03	55.9	1.01	0.74			
15	15.60	1.32	53.6	1.01	0.92	53.6	0.045	0.395
16	15.03	1.28	53.9	1.01	0.87			
17	14.87	1.28	53.3	1.01	0.87			
18	15.80	1.34	53.6	1.01	0.90			
19	14.93	1.28	53.8	1.01	0.87			
20	22.05	1.74	51.4	1.01	1.13	51.3	0.045	0.41
21	21.27	1.70	51.1	1.01	1.08			
22	22.40	1.75	51.6	1.01	1.11			
23	21.22	1.70	51.0	1.01	1.08			
24	21.30	1.70	51.2	1.01	1.07			

Рассмотрим фильтрацию через образец песчаника, содержащего трещину. Индикаторная диаграмма изгибается, и это свидетельствует о нелинейном законе фильтрации. Рассчитанные по формуле Дарси коэффициенты проницаемости K^* искажены за счет нелинейной фильтрации и не являются истинными (табл. 3). Далее был получен график PQ/l от Q и рассчитаны коэффициенты a и b в уравнении (6).

Таблица 3

Результаты измерения проницаемости k при различных давлениях Δp образца с трещиной

Q , см ³ /с	ΔP , атм	K^* , мД
8.9	0.259	229.9
17.6	0.6	170.5
27.7	0.97	145.3
40.4	1.484	118.1
44	1.644	111.0

Нелинейная зависимость для образца с трещиной имеет вид $\frac{P}{l} 5 \cdot 10^{10} Q + 7 \cdot 10^{15} Q^2$, если давление измеряется в паскалях, расход в м³/с. При этом $K_{\mu} = 5 \cdot 10^{-13}$, $K_{\sigma} = 3.71 \cdot 10^{-10}$. Параметры трещины определялись по периметру, выходящему на торец образца; раскрытость составила $b = 0.126$ мм. Пористость трещины $m = 4.4 \cdot 10^{-4}$.

При этом проницаемость K , определенная по зависимости $K = 85000b^2m$ [8], составила $447 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$.

Рассмотрим фильтрацию через искусственный образец, содержащий капилляр 2 с диаметром 200 мкм (табл. 4). Индикаторная диаграмма показывает нелинейный характер фильтрации. Коэффициенты проницаемости через образец подсчитывались по закону Дарси с учетом зависимости проницаемости $k = \frac{mR^2}{8\phi}$ [8],

где m – пористость образца с капилляром; R – радиус капилляра; ϕ – структурный коэффициент. В связи с нелинейной зависимостью фильтрации коэффициенты проницаемости, рассчитанные по закону Дарси в табл. 4, не являются истинными. Для образца, содержащего капилляр, при перепаде давлений Δp до 1,65 атм расход через образец снижается почти в 5 раз относительно образцов песчаника № 19–31, однако индикаторная кривая указывает на нарушение закона Дарси и фильтрация идет по нелинейному закону.

Нелинейная зависимость для образца с капилляром в диапазоне давлений до 1 атм имеет вид $\frac{P}{l} = 2 \cdot 10^{11} Q + 3 \cdot 10^{17} Q^2$, если давление измеряется в паскалях, расход в м³/с. При этом $K_{\mu} = 127 \cdot 10^{-15}$, $K_{\rho} = 8.84 \cdot 10^{-12}$.

До давления 1.76 атм зависимость $\frac{P}{l}$ от Q аппроксимируется многочленом пятой степени при величине достоверности аппроксимации $R^2 = 0.996$:

$$\frac{P}{l} = 6 \cdot 10^{35} Q^5 - 7 \cdot 10^{30} Q^4 + 3 \cdot 10^{25} Q^3 - 7 \cdot 10^{19} Q^2 - 3 \cdot 10^7.$$

Таблица 4

Результаты измерения проницаемости k при различных давлениях Δp образца с капилляром № 2

№	Q , см ³ /с	P , атм	K , мД
1	7.14	1.76	16.3
2	7.03	1.76	16.1
3	6.05	1.35	20.3
4	6.02	1.34	20.3
5	4.79	0.96	25.4
6	4.78	0.96	25.5
7	4.77	0.96	25.6
8	2.90	0.51	34.6
9	3.09	0.54	34.1
10	3.09	0.55	33.4
11	1.63	0.24	45.8
12	1.74	0.26	44.8

Проницаемость, рассчитанная по [8] по зависимости $K = \frac{mR^2}{8\phi}$ при структурном коэффициенте $\phi = 1$, составила $79.5 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$. Это значение сопоставимо с найденным значением из графика $K_{\mu} = 127 \cdot 10^{-15}$.

Рассмотрим фильтрацию через искусственный образец трещины раскрытостью 30 мкм. Это значение характерно для интервала средних величин раскрытости трещиноватых сложных карбонатных пород. Рассчитанная трещинная пористость составила $m = 0,00064$, рассчитанный коэффициент проницаемости $k = 48$ мД, рассчитанный по закону Дарси коэффициент проницаемости $k = 49$ мД. Получена линейная зависимость расхода газа q от перепада давления Δp . Полученные расчетным и экспериментальным способами близкие значения коэффициента проницаемости указывают на достоверность получаемых результатов на искусственных моделях трещин, моделирующих природные трещины, и открывает возможности для определения проницаемости на искусственно созданных трещинах для гидроразрыва пласта – одного из эффективных методов интенсификации добычи нефти.

Искусственный образец трещины с просветностью $b = 47$ мкм имеет расчетную пористость $m = 0.00106$, расчетную проницаемость $k = 225$ мД. Экспериментальное значение проницаемости, полученное на установке «Дарсиметр» при $\Delta p = 1.72$ атм, составило $k = 211$ мД. Получена нелинейная зависимость расхода газа q от перепада давления Δp . Полученные расчетным и экспериментальным способами значения коэффициента проницаемости для $\Delta p = 1.72$ близки. Для $\Delta p = 0.4$ атм измеренное значение на установке «Дарсиметр» составило $k = 281$ мД. Таким образом, нелинейный закон фильтрации газа осуществляется при раскрытости щели более 47 мкм.

По образцу с кавернами число Re ниже 1 и закон фильтрации является линейным, прослеживается увеличение проницаемости с уменьшением перепада давления, характерное для эффекта проскальзывания газа и $K_{\max}/k_{\text{ж}} = 1.2$. Параметр Дарси Da не отразил изменения характера фильтрации и при данных небольших параметрах расхода оказался малоэффективным.

Таблица 5

Результаты измерения и расчета удельного сопротивления пород ρ_n , параметра пористости P_n , структурного коэффициента ϕ , пористости m , проницаемости k , радиуса поровых каналов R

№ образца	ρ_n , Ом·м	P_n	m , %	ϕ	$\phi_{\text{расч}}$	K , мД	R , мкм
59	67.7	451.0	0.01	4.06	89.61	0.006	1.89
85	44.3	295.5	0.05	14.66	13.71	0.190	20.19
66	49.0	326.6	0.02	6.63	36.62	0.070	16.33
61	49.0	326.6	0.03	9.70	24.10	0.088	20.87
60	98.0	653.2	0.03	18.62	25.22	0.320	37.71
63	88.7	591.0	0.03	15.96	26.76	0.016	8.37
76	42.0	280.0	0.01	3.64	59.79	0.420	32.82
69	21.0	140.0	0.05	7.07	13.44	0.057	11.09

В ходе исследований пород методом удельного электрического сопротивления [9, 15] (табл. 5) определялись удельные сопротивления пород, насыщенных пластовой водой с минерализацией 50 г/л, рассчитывался параметр пористости, определялась пористость пород методом Преображенского, и по этим данным рассчитывался структурный коэффициент, а далее по зависимости И.Ф. Котяхова [13] – размер пор.

Отклонение от закона Дарси, связанное с эффектом проскальзывания газа по [4], наблюдается для размеров пор менее 10 мкм, поэтому для ряда малопроницаемых образцов определялись средние размеры пор по данным пористости с учетом структурного коэффициента, измеренного по данным метода удельного электрического сопротивления (см. табл. 5). Для образцов № 59, 69, 63 с размером пор менее 11 мкм характерны значения $K_{\text{мак}}/k_{\text{ж}} = 3.5-7$. Вероятно, в образцах № 61, 66, 31 присутствует большая доля пор с размером менее 10 мкм.

Заключение

Измерения на аппаратуре «Дарсиметр» показали низкие погрешности при определении газопроницаемости – не более (коэффициент вариации) $V = 0,45 \%$. Измерения показали для ряда образцов возрастание проницаемости в несколько раз в области малых поровых давлений. Эффект проскальзывания газа для образцов, содержащих поры, тем больше, чем меньше коэффициент абсолютной проницаемости пород и перепад давления в образце. Применимость закона Дарси определяется размером поровых каналов. При среднем размере пор до 10 мкм наблюдается эффект проскальзывания Клинкенберга. Методом удельного электрического сопротивления определены удельные сопротивления образцов пород, рассчитан параметр пористости пород, пористость пород методом Преображенского, структурный коэффициент и размер пор. Выделены образцы, для которых размер пор менее 11 мкм имеет значительные величины – $K_{\text{мак}}/k_{\text{ж}} = 3.5-7$. Для образцов, представленных трещинами или капиллярами, характерно отсутствие извилистости и значительные сечения пустотного пространства. Фильтрация по таким пустотам происходит по нелинейному закону. Таким образом, изучены образцы терригенных и карбонатных пород и искусственные образцы, содержащие капилляры и трещины. Определен вид зависимости для нелинейного закона фильтрации через капилляр, естественную тещину и ряд искусственных трещин. Для трещиноватых горных пород отклонение газопроницаемости от истинных значений может оказаться существенным, что в итоге сказывается на общей оценке фильтрационно-емкостных свойств пластовых систем. Измерения проницаемости при малых перепадах давления показали на исследованных образцах приращение значений проницаемости, даже если абсолютная проницаемость имеет значения 50–100 мД.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Klinkenberg L.J.* The permeability of porous media to liquids and gases // Am. Petroleum Inst. Drilling and Production Practice, 1941. Pp. 200–211.
2. Методическое руководство по исследованию пород коллекторов нефти и газа физическими и петрографическими методами для производственных лабораторий. М.: ВНИГНИ, 1973.
3. *Виноградов В.Г., Дахнов А.В., Пацевич С.Л.* Практикум по петрофизике. М.: Недра, 1990. 227 с.
4. *Ханин А.А.* Петрофизика нефтяных и газовых пластов. М.: Недра, 1976. 295 с.
5. *Песков А.В., Ольховская В.А.* Определение газопроницаемости пород с учетом эффекта скольжения газа // Нефтепромысловое дело. 2010. № 3. С. 10–12.
6. *Гудок Н.С., Богданович Н.Н., Мартынов В.Г.* Определение физических свойств нефтеводосодержащих пород. М.: Недра-Бизнесцентр, 2007. 563 с.
7. *Щелкачев В.Н., Лапук Б.Б.* Подземная гидравлика. М.: НИЦ, 2001. 735 с.
8. *Гиматудинов Ш.К., Ширковский А.И.* Физика нефтяного и газового пласта. М.: Недра, 1982. 309 с.
9. *Добрынин В.М., Вендельштейн Б.Ю., Кожевников Д.А.* Петрофизика. М.: Недра, 1991. 367 с.
10. *Михайлов Н.Н.* Физика нефтяного и газового пласта. М.: Макспресс, 2008. 445 с.
11. *Орлов Л.И., Карнов Е.Н., Топорков В.Г.* Петрофизические исследования коллекторов нефти и газа. М.: Недра, 1987. 214 с.

12. *Мирзаджанзаде А.Х., Аметов И.М., Ковалев А.Г.* Физика нефтяного и газового пласта. М.: Недра, 1992. 268 с.
13. *Котяхов Ф.И.* Физика нефтяных и газовых коллекторов. М.: Недра, 1972. 286 с.
14. *Троицкий В.М.* Феноменологический подход к анализу экспериментальных данных о газопрооницаемости в пористых средах. Истинная причина эффекта Клинкенберга // Вести газовой науки. 2017. № 2 (30). С. 111–121.
15. *Тулбович Б.И.* Методы изучения пород коллекторов нефти и газа. М.: Недра, 1979. 368 с.
16. *Гмидт Л.П., Леви С.Ш.* Атлас карбонатных пород коллекторов. М.: Недра, 1972. 81 с.

Статья поступила в редакцию 16 января 2020 г.

FEATURES OF MEASURING ABSOLUTE PERMEABILITY OF ROCKS

A.V. Peskov

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

Abstract. *Aspects of gas permeability measurement on samples of terrigenous and carbonate rocks of oil and gas collectors, as well as artificial samples on the domestic Darsimeter plant are considered. The following types of reservoir rocks were used for the study: pore, fractured, cavernous. The scope of application of the Darcy Law for pore-type rocks was clarified, which is limited to small pore pressures. Permeability coefficients were determined taking into account the gas slip-law effect of Klinkenberg on regression equations. Apparent permeability at low pressure drops was determined. For a number of samples with low permeability, the pore size was calculated to relate to the apparent permeability value. The calculation was carried out on the basis of the obtained values of structural coefficients of rocks by the method of electrical resistivity and on the basis of porosity values determined using the Preobrazhenskiy method. For a number of crack and capillary samples, the relationship between the pressure gradient and the filtration rate became nonlinear, and types of filtration laws were determined. Establishing the applicability of Darcy's law or nonlinear law was controlled by constructing indicator curves and calculating the Reynolds number. For terrigenous rocks of high permeability, errors of measurement of gas permeability coefficients at different pressure drop intervals were determined: dispersion and coefficient of variation showing low values were calculated.*

Keywords: *gas permeability coefficient, gas sliding effect, carbonate and terrigenous rocks, Reynolds number, indicator diagram, pores.*

REFERENCES

1. *Klinkenberg L.J.* The permeability of porous media to liquids and gases // Am. Petroleum Inst. Drilling and Production Practice, 1941. Pp. 200–211.
2. Methodological guidelines for the study of rocks of oil and gas reservoirs by physical and petrographic methods for production laboratories. М.: VNIGNI, 1973.
3. *Vinogradov V.G., Dakhnov A.V., Patsevich S.L.* Workshop on Petrophysics. М.: Nedra, 1990. 227 p.
4. *Khanin A.A.* Petrophysics of oil and gas reservoirs. М.: Nedra, 1976. 295 p.
5. *Peskov A.V., Olkhovskaya V.A.* Determination of gas permeability of rocks taking into account the effect of gas slip // Oilfield business. 2010. No. 3. S. 10–12.

Aleksander V. Pescov (Ph.D. (Geologo-Mineralogical)), Associate Professor.

6. *Gudok N.C., Bogdanovich N.N., Martynov V.G.* Determination of the physical properties of oil-bearing rocks. M.: Nedra-Businesscenter, 2007. 563 p.
7. *Shchelkachev V.N., Lapuk B.B.* Underground hydraulics. M.: SIC, 2001. 735 p.
8. *Gimatudinov Sh.K., Shirkovsky A.I.* Physics of the oil and gas reservoir. M.: Nedra, 1982. 309 p.
9. *Dobrynin V.M., Wendelstein B.Yu., Kozhevnikov D.A.* Petrophysics. M.: Nedra, 1991. 367 p.
10. *Mikhailov N.N.* Physics of oil and gas reservoir. M.: Maxpress, 2008. 445 p.
11. *Orlov L.I., Karpov E.N., Toporkov V.G.* Petrophysical studies of oil and gas reservoirs. M.: Nedra, 1987. 214 p.
12. *Mirzadzhanzade A.Kh., Ametov I.M., Kovalev A.G.* Physics of the oil and gas reservoir. M.: Nedra, 1992. 268 p.
13. *Kotyakhov F.I.* Physics of oil and gas reservoirs. M.: Nedra, 1972. 286 p.
14. *Troitsky V.M.* A phenomenological approach to the analysis of experimental data on gas permeability in porous media. The true cause of the Klinkenberg effect // News of gas science. 2017. No. 2 (30). Pp. 111–121.
15. *Tulbovich B.I.* Methods for the study of rocks of oil and gas reservoirs. M.: Nedra, 1979. 368 p.
16. *Gmidt L.P., Levy S.Sh.* Atlas of carbonate rocks of reservoirs. M.: Nedra, 1972. 81 p.

УДК 681.51 (075.4)

ОЦЕНКА МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ПРОИЗВОДЯЩИХ ФУНКЦИЙ

В.Н. Яшин

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

Аннотация. Рассматриваются вопросы, связанные с оценкой метрологической надежности средств измерений с использованием метода производящих функций. Метрологическая надежность средств измерений является важнейшей характеристикой, определяющей точность и достоверность производимых ими измерений физических величин. В предлагаемой статье в качестве оценки метрологической надежности предложен показатель достоверности, количественное значение которого может быть найдено с использованием метода производящих функций, что является научной новизной работы. В работе обосновывается актуальность проблемы оценки метрологической надежности средств измерений, поскольку существующая тенденция, направленная на структурное и функциональное усложнение средств измерений, может приводить к снижению их надежности, и в частности метрологической надежности. Основная цель работы связана с систематизацией вопросов надежности средств измерений и оценкой их метрологической надежности с применением метода производящих функций. Применение метода производящих функций позволяет на основе выбранной математической модели процесса эволюции погрешности средств измерений и предложенного показателя метрологической надежности осуществить метрологический прогноз поведения погрешности средств измерения во времени. В качестве модели эволюции погрешности средств измерений была выбрана модель постепенных отказов с дискретным изменением погрешности во времени, которая характерна для определенного класса средств измерений, например средств измерений интервалов времени. Метод производящих функций, используемый для оценки метрологической надежности средств измерений, позволил повысить эффективность алгоритма количественной оценки метрологической надежности средств измерений за счет упрощения математических операций, лежащих в его основе.

Ключевые слова: средства измерений, метрологическая надежность, оценка, производящие функции, показатель достоверности.

Введение

Оценка надежности различных технических средств, в том числе и средств измерений (СИ) физических величин, была и остается одной из актуальных проблем, стоящих перед разработчиками таких устройств и теми, кто занимается их эксплуатацией. Актуальность этой проблемы повышается, поскольку существующая тенденция, направленная на структурное и функциональное усложнение технических устройств, может приводить к снижению их надежности. Решение этой проблемы в значительной степени зависит как от предварительного расчета

Яшин Владимир Николаевич (к.т.н., доц.), доцент кафедры «Информационные технологии».

надежности в процессе разработки технического устройства или системы с целью определения прогнозируемых характеристик надежности, так и их периодической оценки в процессе эксплуатации. В соответствии с межгосударственным стандартом по надежности в технике [1] под надежностью понимается свойство объекта сохранять во времени способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования. При этом в качестве показателей надежности выступают стабильность, безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость [1].

Постановка задачи

Целью работы является систематизация вопросов, связанных с оценкой надежности СИ, и оценка метрологической надежности СИ на основе предлагаемого показателя метрологической надежности с использованием метода производящих функций.

Систематизация вопросов, связанных с оценкой надежности СИ

В теории надежности принято различать функциональную и метрологическую надежность.

Функциональная надежность технического средства определяется функциональными (внезапными) отказами, которые носят явный характер, проявляются внезапно и могут быть обнаружены без проведения его поверки.

Функциональные отказы приводят к прекращению работоспособности технического устройства, системы в целом или их отдельных узлов. Если речь идет о СИ физических величин, то в них также могут возникать внезапные отказы, характеризующиеся скачкообразным изменением одной или нескольких метрологических характеристик (МХ), т. е. характеристик, определяющих основное назначение СИ. Эти отказы в силу их случайного проявления невозможно прогнозировать. Последствия этих отказов, например внезапный выход из строя блоков питания, измерительных датчиков или потеря их чувствительности и т. д., легко обнаруживаются в ходе эксплуатации СИ и носят явный характер. Особенностью таких отказов является постоянство во времени их интенсивности, что позволяет применять для их анализа классическую теорию надежности. С интенсивностью отказов СИ связаны и другие характеристики, определяющие функциональную надежность СИ: вероятность безотказной работы СИ и среднее время безотказной работы (наработка на отказ). Поскольку случайный отказ может произойти в любой момент времени независимо от того, сколько времени проработало СИ, интенсивность внезапных отказов от времени не зависит; соответственно, формулы и алгоритмы для нахождения вероятностей безотказной работы и среднего времени безотказной работы СИ значительно упрощаются.

Метрологическая надежность относится прежде всего к характеристикам СИ и определяется как вероятность сохранения МХ СИ внутри области допусков на эти характеристики за некоторый интервал времени. Здесь следует также отметить, что если вопросы оценки функциональной надежности СИ освещены достаточно хорошо в отечественной и зарубежной литературе, то вопросы, связанные с оценкой метрологической надежности, освещены весьма скупо. Это обусловлено сложностью алгоритма оценки метрологической надежности СИ, а также тем, что в настоящее время не существует универсальной математической модели метро-

логических отказов СИ. Метрологическая надежность СИ связана с таким понятием, как метрологическая характеристика. В соответствии с межгосударственным стандартом «Нормируемые метрологические характеристики средств измерений» [2] метрологические характеристики – это такие характеристики, которые предназначены для оценки технического уровня и качества измерений, для определения результатов измерений и расчетной оценки характеристик инструментальной погрешности измерений. Стандартом установлен комплекс нормируемых характеристик МХ СИ, которые разбиты на группы: характеристики, предназначенные для определения результатов измерения; характеристики погрешностей СИ; характеристики чувствительности СИ к влияющим величинам; динамические характеристики СИ; неинформативные параметры выходного сигнала СИ.

Метрологическая надежность тесно связана с таким понятием, как метрологический отказ, который идентифицируется как выход МХ СИ из установленных допустимых границ. Как показывают проведенные исследования, метрологические отказы СИ происходят значительно чаще, чем функциональные, что обуславливает необходимость разработки специальных методов их прогнозирования и обнаружения [3].

Метрологические отказы, в свою очередь, можно подразделить на внезапные и постепенные [3, 4].

Внезапными называются отказы, которые характеризуются внезапными (скачкообразными) изменениями одной или нескольких МХ СИ и которые достаточно трудно прогнозировать по причине их случайного характера.

Постепенными называются отказы, являющиеся следствием монотонного изменения одной или нескольких МХ СИ. По характеру проявления они являются скрытыми. Эти отказы могут быть выявлены только по результатам периодических измерений или контроля СИ.

Понятие метрологического отказа является в известной степени условным, поскольку определяется допуском на МХ, который в общем случае может меняться в зависимости от конкретных условий [5]. Кроме того, зафиксировать точное время наступления метрологических отказов ввиду их скрытого характера проявления невозможно, в то время как явные отказы, которыми оперирует классическая теория надежности, могут быть обнаружены в момент их возникновения [5].

В качестве показателей метрологической надежности СИ могут выступать и показатели, которые упоминались ранее в стандарте [1]: стабильность, безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость. Среди указанных показателей наибольшее влияние на метрологическую надежность оказывают показатели стабильности и долговечности, поскольку они напрямую зависят от МХ. Так, стабильность СИ, являясь показателем, отражающим неизменность во времени его МХ, описывается временными зависимостями параметров закона распределения погрешностей СИ, т. е. в первую очередь стабильность определяется такой МХ, как погрешность СИ. Как отмечено в [5], стабильность и метрологическая надежность в целом являются различными свойствами одного и того же процесса старения СИ. Показателем, который также зависит от МХ, является и долговечность, под которым понимается свойство СИ сохранять свое работоспособное состояние до наступления предельного состояния, т. е. это такое состояние СИ, при котором все его МХ соответствуют нормированным значениям, а предельным называется состояние СИ, при котором его применение недопустимо [1].

Таким образом, метрологическая надежность СИ зависит от МХ, среди которых важнейшей характеристикой является погрешность СИ. Погрешность СИ может изменяться в процессе его эксплуатации, при этом необходимо отметить, что не все составляющие погрешности подвержены изменению во времени, например методические погрешности, которые зависят только от используемой методики измерения. Однако большая часть составляющих погрешности СИ обусловлена процессами старения в измерительных блоках и элементах, вызванными неблагоприятными влияниями внешней окружающей среды. Эти процессы протекают в основном на молекулярном уровне и не зависят от того, находится ли СИ в эксплуатации или на консервации. Поэтому основным фактором, определяющим старение СИ, является время, прошедшее с момента их изготовления. Скорость старения СИ зависит прежде всего от используемых материалов и технологий [5]. Исследования показали, что необратимые процессы, изменяющие погрешность, протекают очень медленно и зафиксировать эти изменения в ходе эксперимента в большинстве случаев невозможно. В связи с этим большое значение приобретают различные математические методы, на основе которых строятся модели эволюции погрешностей СИ с целью прогнозирования метрологических отказов. Следовательно, важнейшая задача, решаемая при определении метрологической надежности СИ, состоит в нахождении начальных изменений МХ, построении математических моделей эволюции МХ и определении показателей метрологической надежности во времени с последующей экстраполяцией полученных результатов на интервал времени, равный среднему времени эксплуатации СИ [6]. Как показали многочисленные исследования [3–11] в области эволюции МХ СИ во времени, многие из них, например погрешность, представляют собой случайный нестационарный процесс, плотность распределения вероятностей которого близка к нормальному закону распределения, а математическое ожидание и дисперсия могут быть представлены в виде соответствующих полиномов. Анализ таких процессов основан на теории случайных процессов. Нестационарный случайный процесс эволюции погрешности СИ может быть представлен в виде множества его реализаций (кривых) погрешности Δ_i . Поскольку нестационарные случайные процессы в отличие от стационарных не обладают свойством эргодичности, т. е. статистические характеристики таких процессов (математическое ожидание, дисперсия, корреляционная функция и пр.) нельзя усреднять во времени для получения их оценок, то для анализа таких процессов были разработаны и разрабатываются соответствующие этим особенностям нестационарных случайных процессов математические методы. Среди этих методов довольно широкое применение получили методы, основанные на идентификации нестационарных случайных процессов в рамках некоторых специальных классов нестационарных процессов, например нестационарных случайных процессов со стационарными приращениями СПСП [11]. Однако какие бы методы ни использовались для анализа нестационарных случайных процессов, в их основе лежат различные модели эволюции погрешности СИ: линейные, экспоненциальные, логистические, модели, основанные на спектральном описании эволюции погрешности СИ, полиномиальные модели, диффузионные марковские модели, модели на основе процессов авторегрессии проинтегрированного скользящего среднего и т. д. Перечисленные выше модели эволюции погрешности СИ имеют свои достоинства и недостатки [12–16], которые необходимо учитывать при выборе той или иной модели. Однако при выборе

конкретной модели важно также учитывать результаты проверки ее на адекватность реальному процессу эволюции погрешности СИ на основе полученных экспериментальных данных для определенного вида СИ.

Оценка метрологической надежности СИ с использованием метода производящих функций

В статье предложен метод оценки метрологической надежности СИ с использованием метода производящих функций, позволяющий на основе выбранной математической модели процесса эволюции погрешности СИ и предложенного показателя метрологической надежности осуществить метрологический прогноз СИ. В качестве модели эволюции погрешности СИ была выбрана модель постепенных отказов с дискретным изменением погрешности во времени, которая характерна для определенного класса СИ, например измерителей интервалов времени и пр. Траектории эволюции (изменения) погрешностей в такой модели представлены на рис. 1.

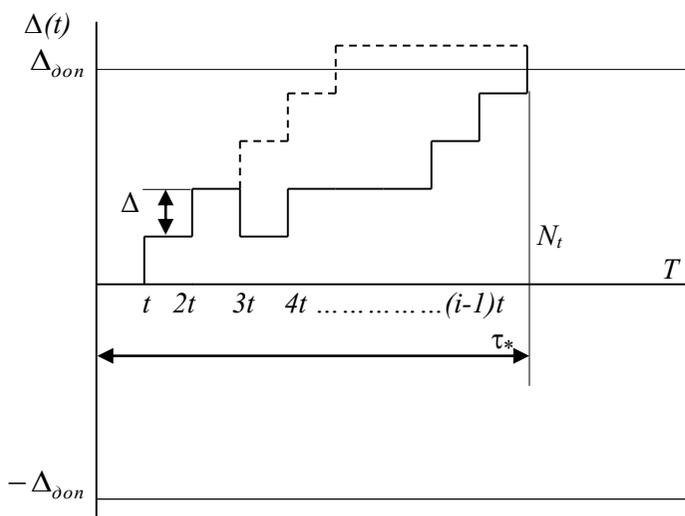


Рис. 1. Траектории эволюции погрешности СИ с дискретными изменениями абсолютных погрешностей во времени

Показателем метрологической надежности для указанного класса СИ был выбран показатель достоверности, который в данном случае выступает мерой метрологической надежности и определяется как вероятность сохранения погрешности СИ внутри области допусков на эти характеристики за интервал измерения. Показатель достоверности может быть записан в следующем виде:

$$D = P \left\{ |\Delta(t)| \leq \Delta_{дон} \right\}_{t \in \tau_*}, \quad (1)$$

- где P – вероятность метрологического отказа;
 $\Delta(t)$ – абсолютная погрешность СИ, характеризующая процесс эволюции погрешности во времени t ;
 $\Delta_{дон}$ – область допусков;
 τ_* – интервал времени измерения.

Из теории цепей Маркова известно, что вероятность P конечна и может быть соответствующим образом определена. На рис. 1 приведены возможные (ограничимся двумя реализациями) траектории эволюции погрешности для модели постепенного отказа с дискретным изменением погрешности во времени. Пересечение траекториями границ допустимой абсолютной погрешности $\pm \Delta_{don}$ идентифицируется как метрологический отказ.

С учетом выражения (1) показатель достоверности может быть определен из соотношения

$$D = 1 - (P^- + P^+), \quad (2)$$

где P^- , P^+ – вероятности достижения или превышения абсолютной погрешностью соответственно нижней и верхней границ поля допуска за время τ_* .

Вероятности метрологических отказов P^- и P^+ можно представить в виде следующих сумм:

$$P^- = \sum_{h=1}^{N_t} U_{x_0, h}; \quad P^+ = \sum_{h=1}^{N_t} V_{x_0, h}, \quad (3)$$

где $U_{x_0, h}$ и $V_{x_0, h}$ – вероятности достижения на h -м шаге соответственно нижней и верхней границ поля допуска;

$N_t = \tau_* / t$ – интервал сохранения накопленной погрешности в пределах поля допуска $\pm \Delta_{don}$, выраженный через параметр t .

Выражение для показателя достоверности можно представить в виде

$$D = 1 - \sum_{h=1}^{N_t} (U_{x_0, h} + V_{x_0, h}). \quad (4)$$

Вероятности $U_{x_0, h}$ и $V_{x_0, h}$ могут быть определены из разностных уравнений двух переменных x_0 и h вида

$$U_{x_0, h+1} = P_+ U_{x_0+1, h} + P_- U_{x_0-1, h}; \quad (5)$$

$$V_{k_t - x_0, h+1} = P_+ U_{k_t - x_0 - 1, h} + P_- U_{k_t - x_0 + 1, h}, \quad (6)$$

где $k_t = \frac{2(\Delta_{don})}{\Delta}$ – величина поля допуска, выраженная в приращениях величины Δ ;

$x_0 = \frac{(\Delta_0)}{\Delta}$ – начальное значение погрешности, выраженное в приращениях величины Δ ;

P_+ – вероятность приращения «положительной» погрешности на величину Δ ;

P_- – вероятность приращения «отрицательной» погрешности на величину Δ .

Для решения уравнений (5) и (6) воспользуемся методом производящих функций, который позволит значительно упростить решения указанных уравнений и в дальнейшем применить для нахождения показателя достоверности более эффективный вычислительный алгоритм. Метод производящих функций был впервые предложен выдающимся ученым Л. Эйлером. Метод применялся и применяется

для компактной записи информации о различных последовательностях, нахождения зависимостей для последовательности чисел, заданных рекуррентным соотношением (например, для чисел Фибоначчи), исследования асимптотического поведения последовательностей, представления дискретных законов распределения дискретной случайной величины и композиций законов распределений, вычисления моментов дискретных законов случайной величины и пр. Достаточно широкое применение этого метода обусловлено возможностью построения на его основе эффективных вычислительных алгоритмов решения определенных задач, что при современном уровне развития информационных технологий является актуальным. В общем виде производящая функция представляет собой формальный степенной ряд вида

$$\varphi(z) = \sum_{k=0}^{\infty} P_k z^k, \quad (7)$$

порождающий (производящий) последовательность коэффициентов P_0, P_1, P_2, \dots , при этом $\sum_{k=0}^{\infty} P_k = 1; 0 \leq z \leq 1$.

Термин «формальный» означает, что для данного ряда не определяется область сходимости ряда. Каждый коэффициент P_k численно равен вероятности появления такого числа событий, число которых равняется показателю степени z . Укажем здесь основные свойства производящих функций:

$\varphi(z), \varphi'(z) \dots$ ряды сходятся абсолютно;

$$\varphi(z) = \sum_{k=0}^{\infty} P_k z^k; \quad \varphi(1) = 1; \quad \varphi'(1) = \sum_{k=0}^{\infty} P_k k = m_1;$$

$$\varphi'(z) = \sum_{k=0}^{\infty} P_k k z^{k-1}; \quad \varphi''(1) = \sum_{k=0}^{\infty} P_k k(k-1) = m_2 - m_1$$

$$\varphi''(z) = \sum_{k=0}^{\infty} P_k k(k-1) z^{k-2}; \quad \varphi''(1) = \sum_{k=0}^{\infty} P_k k(k-1) = \sum_{k=0}^{\infty} P_k k^2 - \sum_{k=0}^{\infty} P_k k = m_2 - m_1$$

$$\varphi'(1) + \varphi''(1) = m_2.$$

Используя метод производящих функций, представим производящую функцию в виде

$$V_{x_0}(z) = \sum_{h=0}^{\infty} U_{x_0,h} z^h. \quad (8)$$

Умножим уравнение (5) на z^{h+1} и, суммируя его по h , получим новое разностное уравнение одного параметра z :

$$U_{x_0}(z) = P_+ z V_{x_0} + 1(z) + P_- z V_{x_0-1}(z). \quad (9)$$

Для полученного уравнения обязательными являются граничные условия вида

$$V_0(z) = 1; \quad V_k(z) = 0.$$

Частные решения уравнения (9) будут иметь вид

$$V_{x_0}(z) = \beta^{x_0}(z).$$

Подставляя частные решения в уравнение (9), получаем для нахождения $\beta(z)$ квадратное характеристическое уравнение, имеющее следующие корни:

$$\beta_{1,2}(z) = \frac{1 + \sqrt{1 - 4P_+P_-z^2}}{2P_+z},$$

что позволяет при любых произвольных функциях $A(z)$ и $B(z)$ записать общее решение уравнения (9) в виде

$$V_{x_0}(z) = A(z)\beta_1^{x_0}(z) + B(z)\beta_2^{x_0}(z).$$

С учетом наложенных граничных условий последнее выражение запишем в следующем виде:

$$V_{x_0}(z) = \frac{\beta_1^{k_t}(z)\beta_2^{x_0}(z) - \beta_1^{x_0}(z)\beta_2^{k_t}(z)}{\beta_1^{k_t}(z) - \beta_2^{k_t}(z)}. \quad (10)$$

Учитывая, что $\beta_1(z)\beta_2(z) = P_-P_+^{-1}$, выражение (10) можно записать следующим образом:

$$V_{x_0}(z) = \left(\frac{P_-}{P_+}\right)^{x_0} \frac{\beta_1^{k_t-x_0}(z) - \beta_2^{k_t-x_0}(z)}{\beta_1^{k_t}(z) - \beta_2^{k_t}(z)}. \quad (11)$$

Производящая функция $V_{x_0}(z)$ вероятности $V_{x_0,n}$ превышения погрешностью нижней границы поля допуска может быть теперь определена без решения разностного уравнения (6) путем замены в выражении (11) P_+, P_-, x_0 на $P_+, P_-, k_t - x_0$:

$$V_{x_0}(z) = \left(\frac{P_-}{P_+}\right)^{k_t-x_0} \frac{\beta_1^{x_0}(z) - \beta_2^{x_0}(z)}{\beta_1^{k_t}(z) - \beta_2^{k_t}(z)}. \quad (12)$$

Теперь для того, чтобы найти выражения для условных вероятностей $U_{x_0,h}$ и $V_{x_0,h}$, определяющие вероятности метрологических отказов P^+, P^- и величину показателя достоверности D , необходимо определить коэффициенты при z^h в разложении соответствующих производящих функций.

С целью упрощения последующих математических преобразований примем начальное значение погрешности СИ равным половине поля допуска, т. е. $x_0 = \frac{k_t}{2}$, и окончательно получим для показателя достоверности следующее выражение:

$$D = 1 - \frac{2}{k_t} \sqrt{P_+P_-} \left[\left(\frac{P_+}{P_-}\right)^{\frac{k_t}{4}} + \left(\frac{P_-}{P_+}\right)^{\frac{k_t}{4}} \right] \sum_{i=1}^{k_t-1} \frac{1 - (2\sqrt{P_+P_-} \cos \frac{\pi i}{k_t})^{N_i}}{1 - 2\sqrt{P_+P_-} \cos \frac{\pi i}{k_t}} \sin \frac{\pi i}{k_t} \sin \frac{\pi i}{2}, \quad (13)$$

где $i = 0, 1, 2, \dots$.

Выражение (13) представляет собой математическую зависимость, в которой показатель достоверности D будет зависеть от четырех переменных:

$$D = f(P_+, P_-, k_t, N_t).$$

Для анализа полученной оценки построим графики показателя достоверности D от соответствующих аргументов P_+, P_-, k_t, N_t . Для этого преобразуем выражение (13) к следующему виду:

$$D = 1 - Z \cdot \sum_{i=1}^{k_t-1} \frac{1 - L^{N_t}}{1 - L} \cdot F, \quad (14)$$

где $Z = \frac{2}{k_t} \sqrt{P_+ P_-} \cdot \left[\left(\frac{P_+}{P_-} \right)^{\frac{k_t}{4}} + \left(\frac{P_-}{P_+} \right)^{\frac{k_t}{4}} \right]$; $L = 2\sqrt{P_+ P_-} \cdot \cos \frac{\pi i}{k_t}$; $F = \sin \frac{\pi i}{k_t} \cdot \sin \frac{\pi i}{2}$.

В таблице проведены расчеты показателя достоверности D в зависимости от интервала сохранения накопленной погрешности в пределах поля допуска $\pm \Delta_{доп}$ при значениях k_t , равных соответственно 20, 10, 5, 4, 3 и вероятностях приращения «положительной» и «отрицательной» погрешности, равных 0,5.

Значения показателя достоверности D от интервала N_t

N_t	$D_1 (k_t=20)$	$D_2 (k_t=10)$	$D_3 (k_t=5)$	$D_4 (k_t=4)$	$D_5 (k_t=3)$
0,0	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
10,0	1,00	0,78	0,21	0,03	0,00
20,0	0,95	0,47	0,08	0,00	0,00
30,0	0,86	0,29	0,06	0,00	0,00
40,0	0,77	0,17	0,06	0,00	0,00
50,0	0,68	0,11	0,06	0,00	0,00
60,0	0,60	0,06	0,06	0,00	0,00
70,0	0,53	0,04	0,06	0,00	0,00
80,0	0,47	0,02	0,06	0,00	0,00
90,0	0,41	0,01	0,06	0,00	0,00

По полученным расчетам были построены графики, представленные на рис. 2.

Из графиков видно, что величина показателя достоверности при фиксированных значениях P_+ и P_- падает с увеличением требуемого интервала эволюции погрешности (N_t) и уменьшением величины поля допуска k_t . В то же время при фиксированных значениях k_t и N_t величина показателя достоверности зависит от соотношения вероятностей P_+ и P_- , принимая максимальное значение при их равных значениях, т. е. когда $P_+ = P_- = 0,5$. В этом случае процесс эволюции погрешности носит характер симметричного случайного процесса и падает при $P_+ \neq P_-$, т. е. при этом появляется преобладающее направление в процессе эволюции погрешности.

Оценка метрологической надежности СИ с использованием производящих функций была произведена для модели постепенных отказов с дискретным изменением погрешности во времени. Эта оценка метрологической надежности может быть обобщена и для СИ с непрерывным изменением погрешности во времени. В этом случае выражение (4) принимает вид

$$D = 1 - \int_0^{\tau_*} [U(x_0 t) + V(x_0 t)] dt, \quad (15)$$

где $U(x_0 t)$, $V(x_0 t)$ – асимптотические приближения к вероятностям $U_{x_0, h}$ и $V_{x_0, h}$.

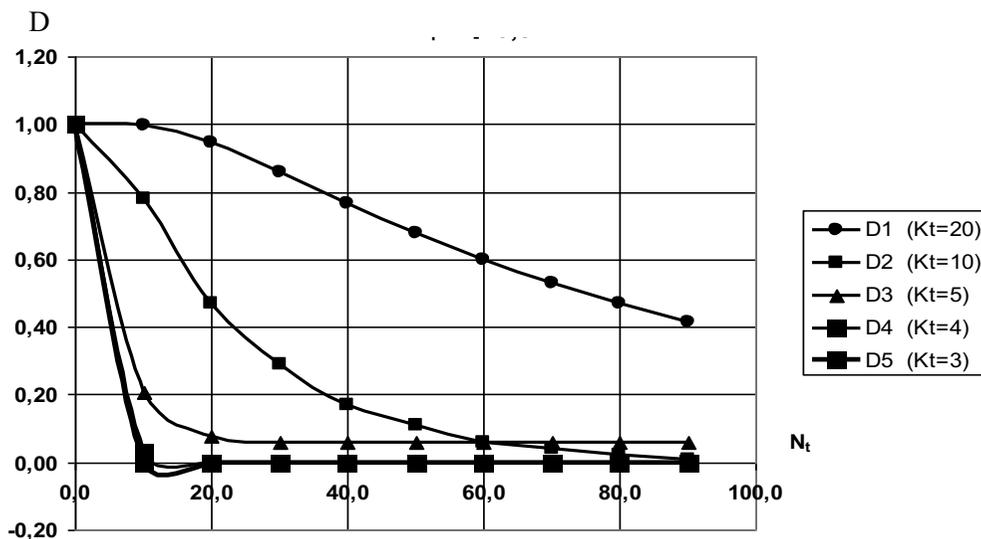


Рис. 2. Графики зависимостей $D = f(N_t)$ при $P_+ = P_- = 0,5$

Однако вопрос получения обобщенной оценки метрологической надежности для СИ с непрерывным изменением погрешности во времени выходит за рамки данной статьи.

Полученное значение показателя достоверности с использованием производящих функций можно принять в качестве оценки метрологической надежности СИ и на его основе реализовать эффективный алгоритм оценки метрологической надежности СИ средствами информационных технологий.

Данный подход актуален, как отмечалось ранее, для СИ, в которых в качестве модели эволюции погрешности представлена модель постепенных отказов с дискретным изменением погрешности во времени, которая характерна для определенного класса СИ, например для класса технических средств хронометрии. Этим и определяются ограничения по его применению.

Выводы

1. Систематизированы вопросы, связанные с оценкой надежности СИ. Оценка надежности производится по различным показателям, при этом важнейшими показателями для СИ являются показатели метрологической надежности.

2. Для СИ, имеющих модель постепенных отказов с дискретным изменением погрешности во времени, предложен в качестве основного показателя метрологической надежности СИ показатель достоверности, позволяющий с заданной вероятностью прогнозировать метрологические отказы СИ.

3. Для аналитического определения показателя достоверности используется метод производящих функций, позволяющий значительно упростить его нахождение, что в дальнейшем создаст условия для автоматизации процесса нахождения

показателя достоверности с помощью информационных технологий, в которых может быть реализован эффективный алгоритм на основе производящих функций.

4. Полученные в статье результаты могут быть распространены и на другие виды СИ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ 27.002-2015. Межгосударственный стандарт. Надежность в технике. Термины и определения. Дата введения 2017.03.01.
2. ГОСТ 8.009-84. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений.
3. Метрология, стандартизация и сертификация: учеб. пособие для студ. вузов по спец. напр. подг. «Транспортные машины и транспортно-технологические комплексы» и «Эксплуатация наземного транспорта и транспортного оборудования»; доп. УМО / А.И. Аристов [и др.]. М.: Инфра-М, 2014. 256 с. (Высшее образование) (Бакалавриат).
4. Метрология, стандартизация и сертификация в машиностроении: учебник для ср. проф. образования; рек. ФИРО / С.А. Зайцев [и др.]. 3-е изд. М.: Академия, 2012. 288 с. (Среднее проф. образование. Машиностроение).
5. Метрология, стандартизация и сертификация: учебник для вузов / А.Г. Сергеев, В.В. Терегеря. М.: Юрайт, 2011. 820 с. (Основы наук).
6. *Тихонов В.И.* Статистическая радиотехника. М.: Радио и связь, 1982. 624 с.
7. Прикладной анализ случайных процессов / под ред. С.А. Прохорова. СНЦ РАН, 2007. 582 с.
8. *Прохоров С.А.* Моделирование и анализ случайных процессов. Лабораторный практикум. СНЦ РАН, 2002. 277 с.
9. *Прохоров С.А., Графкин В.В.* Структурно-спектральный анализ случайных процессов. СНЦ РАН, 2010. 128 с.
10. *Яшин В.Н.* Методологические подходы при измерении и контроле основных метрологических характеристик технических средств хронометрии // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. 2014. Вып. 43. С. 63–72.
11. *Яшин В.Н.* Информационно-измерительные подходы для оценки технических средств хронометрии: монография. М.: ИНФРА-М, 2017. 120 с.
12. *Яшин В.Н.* Повышение помехозащищенности канала измерения метрологических характеристик технических средств хронометрии // Методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации: сб. науч. ст. Междунар. науч.-техн. конф. «Шляндинские чтения – 2016». Пенза: Изд-во ПГУ, 2016. С. 125–128.
13. *Якимов В.Н.* Цифровой комплексный статистический анализ на основе знакового представления случайных процессов // Известия Самарского научного центра РАН. 2016. Т. 18. № 7. С. 1346–1353.
14. *Якимов В.Н., Батищев В.И., Машков А.В.* Модульный подход к разработке информационно-измерительной системы цифрового оценивания спектральной плотности мощности // Методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации: сб. науч. ст. Междунар. науч.-техн. конф. «Шляндинские чтения – 2016». Пенза: Изд-во ПГУ, 2016. С. 84–86.
15. *Kolodenkova A.E., Muntyan E.R., Korobkin V.V.* Modern approaches to risk situation modeling in creation of complex technical systems // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2019. Vol. 875. Pp. 209–217.
16. *Kolodenkova A.E., Dolgiy A.I.* Diagnosing of devices of railway automatic equipment on the basis of methods of diverse data fusion // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2019. Vol. 875. Pp. 277–283.

Статья поступила в редакцию 10 марта 2020 г.

EVALUATION OF METROLOGICAL RELIABILITY OF MEASURING INSTRUMENTS BY METHOD OF GENERATING FUNCTIONS

V.N. Yashin

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

Abstract. *An article deals with problems related to the assessment of metrological reliability of measuring instruments by method of generating functions. Metrological reliability of measuring instruments is the most important characteristic that determines the accuracy and reliability of physical quantities measurements. In the suggested article, a confidence indicator is proposed as an evaluation of metrological reliability. The quantitative value of confidence indicator can be estimated by means of the method of generating functions. This is a scientific novelty of the work. Relevance of the problem of assessing the measuring instruments metrological reliability evaluation is substantiated in this paper since the current trend towards structural and functional complexity of measuring instruments may lead to decreasing of their reliability and, in particular, metrological reliability. The main goal of this work is to systematize the problems of reliability of measuring instruments and evaluate their metrological reliability using the method of generating functions. On the base of selected mathematical model of the evolution of error of measurement and proposed indicator of metrological reliability means of the method of generating functions allow to carry out metrological forecast of variability of the error of measurement depending on time. The model of gradual failures with a discrete change of the error over time, which is typical for a certain class of measuring instruments, for example, measuring time intervals, was chosen as a model for the evolution of the error of measuring instruments. The method of generating functions used for evaluating the metrological reliability of measuring instruments has made it possible to increase the efficiency of the algorithm for quantitative evaluation of metrological reliability of measuring instruments by simplifying the mathematical operations that underlie it.*

Keywords: *measuring instruments, metrological reliability, evaluation, generating functions, confidence index.*

REFERENCES

1. GOST 27.002-2015. Interstate standard reliability in engineering. Terms and definitions. Date of introduction 2017.03.01.
2. GOST 8.009-84. Normalized metrological characteristics of measuring instruments.
3. Metrology, standardization and certification: textbook for students. Higher education institutions on spec. eg. prep. "Transport machines and transport and technological complexes" and "Operation of ground transport and transport equipment"; additional UMO / A.I. Aristov [et al.]. Moscow: Infra-M, 2014. 256 p. (Higher education) (Bachelor's degree).
4. Metrology, standardization and certification in mechanical engineering: a textbook for students of professional education; REC. FIRO / S.A. Zaitsev [et al.]. 3rd ed. Moscow: Akademiya, 2012. 288 p. (Secondary vocational education. Engineering).
5. Metrology, standardization and certification: textbook for universities / A.G. Sergeev, V.V. Therehere. Moscow: Yurait, 2011. 820 p. (Fundamentals of science).
6. *Tikhonov V.I.* Statistical radio engineering. Moscow: Radio and communication, 1982. 624 p.
7. Applied analysis of random processes. Edited by Prokhorov S.A. / scientific centre of RAS, 2007. 582 p.
8. *Prokhorov S.A.* Modeling and analysis of random processes. Laboratory practice. SNC RAS, 2002. 277 p.
9. *Prokhorov S.A., Grafkin V.V.* Structural-spectral analysis of random processes. SNC RAS, 2010. 128 p.

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

10. *Yashin V.N.* Methodological approaches for measuring and control of major metrological characteristics of technical means of timekeeping // Vestnik of Samara State Technical University. Ser. Technical science. 2014. Issue 43. Pp. 63–72.
11. *Yashin V.N.* Information-measuring approaches for chronometer technical means estimation: monograph. Moscow: INFRA-M, 2017. 120 p.
12. *Yashin V.N.* Increase of noise immunity channel of measurement of metrological characteristics of technical means of chronometry. Methods, means and technologies of receiving and processing of measuring information: proceedings of International. Science-tech. Conf. "Shlyandinskie readings – 2016". Penza: publishing house of PSU, 2016. Pp. 125–128.
13. *Yakimov V.N.* Digital integrated statistical analysis based on the symbolic representation of random processes // proceedings of the Samara scientific center of RAS. 2016. Vol. 18. No. 7. Pp. 1346–1353.
14. *Yakimov V.N., Batishchev V.I., Mashkov A.V.* A modular approach to the development of information-measuring system for digital estimation of power spectral density. Methods, means and technologies of receiving and processing of measuring information: proceedings of International. Science-tech. Conf. "Shlyandinskie readings – 2016". Penza: publishing house of PSU, 2016. P. 84–86.
15. *Kolodenkova A.E., Muntyan E.R., Korobkin V.V.* Modern approaches to risk situation modeling in creation of complex technical systems // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2019. Vol. 875. Pp. 209–217.
16. *Kolodenkova A.E., Dolgiy A.I.* Diagnosing of devices of railway automatic equipment on the basis of methods of diverse data fusion // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2019. Vol. 875. Pp. 277–283.

Электротехника

УДК 621.365.511

СИСТЕМА МЕТОДИЧЕСКОГО ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗАГОТОВОК ИЗ СПЛАВОВ АЛЮМИНИЯ*

А.А. Базаров, А.И. Данилушкин, Д.А. Животягин

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

E-mail: aleksbazarov@yandex.ru

Аннотация. Рассмотрена задача разработки индукционной системы нагрева заготовок из алюминиевого сплава с заданным ограничением на допустимое отклонение температуры. Целью работы является определение параметров секций индуктора и настроек системы регулирования, обеспечивающих достижение заданного распределения заготовки перед подачей под пресс. Сложность задачи связана с наличием нескольких секций нагревателя, отличающихся по длине от заготовок, что приводит к дополнительному фактору, обуславливающему повышение неравномерности в распределении температуры в загрузке. Модель электромагнитного процесса построена с учетом изменения удельного сопротивления в заготовках. При поиске более эффективного алгоритма расчета рассмотрен вариант совместного решения тепловой и электромагнитной задач, позволяющий упростить процедуру обмена данными между приложениями. Такой подход очень удобен при решении задач, не связанных жесткими условиями с достижением конечного состояния. При моделировании тепловых процессов формулировка задачи учитывает все особенности, связанные с лучистым теплообменом между протяженными поверхностями, имеющими разную температуру, температурные зависимости параметров заготовок, изменяющуюся область тепловыделения, обусловленную перемещением. В качестве вариантов системы нагрева рассмотрено программное управление и многоканальная система с коррекцией управления по контролю температуры в одной точке. При моделировании многоканальной системы управления нагревом использованы встроенные функции программного обеспечения, позволившие сформировать управляющие воздействия для каждого канала, рекомендовать места расположения датчиков температуры, обеспечивающие качественное управление нагревом.

Ключевые слова: индукционный нагрев, сплав алюминия, управление, связанные модели, метод конечных элементов, температурное распределение.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-08-00212 А.

Базаров Александр Александрович (д.т.н., доц.), профессор кафедры «Электро-снабжение промышленных предприятий».

Данилушкин Александр Иванович (д.т.н., проф.), профессор кафедры «Электро-снабжение промышленных предприятий».

Животягин Денис Александрович, аспирант.

Введение

В современной металлургической промышленности производство изделий из сплавов алюминия осуществляется путем обработки давлением после нагрева до температуры пластической деформации. Индукционные нагреватели, используемые для этих целей, выгодно отличаются от других нагревательных установок прежде всего высокой скоростью нагрева и небольшими потерями металла на окисление. В отличие от чистого алюминия сплавы имеют особенности физических характеристик, приводящие к необходимости сужения диапазона рабочих температур, при которых металл сохраняет свои свойства и процесс деформации проходит с меньшими энергозатратами [1–3]. В условиях выпуска широкой номенклатуры продукции из разных сплавов с использованием заготовок, отличающихся по габаритам, представляет интерес задача определения конструктивных и режимных параметров индукционных нагревателей, обеспечивающих минимум энергозатрат или минимальное время нагрева [4]. При нагреве сплавов с высокими значениями электропроводности имеет место ярко выраженный краевой эффект, способный привести к значительному перегреву углов цилиндрических или прямоугольных заготовок [5]. Строгое обоснование заглубления заготовок на выходе индуктора позволяет обеспечить требуемое распределение температуры.

Расчет параметров нагревателя и режима работы системы в настоящее время возможно осуществлять с малыми погрешностями, так как математические модели позволяют учитывать нелинейности характеристик, использовать совместную постановку электромагнитных и тепловых задач. Кроме того, возросли функциональные возможности программ расчета.

Электромагнитные процессы

Для моделирования электромагнитных процессов в системе «многосекционный нагреватель – заготовки» используется линейная постановка задачи в связи с отсутствием ферромагнитных сред. Уравнения Максвелла [5], описывающие связь между основными электромагнитными величинами, такими как напряженность магнитного поля и индукция, преобразуются, чтобы выполнить переход к численному решению.

Исходная система переписывается в терминах векторного магнитного потенциала:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{1}{\mu_a} \cdot \frac{\partial r \mathbf{A}}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{1}{\mu_a} \cdot \frac{1}{r} \frac{\partial r \mathbf{A}}{\partial r} \right] - j \omega \mathbf{A} - \mathbf{J}_0 = 0, \quad (1)$$

где $\omega = 2\pi f$ – круговая частота;

μ_a – магнитная проницаемость материалов, определяемая как произведение относительной проницаемости на проницаемость вакуума $\mu_a = \mu \cdot \mu_0$;

\mathbf{A} – векторный магнитный потенциал;

\mathbf{J}_0 – плотность тока внешних источников.

В качестве граничных условий для однозначности задачи принимаются наиболее общие условия – равенство нулю векторного магнитного потенциала на границе расчетной области:

$$A_{S_1 \in S} = 0, \quad (2)$$

где S_1 – удаленная граница расчетной области.

Исходное дифференциальное уравнение в частных производных (1) с граничными условиями вида (2) для реализации численного метода расчета преобразуется в функционал, на базе которого определяются параметры для системы алгебраических уравнений. Линейный вид полученной системы может быть усложнен в случае решения задач, содержащих ферромагнитные среды. Результатом решения системы уравнений является вектор значений магнитного потенциала для каждого элемента. Дополнительные расчеты позволяют определить токи и другие переменные, такие как мощность тепловыделения, силы.

Объемная плотность внутренних источников тепла, создаваемых в проводящей неподвижной среде, определяется в соответствии с выражением

$$Q = \frac{1}{2} \operatorname{Re}(J_z \sigma^{-1} J_z^*). \quad Q = \frac{1}{2} \operatorname{Re}(J_z \sigma^{-1} J_z^*). \quad (3)$$

Здесь в скобках показано произведение плотности тока на его комплексно сопряженную величину.

Тепловые процессы

Математическая модель процессов переноса тепла в системе дискретно перемещаемых заготовок при наличии комбинированного теплообмена с футеровкой и окружающей средой в общем случае представляется системой нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных. В рассматриваемой задаче необходимо учитывать целый ряд процессов при переносе тепла между контактирующими заготовками и тепловые потоки излучения в системе «заготовки – футеровка».

Для решения тепловой задачи с учетом реальных режимов теплообмена с окружающей средой в качестве исходной модели принято нелинейное уравнение теплопроводности вида [6]

$$C\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial r} \left[\lambda r \frac{\partial T}{\partial r} \right] + Q \quad (4)$$

с начальными условиями

$$T(r, x, 0) = T_0 \quad (5)$$

и граничными условиями

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0; \quad (6)$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R} = \alpha_1 [T(R, x, t) - T_{ext}] + \varepsilon \sigma [T^4(R, x, t) - T_{wall}^4]; \quad (7)$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = -\alpha_2 [T(r, 0, t) - T_{ext}]; \quad (8)$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=X} = \alpha_3 [T(r, X, t) - T_{ext}] + \varepsilon \sigma [T^4(r, X, t) - T_{ext}^4]. \quad (9)$$

Здесь $T(r, x, t)$ – температура загрузки;
 C – удельная теплоемкость;

ρ – плотность;
 λ – теплопроводность;
 Q – плотность внутренних источников тепла;
 α_i – коэффициенты конвективного теплообмена на поверхностях заготовок и футеровки секций индукторов;
 ε – степень черноты загрузки и футеровки;
 T_{wall} – температура внутренней стенки футеровки, зависящая от продольной координаты x и от времени t ;
 T_{ext} – температура окружающей среды;
 R – радиус загрузки;
 X – длина загрузки.

Для решения тепловой задачи используется приложение программы Comsol, построенное на базе метода конечных элементов. Это приложение позволяет использовать аналитические аппроксимирующие выражения для нелинейных характеристик параметров задачи, что упрощает и ускоряет процедуру создания модели. Дополнительно имеется возможность изменять свойства и переменные на каждом шаге по времени, а также задавать сложные геометрические формы нагреваемого изделия. Определение распределения температуры в нагреваемом изделии сводится к решению уравнения теплопроводности с функцией распределения внутренних источников тепла, которая находится в результате решения электромагнитной задачи.

Переход к конечно-элементной формулировке сопровождается линеаризацией исходных уравнений для того, чтобы упростить процедуры решения. Вместо уравнений в частных производных (1) и (3) формируются системы алгебраических уравнений вида

$$[K_T]\{T\} = \{Q_T\}; \quad (10)$$

$$[K_A]\{A\} = \{Q_A\}. \quad (11)$$

Здесь $[K_T]$, $[K_A]$ – приведенные матрицы жесткости;
 $\{Q_T\}$, $\{Q_A\}$ – векторы источников для тепловой и электромагнитной задач.

Тепловая и электромагнитная задачи могут решаться одновременно, тогда имеет место связанная или мультифизическая задача. Системы уравнений (10) и (11) объединяются в одну, что дает возможность осуществлять обмен результатами расчета и формировать полноценную нелинейную задачу. Погрешность расчетов уменьшается, и отпадает необходимость обработки при обмене между приложениями, как это бывает при использовании односвязных задач.

Моделирование электромагнитных процессов в многосекционном индукционном нагревателе

Исследуемый многосекционный индукционный нагреватель содержит шесть катушек, внутри которых размещены заготовки (рис. 1). В рассматриваемом технологическом процессе при пуске нагреватель должен быть загружен заготовками. Пуск индуктора осуществляется сразу с заданным темпом выдачи заготовок. При первоначальном включении нагревателя находящиеся в нем заготовки, кроме расположенной на входе, не успевают достичь заданной температуры, поэто-

му после прохождения первого цикла нагрева они непригодны для прессования и выгружаются для охлаждения. Обычно эти заготовки (так называемые «ложные» заготовки) используются только при запуске.

В установившемся режиме через определенные интервалы времени происходит перемещение заготовок на одну позицию. Последняя заготовка выгружается из индуктора, а место первой занимает холодная с рольганга. Ввиду использования исследуемого нагревателя для нагрева различных по длине заготовок их расположение не всегда совпадает с границами секций.

Нагреваемые заготовки являются немагнитными, но тем не менее зависимость удельного сопротивления от температуры вносит искажение в распределение напряженности магнитного поля по длине индуктора. Между секциями индукционного нагревателя имеются небольшие зазоры, которые обуславливают провалы в диаграмме распределения мощности. Самые значительные искажения связаны с краевыми эффектами [5], которые способны привести к значительному перегреву части заготовки. Учитывая низкое удельное сопротивление сплава, необходим тщательный анализ распределения внутренних источников и корректировка заглубления последней заготовки. Схема расположения заготовок в нагревателе приведена на рис. 1. В нагревателе находится шесть заготовок. Здесь представлен наиболее общий вариант расположения заготовок, при котором длина заготовки не совпадает с длиной секции. Это приводит к смещению границ заготовок относительно границ секций. В этом случае заготовка находится под действием двух независимых источников энергии, что существенно усложняет расчет температурного распределения.



Рис. 1. Многосекционный индуктор с заготовками

Выполнен ряд расчетов мощности, выделяемой в заготовках, и тока в секциях для разных длин секций начиная от 1,1 м и заканчивая 0,9 м. Общая длина индуктора изменяется от 6,6 м до 5,65 м. Результаты расчетов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Значения тока индуктора и мощности в заготовках

$l_{ин}$, м	№ заг.	1	2	3	4	5	6
	σ , См/м		$20 \cdot 10^6$	$17 \cdot 10^6$	$15 \cdot 10^6$	$14 \cdot 10^6$	$12 \cdot 10^6$
6,6	P_2 , кВт	222	172	189	194	204	313
	I'_u , кА	210	210	210	210	210	210
6,35	P_2 , кВт	200	171	189	193	200	206
	I'_u , кА	194	210	210	210	210	147
6,1	P_2 , кВт	195	171	188	192	200	192

$l_u, \text{ м}$	№ заг.	1	2	3	4	5	6
	$I'_u, \text{ кА}$	192	200	200	200	200	145
5,85	$P_2, \text{ кВт}$	196	171	185	191	200	198
	$I'_u, \text{ кА}$	195	190	190	190	190	155
5,6	$P_2, \text{ кВт}$	200	172	182	188	199	197
	$I'_u, \text{ кА}$	202	180	180	180	180	161

Для варианта № 5 представлена диаграмма распределения мощности тепловыделения на поверхности загрузки (рис. 2). На краях отношение мощности к среднему значению составляет 2,5. Для других вариантов индуктора, имеющих большую длину, краевой эффект выражен ярче: отношение возрастает до 5,5. Дальнейшее уменьшение длины секций приводит снижению удельной мощности на краях и последующему недогреву, что сложнее устранить, чем перегрев.

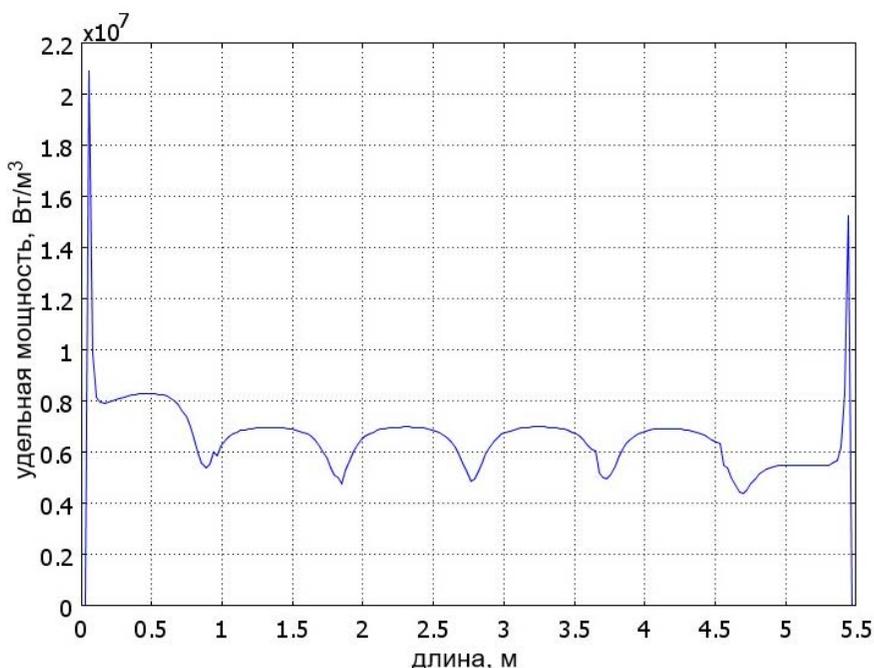


Рис. 2. Диаграмма удельной мощности тепловыделения на поверхности загрузки

Максимальные значения мощности в загрузке приняты на уровне 200 кВт, так как электрический КПД индуктора для загрузки из сплава Д16 не превышает 0,5, а преобразователь частоты имеет выходную мощность 400 кВт.

Параметры секций индукционного нагревателя длиной 5,6 м представлены в табл. 2. Число витков секции $w=16$; ширина трубки индуктора $a=64,5$ мм.

Параметры секций индуктора

N	T, °C	ρ , Ом·м	Δ , мм	P_u , кВт	P_2 , кВт	ΔP_u , кВт	U, В	$\cos \varphi$	I, кА
1	70	$5 \cdot 10^{-8}$	15,9	398	204	194	404	0,066	14,9
2	150	$6 \cdot 10^{-8}$	17,4	399	212	187	400	0,068	14,6
3	250	$7 \cdot 10^{-8}$	18,8	402	222	180	396	0,071	14,3
4	350	$8 \cdot 10^{-8}$	20,1	400	227	173	391	0,073	14
5	450	$9 \cdot 10^{-8}$	21,3	398	232	166	383	0,075	13,8
6	500	$10 \cdot 10^{-8}$	22,5	399	236	163	382	0,077	13,6

Полученные значения использованы при проведении тепловых расчетов.

Моделирование процесса индукционного нагрева заготовок с применением программного управления

Настройка системы управления температурным распределением в нагреваемых заготовках является сложной задачей. Применение различных способов управления определяется требованиями к температурному режиму и энергетическими ограничениями. При этом необходимо учитывать зависимость физических характеристик материала нагреваемой заготовки от температуры [7, 8]. Характерная для индукционного нагрева массивных заготовок неуправляемость процесса предполагает использование комплекса мер или нетрадиционных способов и систем, позволяющих обеспечить требуемое распределение температуры с допустимым отклонением. Среди таких способов можно отметить применение устройства для нагрева цилиндрических слитков, вращающихся в поле постоянных магнитов [9]. Возможность управлять глубиной проникновения тока изменением частоты вращения слитка не всегда дает преимущество перед методическим нагревом с использованием статических преобразователей частоты, позволяющим обеспечить высокую производительность с заданными показателями качества.

Использование мультифизических моделей эффективно при моделировании задач, описываемых уравнениями с плавным изменением параметров. Заготовки из алюминиевого сплава Д16 имеют гладкие зависимости удельного сопротивления, теплоемкости и коэффициента теплопроводности от температуры, поэтому при решении связанных электротепловых задач проблем не возникает. Ориентация на характеристики реальной индукционной системы, состоящей из шести индукторов длиной 1,1 м и мощностью 400 кВт, обеспечивающих нагрев заготовок диаметром 1,08 м и длиной 0,9 м, позволила сузить поле поиска параметров.

В работе рассмотрено программное управление нагревом заготовок. Регулирование мощности тепловыделения в заготовках на основе контроля температуры не предусмотрено. Для имитации перемещения заготовок через индукторы использована ступенчатая функция $H(t-t_k)$, позволяющая «включать» или «выключать» источники тепла в тепловой задаче, изменять коэффициент теплопроводности областей, моделирующих контактное сопротивление соседних загото-

вок. Например, при подобранном темпе выдачи заготовок одна за 20 минут в момент $t=1200$ с, соответствующий перемещению первой заготовки к выходу индуктора на расстояние 0,9 м и появлению на ее месте второй заготовки, происходит включение источника тепла во второй заготовке $Q=Q_{av_emqa}*(flchs(t-1200,1)-flchs(t-7200,1))$. Плотность мощности Q_{av_emqa} экспортируется из электромагнитной задачи в тепловую. Ступенчатая функция в программе Comsol представлена несколькими встроенными функциями, среди которых $flchs(t-t_k, \Delta t)$. Аргументом ступенчатой функции может выступать не только время t , но и температура T . Интервал времени Δt определяет переход от значения функции, равного нулю, к единице.

При моделировании предусмотрена имитация выталкивания заготовок из индуктора. При этом происходит отключение нагрева. Кроме того, тепловой контакт, возникающий при соприкосновении заготовок и характеризующийся увеличением коэффициента теплопроводности $k=flchs(t-1200,10)*5+0.001$, для «выталкиваемой» заготовки может быть устранен с помощью добавления слагаемой с отрицательным знаком для времени выталкивания ($t=7200$ с).

В результате при периоде выдачи заготовок, равном 20 минут, получены диаграммы температуры по длине всей загрузки (6 заготовок), которые представлены на рис. 3. Токи в одновитковых индукторах: в первом 200 кА, во втором – пятом 180 кА, в шестом 161 кА. Токи подобраны для обеспечения одинаковой мощности во всех заготовках. Мощность тепловыделения в заготовках имеет значения от 172 до 200 кВт.

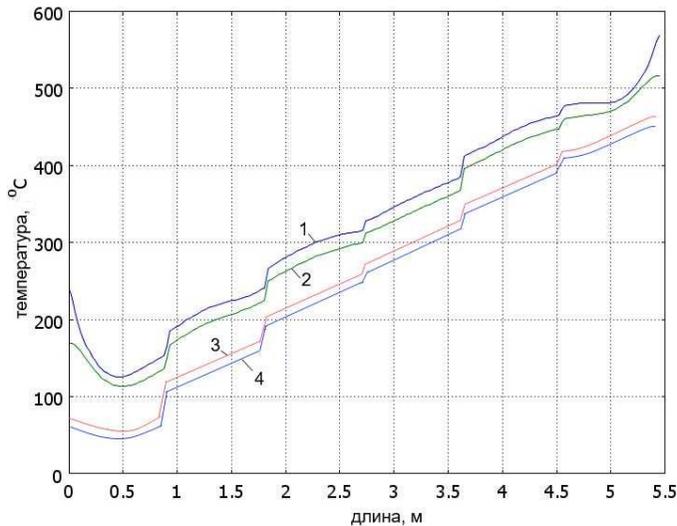


Рис. 3. Диаграммы температур в загрузке при программном управлении нагревом:
 1 – на поверхности при $t=7200$ с; 2 – на поверхности при $t=7300$ с;
 3 – на осевой линии при $t=7300$ с; 4 – на осевой линии при $t=7200$ с

Как следует из результатов расчета, при программном управлении распределением мощности между секциями нагревателя температурное распределение по радиусу слитка на выходе из нагревателя не удовлетворяет требуемому по технологии распределению.

Различие между распределениями в момент окончания нагрева ($t=7200$ с) и в момент подачи к прессу (с учетом транспортировки общее время $t=7300$ с) незначительно, перепады температур по длине и радиусу слитка и температура поверхности превышают допустимые значения. Таким образом, использование программного управления в процессе выхода на установившийся режим нагрева с учетом энергетических и технологических ограничений на процесс нагрева не обеспечивает необходимые для технологии прессования температурные распределения в слитке.

Моделирование процесса индукционного нагрева заготовок с коррекцией управления по результатам контроля температуры

При расчете алгоритма управления с коррекцией управления на основе анализа температурного распределения возможны варианты управления по контролю температуры в одной точке с синхронным регулированием мощности во всех секциях [10]. Этот способ больше характерен для систем непрерывного нагрева. Для многосекционных нагревателей синтез управления с коррекцией по температурному распределению требует более серьезного математического аппарата [11–13]. Для математических моделей процесса нагрева, построенных с помощью численных методов, поисковая процедура определения вектора параметров сложна. Одной из искомым переменных является вектор сигналов задания (уставок) для многоканальной системы управления [15].

В рассматриваемом случае не допускается перегревать сплав выше 510 градусов. В то же время температура нагретой заготовки перед прессованием, равная пятистам градусам, не должна отклоняться более чем на 10 градусов как по радиусу, так и по длине заготовки.

В отличие от алгоритмов программного управления использование мультифизических моделей при поиске управления с коррекцией по температуре в точке контроля затруднено. В расчетной модели приходится разбивать поверхностный слой заготовок на подобласти, расположенные под секциями нагревателя.

Моделирование процесса перемещения заготовок внутри нагревателя осуществляется аналогично тому, как это выполнено при поиске программного управления. Для регулирования температуры путем изменения мощности каждого индуктора и, соответственно, мощности тепловыделения в областях заготовок, находящихся в зоне действия индуктора, выбираются точки, в которых температура контролируется непрерывно. На каждом шаге по времени производится расчет мощности согласно выражению

$$Q=Q_{max}*(f_{lc1hs}(t-1200,1)-f_{lc1hs}(t-7200,1))*(1-f_{lc1hs}(u1-Tz1, \Delta T)).$$

Здесь Q_{max} – максимальное значение удельной мощности в рассматриваемой подобласти;

$u1$ – имя переменной, присвоенное для выбранной точки;

$Tz1$ – величина уставки для рассматриваемого канала управления (диапазон температур задания в задаче составляет 373–773 K);

ΔT – перепад температур, при котором происходит переход с одного уровня функции на другой.

Моделирование процесса нагрева в нагревателе одновременно с системой регулирования выполнено для режима пуска нагревателя. С учетом возможностей преобразователей частоты, используемых в качестве источников питания, загрузка заготовок осуществляется поочередно начиная с первой секции. Для

предотвращения перегрева на торце со стороны выхода предусматривается при каждом перемещении точное позиционирование. С целью обеспечения нужного краевого эффекта заготовка останавливается на расстоянии 0,1 м от выхода из каждой секции. На время пуска нагревателя должна быть задействована система контроля позиционирования с изменяющимися параметрами при добавлении каждой новой заготовки. По окончании режима пуска заглубление заготовок остается неизменным.

Расчет значений уставок для каждой секции произведен на основании многократного повторения вычислительной процедуры. Исходное соотношение уставок температур для каналов регулирования принято равномерно возрастающим от 100 до 500 градусов. Исследование диаграмм температуры во всей загрузке и в заготовке на выходе из индуктора показывает, каково отклонение от заданного распределения. Последовательное увеличение уровня уставок до предельного значения 500 градусов во всех каналах не дало преимуществ в достижении заданного распределения. Сравнение временных диаграмм изменения удельной мощности всех каналов регулирования для варианта с максимальными уставками (рис. 4) и варианта с плавно возрастающими уставками (рис. 5) показало, что в первом случае первые четыре индуктора работают на полную мощность часть времени, а потом переходят в режим стабилизации температуры поверхности, а оставшиеся два служат для выравнивания температуры и потребляют меньшую мощность. Такой режим не оставляет резерва системе регулирования в случае внешних возмущений, например кратковременных остановов процесса нагрева.

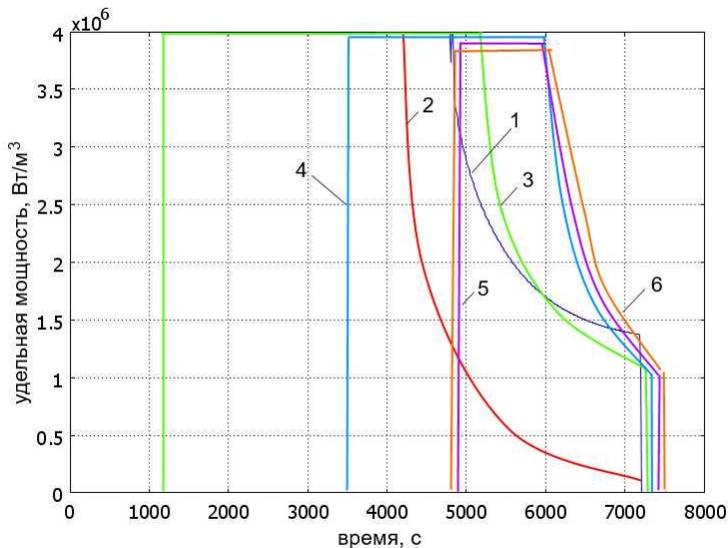


Рис. 4. Временные диаграммы мощности тепловыделения каналов регулирования

В итоговом варианте уставок системы регулирования участок плавного регулирования характерен только для двух индукторов на выходе. В первых четырех каналах управление ближе к релейному. На характер распределения температуры оказывает влияние взаимное расположение заготовок и секций индуктора, отличающихся по длине. Одна заготовка может находиться одновременно в двух секциях, что при периодических перемещениях вносит искажения в работу системы регулирования.

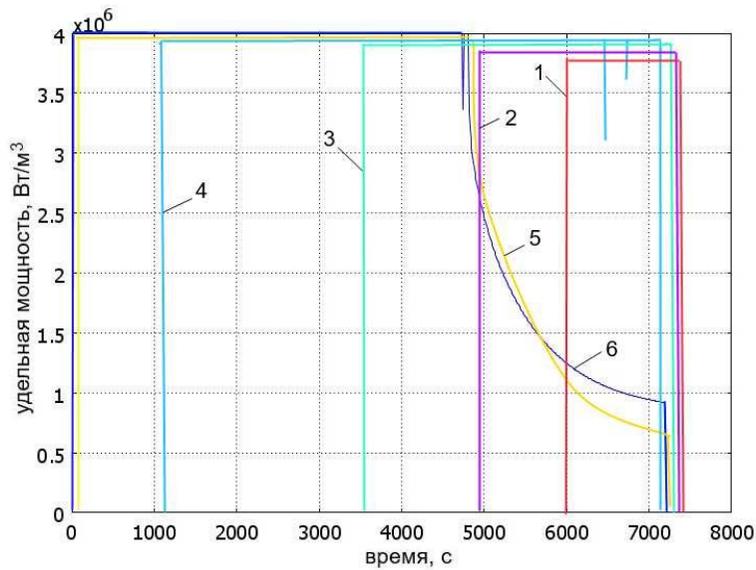


Рис. 5. Временные диаграммы мощности тепловыделения каналов регулирования для итогового варианта параметров

Плавное нарастание теплосодержания в заготовках достигнуто на основании анализа распределений температуры и коррекции графика мощности во всех каналах. Итоговое распределение температуры в заготовках получено при общем времени нагрева $t=7200$ с и уставках регуляторов температуры: $Tz1=373$ К, $Tz2=473$ К, $Tz3=573$ К, $Tz4=673$ К, $Tz5=763$ К, $Tz6=773$ К. График температурного распределения представлен на рис. 6.

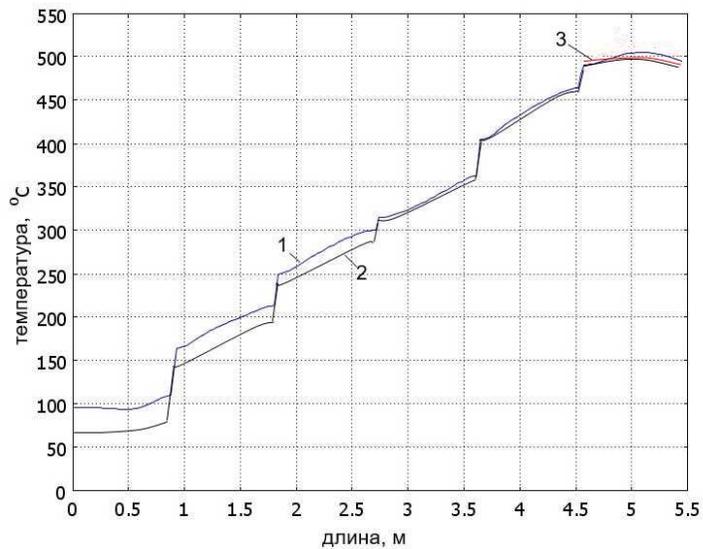


Рис. 6. Диаграммы температур в загрузке при автоматическом управлении нагревом:

1, 2 – на поверхности и на осевой линии в момент времени 7200 с;
3 – на поверхности в момент времени 7300 с

Как видно из диаграмм, рассмотренный в работе подход позволяет для выходной заготовки обеспечить требуемое распределение температуры с допустимым отклонением от заданного значения. Для рассмотренной конструкции многосекционного нагревателя и заготовок из алюминиевого сплава в условиях ограничения на предельное значение температуры заданное температурное распределение достигается только с учетом интервала охлаждения при транспортировке заготовок к прессу.

Заключение

На основании проведенных исследований электромагнитных и тепловых процессов в системе индукционного нагрева методического действия определен алгоритм поиска параметров нагревателей в условиях строгих ограничений на отклонения температуры от заданных значений. Применение численных моделей расчета тепловых процессов, учитывающих взаимный лучистый теплообмен в системе «загрузка – футеровка» каждой секции нагревателя, в сочетании с применением итерационной процедуры расчета управления с коррекцией по температуре в точке контроля позволило получить минимальную погрешность расчета и обеспечить достижение заданного температурного распределения с допустимыми отклонениями. Параметры нагревателя, найденные при анализе вариантов, позволяют минимизировать общее время нагрева.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Немков В.С., Демидович В.Б., Растворова И.И., Ситько П.А. Индукционный нагрев алюминиевых заготовок: Состояние и перспективы // *Электromеталлургия*. 2013. № 2. С. 12–19.
2. Демидович В.Б., Растворова И.И., Чмиленко Ф.В., Григорьев Е.А., Немков В.С. Энергоэффективные индукционные нагреватели слитков из легких сплавов // *Известия Российской академии наук. Энергетика*. 2013. № 5. С. 11–22.
3. Зимин Л.С., Егиазарян А.С. Особенности индукционного нагрева под деформацию // *Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки*. 2015. № 3 (47). С. 128–135.
4. Данилушкин А.И., Данилушкин В.А., Животягин Д.А. Параметрический анализ и оптимальное проектирование индукционной системы по критерию максимального коэффициента полезного действия // *Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки*. 2018. № 3. С. 143–153.
5. Немков В.С., Демидович В.Б. Теория и расчет установок индукционного нагрева. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1988. 280 с.
6. Лыков А.В. Теплообмен. М.: Энергия, 1971. 560 с.
7. Турбин В.В. Численное моделирование процесса проходного индукционного нагрева металла перед пластической деформацией // *Новая наука: Проблемы и перспективы*. 2017. № 1–2. С. 178–180.
8. Уманский А.А., Протопопов Е.В., Темлянецов М.В., Базайкин В.И., Никитин А.Г. Численное моделирование теплового состояния крупнотоннажных слитков в процессе кристаллизации и нагрева // *Заготовительные производства в машиностроении*. 2017. Т. 15. № 7. С. 325–330.
9. Власов Д.С., Алиферов А.И., Бикеев Р.А., Морев А.Э., Промзелев В.А. Нагрев алюминиевых слитков полем вращающихся постоянных магнитов // *Цветные металлы и минералы – 2016: сборник тезисов докладов Восьмого международного конгресса*. 2016. С. 220–221.
10. Демидович В.Б., Перевалов Ю.Ю., Чмиленко Ф.В., Михлюк А.И. Одноточечная система управления температурой в непрерывных нагревателях // *Всероссийская научная конференция по проблемам управления в технических системах*. 2017. № 1. С. 78–81.
11. Pleshivtseva Y., Rapoport E., Nacke B., Nikanorov A., Barba P.D., Forzan M., Sieni E., Lupi S. Design concepts of induction mass heating technology based on multiple criteria optimization // *The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*. 2017. Т. 36. № 2. С. 386–400.

12. *Плешивцева Ю.Э., Афиногентов А.А.* Оптимизация процесса изотермического прессования слитков из алюминиевых сплавов с предварительным градиентным нагревом // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. 2016. № 2. С. 49–57.
13. *Попов А.В., Дьяконов А.И.* Оптимальное по быстродействию управление процессом периодического индукционного нагрева с учетом ограничения на максимальную температуру // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2015. № 3 (47). С. 56–68.
14. *Парсункин Б.Н., Бондарева А.Р., Полухина Е.И.* Выбор температурного параметра для оперативного управления нагревом металла в методических печах // Автоматизированные технологии и производства. 2015. № 1 (7). С. 9–12.
15. *Парсункин Б.Н., Андреев С.М., Ахметов Т.У., Ахметова А.У., Жадинский Д.Ю.* Определение заданий зонным регуляторам температуры при реализации энергосберегающего управления нагревом металла // Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах. 2015. № 1 (6). С. 16–19.

Статья поступила в редакцию 12 марта 2020 года

INDUCTION HEATING SYSTEM ALUMINUM ALLOY CYLINDRICAL BILLETS

A.A. Bazarov, A.I. Danilushkin, D.A. Zhivotyagin

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

Abstract. *This publication discusses the task of developing an induction heating system for billets made of aluminum alloy with a given limit on the permissible temperature deviation. The purpose of the work is to determine the parameters of the inductor sections and the settings of the control system to achieve a given distribution of the billet before being fed under the press. The complexity of the problem is associated with the presence of several heater sections that differ in length from the workpieces, which leads to an additional factor leading to an increase in the unevenness in the distribution of temperature in the load. The model of the electromagnetic process is built taking into account the change in resistivity in the workpieces. When searching for a more efficient calculation algorithm, a joint solution to the thermal and electromagnetic problems is considered, which allows to simplify the procedure for exchanging data between applications. This approach is very convenient for solving problems that are not connected with harsh conditions with the achievement of the final state. When modeling thermal processes, the formulation of the problem takes into account all the features associated with radiant heat transfer between extended surfaces having different temperatures, temperature dependences of the workpiece parameters, a varying heat release region due to displacement. As options for a heating system, software control and a multichannel system with control correction for temperature control at one point are considered. When simulating a multi-channel heating control system, built-in software functions were used that made it possible to form control actions for each channel and recommend the location of temperature sensors providing high-quality control of heating.*

Keywords: *induction heating, aluminum alloy, control, coupled models, finite element method, temperature distribution.*

*Aleksander A. Bazarov (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Aleksander I. Danilushkin (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Denis A. Zhivotyagin, Postgraduate Student.*

REFERENCES

1. *Nemkov V.S., Demidovich V.B., Rastvorova I.I., Sitko P.A.* Induktsionny nagrev aluminiyevykh zagotovok: Sostoyanie I perspektivy. *Elektrometallurgiya*. 2013. № 2. S. 12–19.
2. *Demidovich V.B., Rastvorova I.I., Chmilenko F.V., Grigoriev E.A., Nemkov V.S.* Energoeffektivnye induktsionnye nagrevateli slitkov iz legkikh splavov. *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Energetika*. 2013. № 5. S. 11–22.
3. *Zimin L.S., Egiazaryan A.S.* Osobennosti induktsionnogo nagreva pod deformatsiyu. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki*. 2015. № 3 (47). S. 128–135.
4. *Danilushkin A.I., Danilushkin V.A., Zhivotyagin D.A.* Parametricheskii analiz I optimalnoe proektirovanie induktsionnoy sistemy po kriteriyu maksimalnogo koeffitsienta poleznogo deystviya. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki*. 2018. № 3. S. 143–153.
5. *Nemkov V.S., Demidovich V.B.* Teoriya i raschet ustanovok induktsionnogo nagreva. L.: Energoatomizdat. Leningradskoe otdelenie, 1988. 280 p.
6. *Lykov A.V.* *Teplomassoobmen*. M.: Energiya, 1971. 560 s.
7. *Turbin V.V.* Chislennoe modelirovanie protsessa prokhnodnogo induktsionnogo nagreva metalla pered plastichrskoy deformatsiyey. *Novyanauka: Problemy I perspektivy*, 2017. № 1–2. S. 178–180.
8. *Umanskiy A.A., Protopopov E.V., Temlyantsev M.V., Bazaykin V.I., Nikitin A.G.* Chislennoe modelirovanie teplovogo sostoyaniya krupnogabaritnykh slitkov v protsesse kristallizatsii i nagreva. *Zagotovitelnye proizvodstva v mashinostroenii*. 2017. T. 15. № 7. S. 325–330.
9. *Vlasov D.S., Aliferov A.I., Bikeev R.A., Morev A.E., Promzelev V.A.* Nagrev aluminiyevykh slitkov poley vrashayushchikhnya magnetov. *Tsvetnometally i mineral – 2016. Sbornik tezisov dokladov Vosmogo mezhdunarodnogo kongressa*. 2016. S. 220–221.
10. *Demidovich V.B., Perevalov Yu.Yu., Chmilenko F.V., Mikhluk A.I.* Odnotochehnaya Sistema upravleniya temperaturoy v nepreryvnykh nagrevatelyakh. *Vserossiyskaya nauchnaya konferentsiya po problemam upravleniya v tekhnicheskikh sistemakh*. 2017. № 1. S. 78–81.
11. *Pleshivtseva Y., Rapoport E., Nacke B., Nikanorov A., Barba P.D., Forzan M., Sieni E., Lupi S.* Design concepts of induction mass heating technology based on multiple criteria optimization. *The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*. 2017. T. 36. № 2. S. 386–400.
12. *Pleshivtseva Yu.E., Afinogentov A.A.* Optimizatsiya protsessu izotermicheskogo pressovaniya slitkov iz aluminiyevykh splavov s predvaritelnyim gradientnym nagrevom. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Tsvetnaya metallurgiya*. 2016. № 2. S. 49–57.
13. *Popov A.V., Diyakonov A.I.* Optimalnoe po bystrodeystviyu upravlenie protsessom periodicheskogo induktsionnogo nagreva s uchetom ogranicheniya na maksimalnuyu temperature. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki*. 2015. № 3 (47). S. 56–68.
14. *Parsunkin B.N., Bondareva A.R., Polukhina E.I.* Vybory temperaturnogo parametra dlya operativnogo upravleniya nagrevom metalla v metodicheskikh pechakh. *Avtomatizirivannyye tekhnologii i proizvodstva*. 2015. № 1 (7). S. 9–12.
15. *Parsunkin B.N., Andreev S.M., Akhmetov T.U., Akhmetova A.U., Zhadinskiy D.Yu.* Opredelenie zadaniy zonnym regulyatoram temperature pri realizatsii energosberegayushchego upravleniya nagrevom metalla. *Matematicheskoe i programnoe obespechenie system v promyshlennoy i sotsialnoy sferakh*. 2015. № 1 (6). S. 16–19.

УДК 621.313.17

К ВОПРОСУ О ПОВРЕЖДАЕМОСТИ, ОБСЛУЖИВАНИИ И РЕМОНТАХ ПОГРУЖНОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ НЕФТЕДОБЫЧИ

В.С. Романов¹, В.Г. Гольдштейн²

¹Тольяттинский государственный университет
Россия, 445020, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14

²Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Аннотация. В оптимизации и управлении жизненными циклами погружного электрооборудования (ПЭО) нефтедобычи целесообразен комплексный подход к организации технического обслуживания и ремонтов (ТОиР) на основе разработки более совершенной стратегии проведения ремонтных циклов. Констатируется, что принятые в отрасли нефтедобычи стратегии проведения ТОиР не обеспечивают в полной мере эффективность эксплуатации, что приводит к росту преждевременных отказов оборудования, сокращению межремонтных периодов и, как следствие, убыткам нефтедобывающих компаний. Оцениваются достоинства и недостатки подходов по организации эксплуатации ПЭО по наработке и фактическому состоянию при планировании, реализации ТОиР, а также целесообразность их комплексного применения. Предлагается использование статистических моделей для принятия аргументированного решения по определению состава и периода проведения ТОиР, прогноза граничных состояний множеств в целом и конкретных электроустановок ПЭО. При заданном времени наработки возможно определить основные закономерности появления дефектов и наработку на отказ элементов, а также в целом парка оборудования нефтедобывающих предприятий. Полученные результаты являются обоснованием комплекса рекомендаций по повышению эффективности эксплуатации и оптимизации управления жизненными циклами ПЭО нефтедобычи.

Ключевые слова: погружные электродвигатели, нефтедобыча, погружное электрооборудование, эффективность эксплуатации, управление жизненным циклом, статистика отказов, наработка на отказ, ресурс оборудования, ремонтный цикл.

Существующие технико-экономические аспекты корректной работы предприятий нефтедобычи (ПН) основаны на выполнении повышенных требований к снижению производственных затрат на добычу нефти, что обеспечивает высокую эффективность ПЭО нефтедобычи, минимизацию рисков отказов и технологических нарушений [1]. В организации высокоэффективной эксплуатации и управлении жизненными циклами (ЖЦ) электрооборудования ПН необходим комплексный подход к решению актуальных научных, технических, экономических и организационных задач [2].

Романов Владимир Сергеевич (к.т.н.), доцент кафедры «Электроснабжение и электротехника».

Гольдштейн Валерий Геннадьевич (д.т.н., проф.), профессор кафедры «Автоматизированные электроэнергетические системы».

Одним из приоритетных направлений повышения эффективности работы электрооборудования является полномасштабный анализ условий его эксплуатации. В значительной мере это необходимо для электрооборудования добывающих скважин, а именно – электропогружных установок (ЭПУ) с погружными электродвигателями (ПЭД).

На основании известных исследований [1, 3, 4, 7, 8] и работ авторов [5, 10] очевидно, что в нефтяной отрасли России растет доля электрооборудования с характерными признаками морального и физического износа, выработавшего свой ресурс. Для оборудования электротехнических комплексов добывающих скважин (ЭКДС) эти показатели в среднем составляют $\approx 2\div 5\%$ в год от общего состава электрооборудования ПН [1, 7]. Обеспечение работоспособности оборудования, частично или полностью исчерпавшего запасы стойкости, заложенные при проектировании и изготовлении, требует все более возрастающих материальных вложений.

Принятые в отрасли нефтедобычи системы технического обслуживания и ремонтов – планово-предупредительного ремонта (ППР) и ремонта по текущему техническому состоянию (РТС) – не могут в полной мере гарантировать поддержание и восстановление свойств, характеристик оборудования ЭКДС. Происходит непрерывное снижение величины наработки на отказ как нового оборудования, так и эксплуатируемого длительное время [8]. Описанные обстоятельства требуют от собственников (ПН) все более возрастающих финансовых возможностей для организации ремонтных циклов. В сложившихся условиях эксплуатации ЭКДС доля удельных затрат на ремонты в нефтяной отрасли почти в два раза превышает аналогичный показатель в смежных отраслях топливно-энергетического комплекса (ТЭК) [3–5].

Каждая из названных стратегий ремонтов базируется на ключевых принципах универсальности и применимости к обширному составу оборудования ТЭК, в частности ЭКДС ПН. Для системы ППР характерно проведение ремонтных и профилактических работ на основании жестких сроков и рекомендаций, установленных отраслевыми стандартами и инструктивными документами для конкретного типа электрооборудования, а также фазы его жизненного цикла [8–10]. При этом определение фактического состояния оборудования ЭКДС ПН производится по формальным признакам непосредственно во время проведения текущих (ТР), капитальных (КР) ремонтов и технического обслуживания (ТО).

Рассмотренная стратегия ремонтов имеет ряд недостатков, в первую очередь связанных с существенными неоправданными техническими затратами и неиспользованием ресурса оборудования. Можно утверждать, что в структуре ППР, в частности для ЭКДС ПН, не учитываются индивидуальные особенности эксплуатации и ведения режима работы скважины, а также эксплуатационные физические воздействия (ЭФВ), являющиеся основной причиной износа и сокращения ресурса оборудования [4, 10].

Помимо этого даже при качественном выполнении ТОиР (проведении спускоподъемных операций, сборке-разборке оборудования с заменой наиболее изношенных элементов и др.) не удастся полностью гарантировать отсутствие новых дефектов и отказов в межремонтном периоде (МРП) вследствие нарушения взаимной совместимости новых и эксплуатируемых деталей [2, 11, 14].

Более современной, но также несовершенной является система ремонтов РТС, позволяющая повысить эффективность эксплуатации ЭКДС ПН за счет организации ТОиР на основании графика, времени ремонта и данных о текущем

состоянии элементов ЭКДС, то есть с учетом рационального использования технического ресурса. Однако и в данном случае имеет место недоиспользование заложенного ресурса оборудования, так как в период ТОиР целесообразно расширить объем работ для элементов ЭКДС, имеющих повышенный износ [13–16]. Для этого необходимо обеспечить качественную и достоверную информацию о фактическом текущем состоянии конструктивных элементов ЭКДС, ключевым образом влияющих на работоспособность комплекса, по имеющемуся составу диагностических параметров (ДП) [7–10, 13].

На основе анализа текущих ДП и их сравнения с граничными значениями принимается аргументированное решение по дальнейшему режиму эксплуатации оборудования и включению его в план ТОиР. Несомненно, особое внимание при этом обращено на аварийные и предаварийные режимы работы оборудования ЭКДС, поскольку это позволяет в динамике контролировать развитие дефектов, приводящих к аварийным отказам, выявить неблагоприятные режимы работы оборудования, составить информационную базу данных по аварийности, произвести прогнозирование для уменьшения аварийного ущерба [5, 8, 14].

В руководящем документе «Энергетическая стратегия России на период до 2030 года» [Распоряжение Правительства РФ от 13.11.2009 № 1715-р] формулируется необходимость комплексной разработки и реализации методов, средств, направленных на качественное совершенствование эксплуатации систем электроснабжения и, в частности системы электрооборудования ПЭО ПН [14–16].

Названные принципы разработки высокоэффективных инновационных подходов к организации эксплуатации ЭКДС ПН заключаются прежде всего в построении совершенно новой системы ТОиР, которая исключает все недостатки, присущие «традиционным» стратегиям организации ремонтных циклов, принятых в отрасли. Отметим, что стратегии ППР и РТС имеют ряд общих позиций, поэтому их комплексное объединение предполагает создание высокоэффективной системы организации ремонтов, позволяющей обеспечить увеличение времени МРП, сокращение эксплуатационных затрат на ТОиР и принятие обоснованных, аргументированных решений по определению сроков, составу ТОиР и в целом эксплуатации всех элементов ЭКДС [2, 8, 11].

Объединение стратегий ТОиР по наработке и по текущему состоянию начинается с предварительного анализа, в котором исходно выявляются превышения предельных значений показателей ДП. Кроме этого производится оценка технического состояния всех элементов ЭКДС и отбор тех из них, которые имеют высокие показатели наработки, плохую аварийную и предаварийную историю, существенные недостатки, зафиксированные предшествующими ТОиР или связанные с другими ключевыми факторами потенциальной опасности.

Решение о включении конкретного оборудования в план ТОиР принимается на основании метода экспертных оценок [11]. Важным моментом при принятии решения служит статистическая информация о технологических нарушениях, сформированная на основании базы данных об аварийных отказах в период нормальной эксплуатации ЭКДС. Это необходимо для оптимизации управления эксплуатацией и жизненными циклами в кластерах ЭКДС ПН [16]. В данной работе приводятся результаты исследований по вероятностно-статистическому моделированию наработки на отказ основного узла ЭКДС – ПЭД. Отметим, что полная методология, необходимая для принятия обоснованного решения по включению оборудования ЭКДС ПН в состав ТОиР, представлена в исследованиях [5, 10, 15, 16].

Важнейшей характеристикой ЖЦ ПЭО ПН в формировании и построении ТОиР является ресурс электрооборудования во временном или параметрическом определении. По существу, он дает количественную оценку способности ЭКДС противостоять разнообразным внешним и внутренним ЭФВ. Данное противостояние возможно как за счет естественных свойств и характеристик самого объекта по заложенным запасам внутренней стойкости, так и в результате применения необходимого и достаточного набора специализированных систем защиты. Отметим, что здесь в равной степени следует учитывать ЭФВ как внешнего происхождения, направленные непосредственно на объект, так и внутреннего происхождения, возникающие в самом объекте.

Повышение величины ресурса ПЭО предопределяет значительную экономию инвестиционных средств, материальной и ресурсной базы за счет снижения плановых затрат на ремонтно-восстановительные работы и пополнение парка оборудования ЭКДС. При этом необходимо решение проблемы прогнозирования индивидуального ресурса ПЭО ПН. Его основа – оценка текущего технического состояния оборудования ЭКДС современными средствами «щадающей» диагностики и наблюдений в процессе эксплуатации.

Ресурс технических объектов относится не только к техническим, но и к экономическим показателям оценки текущего состояния. Современные темпы научно-технического прогресса в науке и технике предопределяют временные периоды естественной смены автоматизированного оборудования, электрических машин и аппаратов в среднем в 10 лет. Для основного оборудования ТЭК, особенно в нефтедобыче, вычислительной и управляющей технике, указанные периоды инвестиционно-инновационного обновления сокращаются в несколько раз. Именно поэтому показатель фактического ресурса установки должен соответствовать ее установленному сроку службы.

На практике фактический ресурс оборудования предприятий ТЭК оказывается значительно меньше нормативного и не достигает значений, оптимальных с экономической точки зрения. Установки ПЭО ПН являются наиболее ярким примером указанного несоответствия. Низкий уровень надежности, проектирования, изготовления, монтажа, технического обслуживания в сочетании с экстремальным воздействием ЭФВ, особенно в неблагоприятных климатических условиях регионов Сибири, Якутии и Дальнего Востока, приводит к снижению ресурса оборудования, вплоть до критических значений.

Современные научно-технические разработки и решения позволяют в значительной степени увеличить величину фактического ресурса ПЭО ПН, вплоть до значений, близких к пределу естественного и морального износа установок. Погружное электрооборудование ПН как сложная техническая система требует применения комплекса мер по повышению ресурса, в том числе индивидуально к каждому узлу: в одних случаях достаточно использования компетентного подхода к расчету и проектированию, в других нужна коррекция организации ТОиР и режимов эксплуатации, применение вновь созданных материалов, новых конструктивных решений и т. д.

Увеличение величины ресурса оборудования служит одним из источников повышения энергетической, экономической и экологической эффективности функционирования ПЭО ПН за счет оптимизации использования материальных, трудовых и эксплуатационных затрат. Так, согласно исследованиям Б.И. Кудрина [6] увеличение величины ресурса ПЭО ПН, а именно ПЭД, в среднем на 10 % эквивалентно такой же экономии инвестиций по производству но-

вых погружных электродвигателей или вводу новых мощностей. Одним из основных факторов, влияющих на величину ресурса, являются действующие на ПЭО и элементы конструкции нагрузки.

Как отмечалось ранее, использование компетентного подхода к расчету и проектированию, применение инновационных материалов – главные источники достижения стабильно высоких показателей величины ресурса ПЭО ПН, не требующие значительных материальных затрат. Поэтому разработку методов прогнозирования ресурсов следует рассматривать как основной и высокоэффективный подход, являющийся главным инструментом повышения эффективности эксплуатации за счет установления зависимости величины ресурса ПЭО ПН от внешних и внутренних факторов.

Особый практический интерес представляет прогнозирование индивидуального ресурса ПЭО на стадии эксплуатации, поскольку исследованию подлежит действующее оборудование и конкретные режимы работы. Решение общей проблемы ресурса действующего парка оборудования открывает для ПН дополнительные экономические возможности для повышения рентабельности производства. Ввиду большого разброса естественных характеристик и нагрузочных режимов скважинного оборудования величина индивидуального ресурса также будет варьироваться в широких пределах. Так, например, относительное стандартное отклонение (или коэффициент вариации C_v) величины ресурса ПЭО ПН, в особенности ПЭД, находится в диапазоне значений $0,25 \leq C_v \leq 0,35$ [1, 2].

Прогнозирование величины индивидуального ресурса оборудования позволяет более корректно планировать режимы работы, периоды ТОиР, подготовить ресурсную базу для обслуживания и ремонта, а также предупредить возможные технологические нарушения и критические состояния. Индивидуальное прогнозирование приводит к увеличению среднего ресурса ПЭО, предупреждает преждевременный останов работоспособного оборудования для профилактического восстановления или ремонта и позволяет обоснованно определить оптимальный период эксплуатации. В некоторых случаях возможно аргументированное продление рентабельной эксплуатации скважинного оборудования при условии снижения нагрузок и коррекции режима работы. Поэтому процесс прогнозирования индивидуального ресурса ПЭО ПН можно рассматривать как систему управления эксплуатацией и ТОиР [7, 10].

Анализ эффективности эксплуатации ЭКДС ПН основывается на вероятностных статистических описаниях и распределениях, построении математических моделей (ММ) надежности [12]. Эффективность эксплуатации оборудования как комплексный показатель технических и технологических характеристик характеризуют следующие показатели: поток отказов систем длительного использования (или повреждаемость оборудования), наработка на отказ (или время непрерывной работы), длительность перерыва в работе, ущерб от потери питания и т. д. [9]. Поток отказов определяется выходом из строя основных составляющих ЭКДС вследствие нарушения правил эксплуатации, некачественного и несвоевременного ТОиР, ошибочных действий обслуживающего персонала, опасных ЭФВ внутреннего и внешнего происхождения.

Для детального изучения предмета исследований данной статьи необходима его краткая характеристика. В состав ПЭО ЭКДС входят функционально взаимосвязанные наземные и подземные элементы системы электроснабжения, а именно: комплектная трансформаторная подстанция (КТП) с понижающим трансформатором 6/0,4 кВ, коммутационные аппараты, защита от перенапряже-

ний, станция управления, повышающий трансформатор $0,4/U_{\text{раб}}$ кВ; элементы ЭПУ–ПЭД, гидрозащита, электроцентробежный насос (ЭЦН), погружная кабельная линия (ПКЛ), насосно-компрессорные трубы (НКТ) и пр. [7, 12, 15, 16].

Состав оборудования ЭКДС разнообразен по свойствам, характеристикам и функциональному назначению, поэтому целесообразно дать оценку надежности узлов ЭКДС для формализации определения их работоспособности [13]. Для этого создана информационная база, в которой были собраны и проанализированы акты расследования причин аварий за 2014÷2019 гг. на ПН Поволжья.

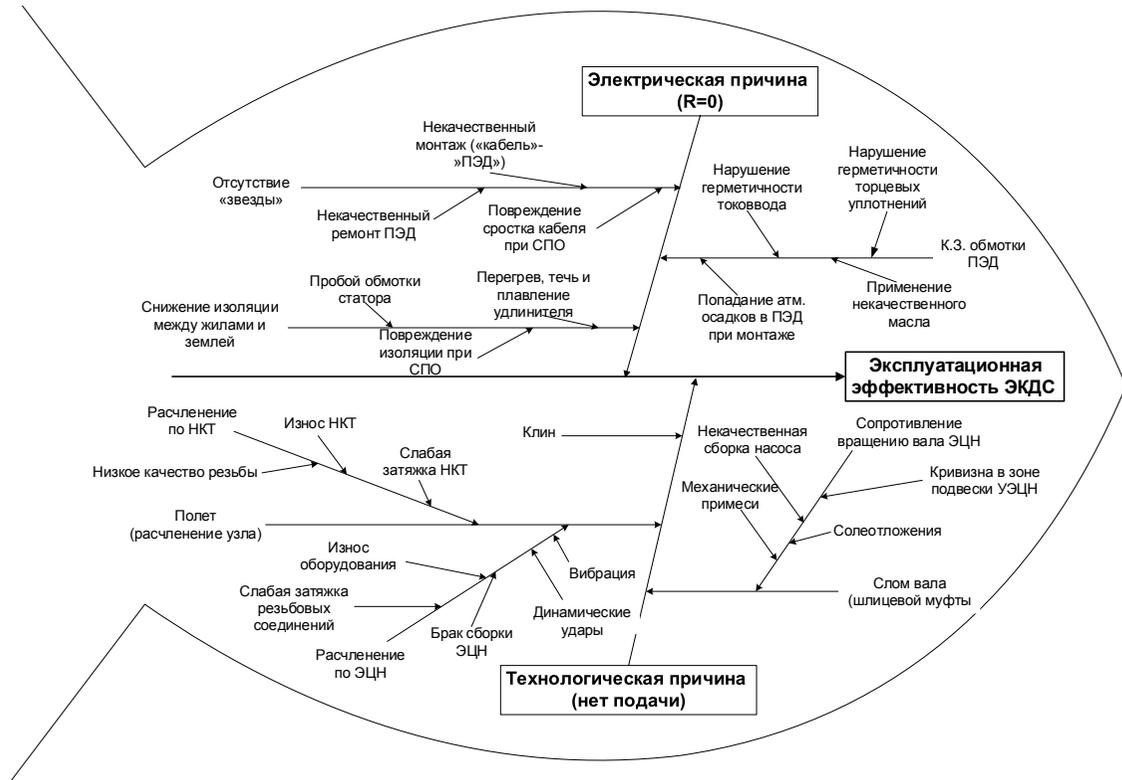


Рис. 1. Диаграмма причинно-следственной связи для оценки эффективности эксплуатации ЭКДС

Практический инструмент для этого решения сформирован на основе регрессионного анализа причинно-следственных связей. Это метод, известный в менеджменте качества как диаграмма К. Исикава [11], которая для ЭКДС приведена на рис. 1. Она позволяет в графической форме установить причинно-следственные связи возникновения отказов основных узлов комплекса.

Анализ данных, представленных на рис. 1, отчетливо показывает явное преобладание технологических нарушений в подземной части ЭКДС – ЭПУ. Отказы в работе наземной части ЭКДС, как правило, немногочисленны и напрямую сопряжены с отказами ЭПУ [14]. Безусловно, ЭПУ работают в экстремальных условиях под влиянием ЭФВ разнообразных по воздействию, природе происхождения, физике процесса [7, 15]. Среди множества ЭФВ можно назвать наиболее значимые с точки зрения нарушений работоспособности комплекса ЭПУ: электромагнитные (ЭЭФВ), термические (ТЭФВ), механические (МЭФВ), гидродинамические (ГЭФВ). Самая распространенная группа ЭФВ – ЭЭФВ [13].

На рис. 2 приведены результаты обработки статистического материала по отказам в работе ЭПУ в Поволжском регионе за 2014÷2019 годы. Как видно, наибольшее количество отказов приходится на электрическую часть ЭПУ – более 50 %, а именно на технологически связанные узлы «кабель – ПЭД» [7]. Приведенная статистика подтверждает данные из технической литературы [1, 10–15], а также результаты [5, 10, 15, 16], согласно которым самыми проблемными элементами ЭПУ являются ПЭД (22,7 % отказов) и ПКЛ (34,3 % отказов).

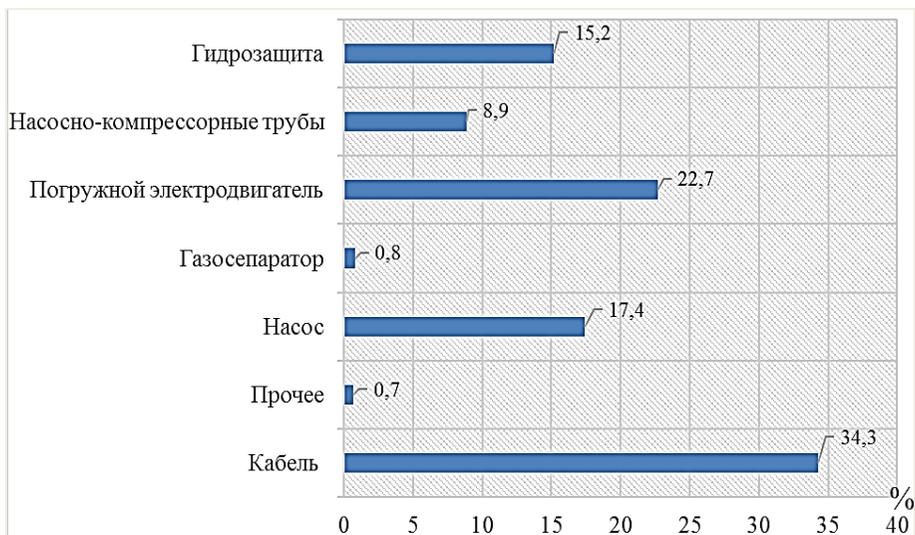


Рис. 2. Диаграмма количества отказов по элементам конструкции ЭПУ

Фактически названные узлы формально определяют общую работоспособность ЭПУ. Выход из строя ПКЛ происходит по следующим причинам: электропробой кабеля (47,7 %), кабельной муфты (10 %), удлинителя (7 %), электропробой в сростке (5 %), механические повреждения кабеля, заводской брак, некачественный монтаж.

Причинами и сопутствующими обстоятельствами технологических нарушений ПЭД являются: электропробой в пазу (45 %), электропробой токоввода (19 %), электропробой в лобовой части обмотки статора (10 %), перегрузки (6 %), коррозия корпуса, некачественный ремонт, некачественный монтаж, механические примеси и солеотложения, негерметичность НКТ и прочие [4]. ПЭД являются сложными техническими системами, состоящими из элементов различных по составу, по физической природе (механические, электрические, гидравлические и т. д.) и по степени воздействий ЭФВ. Поэтому далее в качестве объекта исследования рассмотрен ПЭД как наиболее ответственный и аварийный элемент ЭПУ.

На рис. 3 подробно (в относительном виде, в %) представлено соотношение между отказами, связанными с ПЭД, и причинами данных отказов. На рис. 4 приводятся данные по наработке на отказ ПЭД в Поволжском регионе разбивкой по годам эксплуатации. Уменьшение наработки на отказ ПЭД после проведения ТОиР как стратегическое направление повышения надежности ПЭО требует разработки комплекса технических, организационных решений по оценке текущего и остаточного ресурса ПЭД, а также прогнозирования ЖЦ ЭПУ в целом [3, 8].

Это определяет необходимость и актуальность технико-экономического обоснования очередности проведения ТО, ТР, КР, реконструкции, модернизации и пр. в управлении и оптимизации ЖЦ ЭКДС ПН на основе: непрерывной диагностики эксплуатационного состояния элементов комплекса; следования отраслевым стандартам, директивным данным, а также инструктивным рекомендациям по мероприятиям, необходимым для текущих этапов ЖЦ комплекса; оценки текущих и остаточных технических ресурсов с учетом данных по аварийности однотипных объектов в условиях региона для прогнозирования времени безотказной работы оборудования ЭКДС.

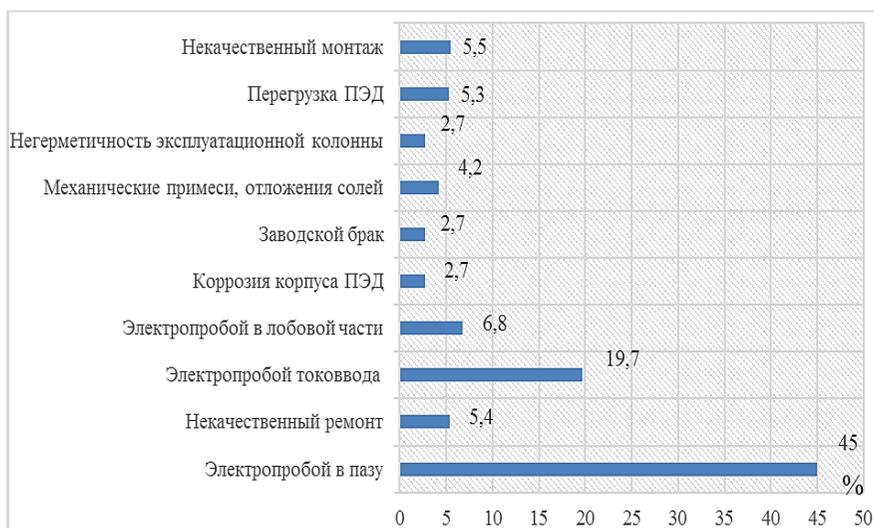


Рис. 3. Диаграмма характера повреждений ПЭД

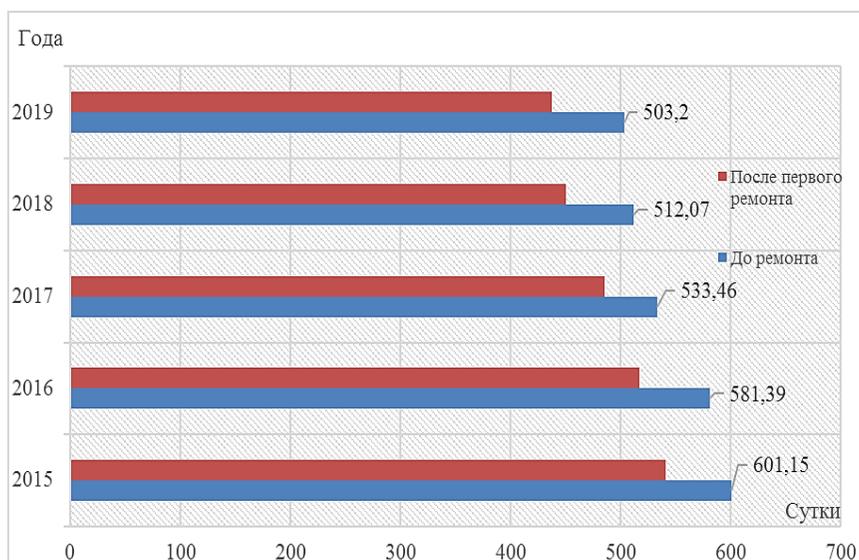


Рис. 4. Нарботка на отказ ПЭД за 2015÷2019 гг.

Методической и фактической основой описанного комплексного подхода к определению стратегии управления ЖЦ ЭКДС, в частности ЭПУ, являются названные выше принципы организации ТОиР и результаты статистического анализа аварийности.

С целью статистического обоснования названных принципов сформированы и обобщены данные по аварийности ПЭД на крупнейшем нефтедобывающем предприятии Поволжья – АО «Самаранефтегаз». Они составили информационную базу данных (ИБД), в которой содержатся сведения о более чем 9000 инцидентах, связанных с отказами ПЭД. Они упорядочены по номинальной мощности ПЭД без учета типоразмера двигателя.

В результате получены следующие статистические данные за период наблюдений 2014÷2019 гг.: в группе ПЭД-32 выборка составила 1859 отказов (19,5 % от общего количества); ПЭД-45 – 2520 отказов (28,7 % от общего количества); ПЭД-56 – 1553 отказа (19 % от общего количества); ПЭД-63 – 873 отказа (11,3 % от общего количества) в АО «Самаранефтегаз». В СамГТУ с помощью методов математической статистики произведен поиск и регрессионное определение функциональных зависимостей в тематически выделенных локальных наборах данных и оценка вероятности возникновения аварийных отказов выделенных групп ПЭД [5, 8]. В таблице для выборок условных групп ПЭД представлены данные о вероятностных распределениях наработки на отказ ПЭД по данным описанной выше статистической базы данных.

Функции плотности распределения наработки на отказ по группам ПЭД

Закон распределения	Группы ПЭД	Функция плотности $f(t)$	Значимость по критериям	
			λ -критерий	χ^2 -критерий
Вейбулла	ПЭД-56	$f(t)=0,02117 \cdot t^{-0,3915} \cdot e^{-0,0348 \cdot t^{0,6085}}$	0,97	0,81
Экспоненциальный	ПЭД-63	$f(t)=0,02877 \cdot e^{-0,02877 \cdot t}$	0,90	0,32
Логнормальный	ПЭД-32	$f(t)=0,149 \cdot e^{-0,693k} \cdot t^{-1}$	0,62	0,41
	ПЭД-45	$f(t)=0,2249 \cdot e^{-0,635k} \cdot t^{-1}$	0,96	0,95

Качественный и количественный анализ наработки на отказ по группам ПЭД с помощью названной выше ИБД позволяет на основе информационных технологий совершенствовать организацию эксплуатации оборудования ПН, а именно:

- выявить взаимозависимости, причинно-следственные связи, ассоциации и аналогии на множестве зафиксированных в ИБД инцидентов отказов оборудования (в данном случае ПЭД) с учетом ретроспективных и прогнозируемых временных факторов и локализации событий;

- классифицировать события и ситуации по конкретным техническим характеристикам и технологическим особенностям процессов нефтедобычи;

- прогнозировать ход технической эксплуатации, организацию обслуживания, ремонта, а также технологических и организационных процессов и позиций жизненных циклов ПЭО ПН, в частности ПЭД, и др.

В процессе анализа статистики отказов с помощью ИБД по аварийности для наиболее частых причин отказов оборудования прогнозируются сроки службы оборудования ПН в зависимости от условий эксплуатации, качества изготовления, текущей наработки и др. Это позволяет научно обосновать определение

мероприятий по уменьшению числа отказов оборудования и повышению надежности как самих электроустановок, так и систем энергоснабжения в целом.

Выводы

1. Сформулированы положения для совершенствования организации эксплуатации оборудования ПН.

2. В управлении жизненными циклами ПЭО ПН целесообразен комплексный подход в организации ТОиР, основанный на качественном объединении принятых в отрасли стратегий ремонтов и использующий в качестве основных положений данные и по наработке, и по текущему состоянию.

3. Для снижения повышенной аварийности ПЭО ПН, количества внезапных отказов и увеличения технического параметра наработки на отказ необходим системный учет, анализ данных по эксплуатации и создание расширенной информационной базы данных по технологическим нарушениям с использованием информационных технологий.

4. Комплексное использование статистических распределений эксплуатационных показателей является эффективным средством организации ТОиР, управления и планирования безопасной, надежной и эффективной эксплуатации оборудования нефтедобывающих предприятий.

5. Результаты качественного и количественного анализа наработки на отказ по группам ПЭД, полученные с помощью ИБД, дают возможность прогнозировать сроки службы оборудования ПН для различных условий эксплуатации, качества изготовления, текущей наработки и др.

6. Формульные выражения законов распределения наработки на отказ различных групп ПЭД, представленные в таблице, позволяют корректно и обоснованно определять параметры жизненных циклов электрооборудования ПН, формировать оценки для технико-экономического сопоставления вариантов электрооборудования ПН и текущих ресурсов его элементов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Нурбосынов Д.Н., Табачникова Т.В., Швецова Л.В.* Повышение эксплуатационно-энергетических характеристик электротехнического комплекса добывающей скважины при добыче вязкой и высоковязкой нефти // *Промышленная энергетика*. 2015. № 8. С. 18–22.
2. *Таджибаев А.И.* Научные основы систем оценки технического состояния электрооборудования электротехнических комплексов: Дис. ... д-ра техн. наук. Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2006. 373 с.
3. *Сушков В.В., Тимошкин В.В., Сухачев И.С., Сидоров С.В.* Оценка остаточного ресурса изоляции погружного электродвигателя установок электрических центробежных насосов добычи нефти при воздействиях импульсных перенапряжений // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2017. Т. 328. № 10. С. 74–80.
4. *Романов В.С., Гольдштейн В.Г.* Статистический анализ технологических нарушений в эксплуатации погружных электродвигателей нефтедобычи // *Труды Кольского научного центра РАН. Энергетика*. 2018. Вып. 16. С. 114–122.
5. *Швецова Л.В.* Повышение энергоэффективности электротехнического комплекса добывающей скважины с высоковязкой нефтью: Дис. ... канд. техн. наук. Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2016. 153 с.
6. *Кудрин Б.И.* Формирование электрического хозяйств металлургического предприятия как большой системы // *Известия Томского политехнического института*. 1976. Т. 295. С. 129–134.
7. *Мамедов О.Г.* Научные основы повышения эксплуатационной надежности погружных электродвигателей: Монография. Баку: Элм, 2010. 183 с.
8. *Romanov V.S., Goldstein V.G.* The dynamic improvement methods of energy efficiency and reliability of oil production submersible electric motors // *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series*. 2018. Vol. 944. № 012099. conference 1. Pp. 589–595.

9. *Китабов А.Н., Токарев В.П.* Информационно-измерительная система диагностики погружного электродвигателя // Вестник УГАТУ. Электроника, измерительная техника, радиотехника и связь. 2011. Т. 15. № 1 (41). С. 163–164.
10. *Кожин А.Г., Соловьев И.Г.* Анализ факторов, влияющих на износ погружного электрооборудования // Вестник кибернетики. 2006. № 5. С. 3–9.
11. *Романов В.С.* Повышение эксплуатационной эффективности электротехнических комплексов нефтедобычи с погружными электродвигателями: Дис. ... канд. техн. наук. Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2019. 87 с.
12. *Бабаев С.Г., Габипов И.А., Меликов Р.Х.* Основы теории надежности нефтепромыслового оборудования. Баку: АГНА, 2015. 400 с.
13. *Sukhachev I.S., Gladkikh T.D., Sushkov V.V.* An algorithm of the loss risk assessment in the oil production in case of electric submersible motor failure // IEEE Conference 2016 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines. Omsk, 2016. № 7819089. DOI: 10.1109/Dynamics.2016.7819089.
14. *Romanov V.S., Goldstein V.G., Vasilieva N.S.* The use of statistical models to improve the management of production cycles of submersible electrical equipment for oil production // IEEE Conference 2019 XXI International Conference Complex Systems: Control and Modeling Problems (CSCMP). Samara: Samara State Technical University, 2019. DOI: 10.1109/CSCMP45713.2019.8976496. Pp. 604–607.
15. *Салахов А.Х., Гафаров А.Р., Мухамедьяров Д.А.* Обзор современных конструкций погружных электрических двигателей, эксплуатируемых при нефтедобыче в условиях Крайнего Севера // XXI Российская научно-техническая заочная конференция «Энергетика: эффективность, надежность, безопасность». Томск: ТПУ, 2015. Секция 4. С. 279–281.
16. *Смирнов Н.И.* Исследование влияния износа на ресурс УЭЦН // Сборник трудов международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы трибологии». Самара: СамГТУ, 2007. Т. 1. С. 410–416.

Статья поступила в редакцию 3 марта 2020 года

TO THE QUESTION OF DAMAGE, MAINTENANCE AND REPAIRS OF SUBMERSIBLE ELECTRIC EQUIPMENT FOR OIL PRODUCTION

V.S. Romanov¹, V.G. Goldstein²

¹Togliatti State University
14, Belorusskaya st., Togliatti, 445020, Russian Federation

²Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

Abstract. *In optimizing and managing the life cycles of submersible electrical equipment (SEE) for oil production, an integrated approach to the organization of maintenance and repairs (MRO) is advisable based on the development of a more advanced strategy for carrying out repair cycles. It is stated that the maintenance and repair strategies adopted by the oil industry do not fully ensure operational efficiency, which leads to an increase in premature equipment failures, a reduction in turnaround times and, as a result, losses for oil companies. The advantages and disadvantages of approaches to organizing the operation of SEE on the operating time and the actual state in the planning, implementation of maintenance and repair, as well as the feasibility of their complex application are evaluated. It is proposed to use statistical models to make an informed decision on determining the composition and period of MRO, forecasting the boundary states of sets in general and specific SEE electrical installations. At a given operating time, it is possible to determine the basic laws of the appearance of defects and the mean time between failures (MTBF) of the elements, as well as the fleet of equipment of oil-producing enterprises as a whole. The*

*Vladimir S. Romanov (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.
Valery G. Goldstein (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.*

results obtained are the rationale for a set of recommendations to improve operational efficiency and optimize life cycle management of submersible electrical equipment for oil production.

Keywords: *submersible electric motors, oil production, submersible electrical equipment, operational efficiency, life cycle management, failure statistics, mean time between failures, equipment life, repair cycle.*

REFERENCES

1. *Nurbosynov D.N., Tabachnikova T.V., Shvetskova L.V.* Improving the operational and energy characteristics of the electrical complex of a producing well during the production of viscous and highly viscous oil // *Industrial Energy*. 2015. № 8. Pp. 18–22.
2. *Tajibaev A.I.* Scientific basis of systems for assessing the technical condition of electrical equipment of electrical complexes: Dis. ... dr. tech. sciences. Samara: Samar. state tech. Univ., 2006. 337 p.
3. *Sushkov V.V., Timoshkin V.V., Sukhachev I.S., Sidorov S.V.* Estimation of the residual life of insulation of a submersible electric motor of installations of electric centrifugal oil production pumps under the influence of surge voltage // *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo-Resource Engineering*. 2017. Vol. 328. № 10. Pp. 74–80.
4. *Romanov V.S., Goldstein V.G.* Statistical analysis of technological violations in the operation of submersible electric motors for oil production // *Transactions of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. Energy* 2018. Issue 16. Pp. 114–122.
5. *Shvetskova L.V.* Improving the energy efficiency of the electrical complex of a producing well with high viscosity oil: Dis. ... cand. tech. sciences. Samara: Samar. State tech. Univ., 2016. 153 p.
6. *Kudrin B.I.* Formation of electric facilities of a metallurgical enterprise as a large system // *Bulletin of the Tomsk Polytechnic Institute*. 1976. Vol. 295. Pp. 129–134.
7. *Mamedov O.G.* Scientific basis for improving the operational reliability of submersible electric motors: Monograph. Baku: Elm Publishing House, 2010. 183 p.
8. *Romanov V.S., Goldstein V.G.* The dynamic improvement methods of energy efficiency and reliability of oil production submersible electric motors // *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series*. 2018. Volume 944. № 012099. conference 1. Pp. 589–595.
9. *Kitabov A.N., Tokarev V.P.* Information-measuring system for diagnostics of a submersible electric motor // *Bulletin of USATU. Electronics, measuring equipment, radio engineering and communications*. 2011. Vol. 15. № 1 (41). Pp. 163–164.
10. *Kozhin A.G., Soloviev I.G.* Analysis of factors affecting the wear of submersible electrical equipment // *Tomsk State University Journal. cybernetics*. 2006. № 5. Pp. 3–9.
11. *Romanov V.S.* Improving the operational efficiency of electrotechnical complexes of oil production with submersible electric motors: Dis. cand. tech. sciences. Samara: Samar. State tech. Univ., 2019. 187 p.
12. *Babaev S.G., Gabibov I.A., Melikov R.Kh.* Fundamentals of the theory of reliability of oilfield equipment. Baku: AGNA, 2015. 400 p.
13. *Sukhachev I.S., Gladkikh T.D., Sushkov V.V.* An algorithm of the loss risk assessment in the oil production in case of electric submersible motor failure // *IEEE Conference 2016 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines*. Omsk, 2016. № 7819089. DOI: 10.1109/Dynamics. 2016.7819089.
14. *Romanov V.S., Goldstein V.G., Vasilieva N.S.* The use of statistical models to improve the management of production cycles of submersible electrical equipment for oil production // *IEEE Conference 2019 XXI International Conference Complex Systems: Control and Modeling Problems (CSCMP)*. Samara: Samara State Technical University, 2019. DOI: 10.1109/CSCMP45713.2019.8976496. Pp. 604–607.
15. *Salakhov A.Kh., Gafarov A.R., Mukhamedyarov D.A.* A review of modern designs of submersible electric motors operated during oil production in the Far North // *XXI Russian Scientific and Technical Correspondence Conference "Energy: Efficiency, Reliability, Safety"*. Tomsk: TPU. 2015. Section 4. Pp. 279–281.
16. *Smirnov N.I.* Study of the effect of wear on the resource of the ESP // *Collection of works of the international scientific and technical conference "Actual problems of tribology"*. Samara: Samara State Technical University, 2007. Volume 1. Pp. 410–416.

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

Представленная в журнал работа **должна обязательно содержать новые научные результаты**, нигде ранее не публиковавшиеся и не представленные к публикации в других изданиях.

В приоритетном порядке рассматриваются материалы докторских и кандидатских диссертаций.

Требования к оформлению статей находятся на сайте университета

<http://vestnik-teh.samgtu.ru>

К статье прилагаются:

- экспертное заключение;
- авторская справка;
- лицензионный договор передачи авторского права на публикацию;
- направление от организации (если авторы не работают в СамГТУ).

Статьи, не удовлетворяющие указанным правилам оформления, будут возвращены авторам без рассмотрения.

Статьи можно передать ответственному секретарю серии «Технические науки» И.Г. Минаковой (443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244. СамГТУ. Корп. 8, комн. 519).

Справки по телефонам:

337 07 00 – Эдгар Яковлевич Рапопорт

337 03 42 – Ирина Григорьевна Минакова

E-mail: vest_teh@samgtu.ru

Редколлегия журнала