



ISSN 1991-8542 (Print)

ISSN 2712-8938 (Online)

ВЕСТНИК
САМАРСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО
УНИВЕРСИТЕТА

Серия
«ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ»

2023. Т. 31, № 4

ISSN 1991-8542 (Print)

ISSN 2712-8938 (Online)

Вестник Самарского Государственного Технического Университета

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

Издается с августа 1993 г.

Выходит 4 раза в год

Серия

«ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ»

2023. Том 31. № 4

Учредитель – ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»

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

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

Редакционная коллегия:

А.М. Абакумов (д.т.н., проф.)

В.И. Батищев (д.т.н., проф.)

С.Ю. Боровик (д.т.н., проф.)

Ю.В. Зубков (д.т.н., проф.)

Л.С. Казаринов (д.т.н., проф.)

Ю.Б. Казаков (д.т.н., проф.)

О.С. Колосов (д.т.н., проф.)

П.К. Кузнецов (д.т.н., проф.)

В.И. Лачин (д.т.н., проф.)

М.Ю. Лившиц (д.т.н., проф.)

С.П. Орлов (д.т.н., проф.)

Л.Д. Певзнер (д.т.н., проф.)

Э.Я. Рапопорт (д.т.н., проф.)

А.В. Стариков (д.т.н., проф.)

Е. Вааке (проф., Германия)

S. Luri (проф., Италия)

В. Nаске (проф., Германия)

М. Forzan (проф., Италия)

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

Вестник Самарского государственного технического университета
Серия «Технические науки» (2023. Том 31. № 4)

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

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

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

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

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

Подписано в печать 29.02.24
Выход в свет 15.03.24

Формат 70 × 108 ¹/₁₆.
Усл. печ. л. 17,25 п.л.
Уч.-изд. л. 16,84 п.л.
Тираж 500 экз. Рег. № 210/23
Заказ № 72

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

Журнал включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ).

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

Подписной индекс в каталоге «Урал-Пресс» 18106
ISSN 1991-8542

© Авторы, 2023
© Самарский государственный
технический университет, 2023

Цена свободная

ISSN 1991-8542 (Print)

ISSN 2712-8938 (Online)

Vestnik of
Samara
State
Technical
University

SCIENTIFIC JOURNAL

Published since August 1993

Four Issues a Year

Technical Sciences Series

2023. Vol. 31. Issue 4

Founder – Samara State Technical University

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

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

Editorial board

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

The Editorial Board Address:

Samara State Technical University

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

Phone: +7(846) 337 04 43

E-mail: vest_teh@samgtu.ru

Printed at the Samara State Technical University Press

The journal is included in the Russian Science Citation Index.

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

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

The subscription index in Ural-Press catalogue 18106

ISSN 1991-8542

СОДЕРЖАНИЕ

Информационные технологии и коммуникации

<i>Ильина Н.А.</i> Двухканальное программное управление с минимальным энергопотреблением в системах с распределенными параметрами.....	6
<i>Тупоносова Е.П., Ливищ М.Ю., Голованов П.А.</i> Управление процессом кадрового обеспечения нефтяной отрасли Самарской области.....	17

Энергетика и электротехника

<i>Ахметшин А.Р.</i> Исследование электропотребления объектов индивидуального жилищного строительства разной этажности и площади	34
<i>Базаров А.А., Будко С.И.</i> Моделирование тепловых процессов при плавке гололеда на линии электропередачи.....	49
<i>Коробейников С.М., Шевченко В.Е., Ридель А.В., Горева Л.П.</i> Измерение электропроводности наножидкости на основе трансформаторного масла.....	68
<i>Макаричев Ю.А., Ратцев Я.А.</i> Исследование теплового режима линейного двигателя постоянного тока.....	80

Информационные технологии и коммуникации

УДК 681.5

ДВУХКАНАЛЬНОЕ ПРОГРАММНОЕ УПРАВЛЕНИЕ С МИНИМАЛЬНЫМ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЕМ В СИСТЕМАХ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ*

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 расходу энергии двухканального программного управления объектом с распределенными параметрами в условиях заданной точности равномерного приближения результирующего пространственного распределения управляемой величины к требуемому состоянию. В качестве управляющих воздействий рассматриваются два сосредоточенных внутренних управления по мощности источников тепла, возбуждаемых в электромагнитном поле индуктора. Предлагаемый подход к решению данной задачи использует специальную процедуру предварительной параметризации управляющих воздействий на конечномерных подмножествах финишных значений сопряженных переменных в краевой задаче принципа максимума Понтрягина и последующую редукцию к задаче полубесконечной оптимизации, решение которой относительно искомого вектора параметров находится с помощью альтернативного метода на основании дополнительной информации о фундаментальных закономерностях предметной области. Приводится пример энергосберегающего управления процессом периодического индукционного нагрева металлической заготовки.*

Ключевые слова: *оптимальное по расходу энергии управление, двухканальное управление, альтернативный метод, задача полубесконечной оптимизации, индукционный нагрев.*

Введение

Целый ряд актуальных для приложений и представляющих самостоятельный интерес задач оптимального управления (ЗОУ) системами с распределенными параметрами (СПП) формулируется в условиях одновременного воздействия на объект по различным каналам управления с целью снижения показателей энергопотребления в процессах технологической теплофизики. Сказанное относится, в частности, к распространенным в технических системах ситуациям с использованием векторных управляющих воздействий. Во многих случаях постановка подобных задач, в частности задач двухканального управления, диктуется сами-

* Наталья Андреевна Ильина, кандидат технических наук, инженер кафедры «Автоматика и управление в технических системах».

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-00180, <https://rscf.ru/project/22-29-00180/>

ми используемыми способами конструктивного исполнения промышленного объекта и методами организации технологического процесса [1–3]. Известные методы [2, 4] отыскания алгоритмов оптимального управления бесконечномерными объектами разработаны применительно к моделям управляемых процессов с одним управляющим воздействием. В связи с этим возникает актуальная задача применения разработанной технологии [5] получения алгоритмически точного решения задачи минимизации энергопотребления в процессе управления СРП параболического типа с двумя каналами управления.

Постановка задачи оптимального управления

В данной работе в качестве объекта управления рассматривается процесс нагрева металлической пластины с двумя сосредоточенными управляющими воздействиями $u_1(t)$ и $u_2(t)$ по мощности внутреннего тепловыделения с заданными функциями $W_1(x)$ и $W_2(x)$ его пространственного распределения.

В этом случае управляемая величина $Q(x, t)$ описывается в зависимости от пространственной координаты $x \in [0, 1]$ и времени $t \in [0, T]$ линейным одномерным неоднородным уравнением теплопроводности в относительных единицах следующего вида [4]:

$$\frac{\partial Q(x, t)}{\partial t} = \frac{\partial^2 Q(x, t)}{\partial x^2} + W_1(x)u_1(t) + W_2(x)u_2(t) \quad (1)$$

с начальными

$$Q(x, 0) = Q_0 = \text{const}, \quad Q_0 \geq 0 \quad (2)$$

и типовыми граничными условиями

$$\begin{aligned} -\frac{\partial Q(0, t)}{\partial x} &= Bi_1(Q_{\text{env}}(t) - Q(0, t)), \quad t > 0; \\ \frac{\partial Q(1, t)}{\partial x} &= Bi_2(Q_{\text{env}}(t) - Q(1, t)), \quad t > 0, \end{aligned} \quad (3)$$

соответствующими конвективному характеру теплообмена с окружающей средой по закону Ньютона на границах пластины $x = 0$ и $x = 1$ с заданными значениями Bi_1 и Bi_2 критерия Био [4].

Начальное температурное распределение Q_0 в (2) принимается равномерным по всему объему пластины.

Температура окружающей среды $Q_{\text{env}}(t)$ в (3) принимается равной Q_0 .

В (1) управляющие воздействия $u_1(t)$, $u_2(t)$ не стесняются дополнительными ограничениями.

В конце процесса управления, продолжительность которого T задана, требуется обеспечить необходимую точность $\varepsilon > 0$ равномерного приближения конечного пространственного распределения управляемой величины $Q(x, T)$ по толщине пластины к требуемому состоянию $Q^*(x) = Q^* = \text{const} > Q_0$, которая оценивается в равномерной метрике в виде следующего неравенства [2, 6]:

$$\max_{x \in [0, 1]} |Q(x, T) - Q^*| \leq \varepsilon_0. \quad (4)$$

В качестве критерия оптимальности выступает расход энергии на процесс нагрева, который оценивается в виде следующего интегрального функционала:

$$I = \int_0^T (u_1^2(t) + u_2^2(t)) dt \rightarrow \min_{u_1(t), u_2(t)}. \quad (5)$$

В рассматриваемой задаче оптимального управления требуется определить управляющие воздействия $u_1^*(t)$, $u_2^*(t)$, которые переводят объект управления (1)–(3) в требуемое конечное состояние (4) при минимальном значении критерия оптимальности (5).

Модальное описание объекта управления

Применение к начально-краевой задаче (1)–(3) конечного интегрального преобразования (КИП) по пространственной переменной приводит к эквивалентному (1)–(3) описанию ОРП бесконечной системой линейных дифференциальных уравнений первого порядка для временных мод $\bar{Q}_n(\mu_n, t)$ разложения $Q(x, t)$ в сходящийся в среднем ряд по ортонормированной с весом $r(x) = 1$ системе собственных функций $\varphi_n(\mu_n, x)$, определяемых вместе с собственными числами μ_n^2 известными способами [7, 8]:

$$Q(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \bar{Q}_n(\mu_n, t) \varphi_n(\mu_n, x); \quad (6)$$

$$\frac{d\bar{Q}_n(\mu_n, t)}{dt} = -\mu_n^2 \bar{Q}_n(\mu_n, t) + \bar{W}_{1n} u_1(t) + \bar{W}_{2n} u_2(t), \quad (7)$$

$$\bar{Q}_n(\mu_n, 0) = \bar{Q}^{(0)}(\mu_n), \quad n = 1, 2, \dots,$$

где \bar{W}_{1n} , \bar{W}_{2n} – моды конечного интегрального преобразования функций $W_1(x)$ и $W_2(x)$, определяемые соотношениями:

$$\bar{W}_{1n} = \int_0^1 W_1(\xi, x) \varphi_n(\mu_n, x) dx; \quad \bar{W}_{2n} = \int_0^1 W_2(\xi, x) \varphi_n(\mu_n, x) dx. \quad (8)$$

Собственные функции $\varphi_n(\mu_n, x)$ и собственные числа в (6)–(8) определяются следующими соотношениями [7, 8]:

$$\varphi_n(\mu_n, x) = \frac{1}{E_n} \cdot \left[\cos(\mu_n x) + \frac{Bi_1}{\mu_n} \sin(\mu_n x) \right]; \quad \operatorname{tg} \mu_n = \frac{Bi_1 + Bi_2}{\mu_n - \frac{Bi_1 \cdot Bi_2}{\mu_n}};$$

$$E_n^2 = \frac{1}{2\mu_n} \left[\left(1 + \frac{Bi_1^2}{\mu_n^2} \right) \mu_n + \left(1 - \frac{Bi_1^2}{\mu_n^2} \right) \sin \mu_n \cos \mu_n + 2 \frac{Bi_1}{\mu_n} \sin^2 \mu_n \right], \quad n = 1, 2, \dots$$

Интегрирование каждого из уравнений системы (7) независимо от других с последующей подстановкой результатов в (6) позволяет получить решение краевой задачи (1)–(3) в форме явной аналитической зависимости от внутренних управляющих воздействий $U(t) = (u_1(t), u_2(t))$.

Параметризованная форма оптимального программного управления

На сформулированную бесконечномерную задачу оптимизации распространяется принцип максимума Понтрягина [2, 9]. Базовые условия достижения максимума функции Понтрягина на оптимальном управлении $U^*(t) = (u_1^*(t), u_2^*(t))$ вместе с информацией о закономерностях оптимизируемых процессов в кон-

кретной предметной области в целом ряде прикладных задач вполне определяют характер программных управляющих воздействий на участках их непрерывного изменения в форме явных зависимостей от управляемых и сопряженных переменных.

Функция Понтрягина $H(\bar{Q}, U(t), \psi(t))$ для рассматриваемой задачи оптимизации принимает согласно (7) следующий вид [9]:

$$H(\bar{Q}, U(t), \psi(t)) = -(u_1^2(t) + u_2^2(t)) + \sum_{n=1}^{\infty} \psi_n(t) \left[-\mu_n^2 \bar{Q}_n + \bar{W}_{1n} u_1(t) + \bar{W}_{2n} u_2(t) \right]. \quad (9)$$

Здесь $\bar{Q} = (\bar{Q}_n(\mu_n, t))$, $U(t) = (u_1(t), u_2(t))$ и вектор сопряженных переменных $\psi(t) = (\psi_n(t))$, $n = 1, 2, \dots$ описывается системой дифференциальных уравнений:

$$\frac{d\psi_j}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial Q_j} = \mu_j^2 \psi_j, \quad j = 1, 2, \dots, \quad (10)$$

откуда следует, что $\psi(t)$ непосредственно определяется, согласно (10), в экспоненциальной форме с точностью до априори неизвестных значений $\psi_n(T)$, $n = 1, 2, \dots$:

$$\psi_n(t) = \psi_n(T) \cdot e^{-\mu_n^2(T-t)}. \quad (11)$$

Согласно основному утверждению принципа максимума, функция Понтрягина (11) достигает на соответствующих оптимальному процессу величинах $\bar{Q}^*(t)$, $U^*(t)$, $\psi^*(t)$ своего максимума по этим переменным именно при оптимальном управлении $U^*(t)$ в любой момент времени [9]:

$$H(\bar{Q}^*, U^*(t), \psi^*(t)) = \max_{U(t)} H(\bar{Q}^*, U(t), \psi^*(t)), \quad t \in [0, T]. \quad (12)$$

В [10] предложен метод последовательной параметризации управляющих воздействий в ЗОУ СРП на конечномерных подмножествах величин $\psi(t)$, формируемых в виде N -мерных векторов $\psi^{(N)} = (\tilde{\psi}_n)$, $n = \overline{1, N}$ финишных значений $\tilde{\psi}_n = \psi_n(T)$ N первых сопряженных функций (11) при равных нулю остальных величинах $\psi_n(T)$ для всех $n > N$. При двухканальном управлении векторы $\psi^{(N)}$ определяем для каждого из управляющих воздействий в отдельности, полагая в соответствии с методом в [10]

$$\begin{aligned} \psi^{(N_1)} &= (\psi_{1n}(T)) = (\tilde{\psi}_{1n}), \quad n = \overline{1, N_1}, \quad N_1 \geq 1; \quad \psi_{1n}(T) = 0, \quad n > N_1, \\ \psi^{(N_2)} &= (\psi_{2n}(T)) = (\tilde{\psi}_{2n}), \quad n = \overline{1, N_2}, \quad N_2 \geq 1; \quad \psi_{2n}(T) = 0, \quad n > N_2, \end{aligned}$$

соответственно для управлений $u_1^*(t)$ и $u_2^*(t)$. Параметризуемое подобным образом оптимальное управление согласно базовому условию (12) описывается следующей, теперь уже конечной суммой экспонент:

$$u_k^*(t) = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{N_k} \tilde{\psi}_{kn} \bar{W}_{kn} e^{-\mu_n^2(T-t)}, \quad k = 1, 2. \quad (13)$$

Решение исходной задачи позволяет оценить максимальный эффект, достигаемый по критерию (5) в условиях свободы выбора управляющих воздействий $u_1(t)$, $u_2(t)$, если при этом $u_1^*(t) \geq 0$, $u_2^*(t) \geq 0$ для всех $t \in [0, T]$.

Редукция к задаче полубесконечной оптимизации и ее решение альтернансным методом

Интегрирование системы уравнений (7) с управляющими воздействиями (13) приводит к линейной зависимости модальных переменных от $\psi^{(N_1)} = (\tilde{\psi}_{1n})$, $n = \overline{1, N_1}$; $\psi^{(N_2)} = (\tilde{\psi}_{2n})$, $n = \overline{1, N_2}$:

$$\begin{aligned} \bar{Q}_n(\psi_1^{(N_1)}, \psi_2^{(N_2)}, t) &= \frac{\bar{W}_{1n}}{2} \sum_{i=1}^{N_1} \frac{\tilde{\psi}_{1i} \bar{W}_{1i}}{\mu_n^2 + \mu_i^2} e^{-\mu_i^2 t} (e^{\mu_i^2 t} - e^{-\mu_n^2 t}) + \\ &+ \frac{\bar{W}_{2n}}{2} \sum_{i=1}^{N_2} \frac{\tilde{\psi}_{2i} \bar{W}_{2i}}{\mu_n^2 + \mu_i^2} e^{-\mu_i^2 t} (e^{\mu_i^2 t} - e^{-\mu_n^2 t}). \end{aligned} \quad (14)$$

Последующая подстановка этого результата в (6) для $t = T$ определяет в явной форме линейную по $\psi_1^{(N_1)}$, $\psi_2^{(N_2)}$ -параметризованную зависимость $Q(x, T)$

$$Q(x, \psi_1^{(N_1)}, \psi_2^{(N_2)}) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{E_n} \left(\cos(\mu_n x) + \frac{B_{i_1}}{\mu_n} \sin(\mu_n x) \right) \cdot \bar{Q}_n(\psi_1^{(N_1)}, \psi_2^{(N_2)}, T) \quad (15)$$

и приводит к представлению требования к конечному состоянию управляемой величины (4) и критерия оптимальности (5) в форме явных зависимостей соответственно $Q(x, \psi_1^{(N_1)}, \psi_2^{(N_2)})$ и $I(\psi_1^{(N_1)}, \psi_2^{(N_2)})$ от своих аргументов:

$$\Phi(\psi_1^{(N_1)}, \psi_2^{(N_2)}) = \max_{x \in [x_0, x_1]} |Q(x, \psi_1^{(N_1)}, \psi_2^{(N_2)}) - Q^*(x)| \leq \varepsilon, \quad (16)$$

$$I(\psi_1^{(N_1)}, \psi_2^{(N_2)}) \rightarrow \min_{\psi_1^{(N_1)}, \psi_2^{(N_2)}}. \quad (17)$$

В результате осуществляется точная редукция исходной задачи оптимального управления (1)–(7) к задаче полубесконечной оптимизации (ЗПО) (16), (17) на экстремум функции (17) конечного числа переменных $\psi_1^{(N_1)} = (\tilde{\psi}_{1n})$, $n = \overline{1, N_1}$; $\psi_2^{(N_2)} = (\tilde{\psi}_{2n})$, $n = \overline{1, N_2}$ в (13) с бесконечным числом диктуемых требованием (4) ограничений для всех $x \in [x_0, x_1]$, эквивалентных одному ограничению на функцию максимума в (16).

Задача (16), (17) разрешима не при всех величинах ε , а только для $\varepsilon \geq \varepsilon_{\min}^{(N_1, N_2)}$ в (16):

$$\varepsilon_{\min}^{(N_1, N_2)} = \min_{\psi_1^{(N_1)}, \psi_2^{(N_2)}} \left\{ \max_{x \in [x_0, x_1]} |Q(x, \psi_1^{(N_1)}, \psi_2^{(N_2)}) - Q^*(x)| \right\}, \quad (18)$$

где $\varepsilon_{\min}^{(N_1, N_2)}$ – минимально достижимая ошибка равномерного приближения $Q(x, \psi_1^{(N_1)}, \psi_2^{(N_2)})$ к $Q^*(x)$ в рассматриваемом классе управлений (13), и значения $\varepsilon_{\min}^{(N_1, N_2)}$ монотонно убывают с ростом размерности N_1 и N_2 [6]:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\min}^{(1,1)} &> \varepsilon_{\min}^{(2,2)} > \dots > \varepsilon_{\min}^{(\xi-1, \xi-1)} > \max \left(\varepsilon_{\min}^{(\xi-1, \xi)}, \varepsilon_{\min}^{(\xi, \xi-1)} \right) \geq \min \left(\varepsilon_{\min}^{(\xi-1, \xi)}, \varepsilon_{\min}^{(\xi, \xi-1)} \right) > \\ &> \varepsilon_{\min}^{(\xi, \xi)} > \dots > \varepsilon_{\min}^{(\rho, \rho)} = \varepsilon_{\inf} \geq 0. \end{aligned}$$

Согласно установленному в [10] принципу минимальной сложности параметризуемых в соответствии с (13) структур оптимальных программных управлений, размерность N_1 и N_2 векторов $\psi_1^{(N_1)}$, $\psi_2^{(N_2)}$, характеризующих управле-

ния $u_1^*(t)$, $u_2^*(t)$ в (13), определяется местом заданного достижимого значения ε в (4) в этой цепочке неравенств в соответствии с одним из правил:

$$N_1 = N_2 = w, \text{ если } \varepsilon_{\min}^{(w,w)} \leq \varepsilon < \min\left(\varepsilon_{\min}^{(w-1,w)}, \varepsilon_{\min}^{(w,w-1)}\right); \quad (19)$$

$$N_1 = w, N_2 = w-1, \text{ если } \varepsilon_{\min}^{(w,w-1)} \leq \varepsilon < \varepsilon_{\min}^{(w-1,w)} \text{ или } \varepsilon_{\min}^{(w-1,w)} < \varepsilon_{\min}^{(w,w-1)} \leq \varepsilon < \varepsilon_{\min}^{(w-1,w-1)};$$

$$N_1 = w-1, N_2 = w, \text{ если } \varepsilon_{\min}^{(w-1,w)} \leq \varepsilon < \varepsilon_{\min}^{(w,w-1)} \text{ или } \varepsilon_{\min}^{(w,w-1)} < \varepsilon_{\min}^{(w-1,w)} \leq \varepsilon < \varepsilon_{\min}^{(w-1,w-1)}.$$

Решение ЗПО (16), (17) может быть получено по схеме альтернансного метода [2, 6, 11, 12], являющегося развитием теории нелинейных чебышевских приближений [13] применительно к задачам полубесконечной оптимизации и базирующегося на специальных альтернансных свойствах $\psi_1^{(N_1)}$, $\psi_2^{(N_2)}$, согласно которым в условиях малостеснительных допущений в некоторых точках $x_j^0 \in [0,1]$, $j = \overline{1, R}$ достигаются предельно допустимые значения $\Phi(\psi_1^{(N_1)}, \psi_2^{(N_2)})$, равные ε :

$$\left| Q(x_j^0, \psi_1^{(2)}, \psi_2^{(2)}) - Q^*(x_j^0) \right| = \varepsilon, \quad j = \overline{1, R}. \quad (20)$$

Основное свойство заключается в том, что число R этих точек оказывается равным числу всех неизвестных задач (16), (17), включая все компоненты векторов $\psi_1^{(N_1)} = (\tilde{\psi}_{1n})$, $n = \overline{1, N_1}$; $\psi_2^{(N_2)} = (\tilde{\psi}_{2n})$, $n = \overline{1, N_2}$ при заданной величине ε в случае $\varepsilon > \varepsilon_{\min}^{(N_1, N_2)}$ в (19) и наряду с ними априори неизвестную величину минимакса $\varepsilon_{\min}^{(N_1, N_2)}$, определяемую согласно (18), если $\varepsilon = \varepsilon_{\min}^{(N_1, N_2)}$ [11]. Применительно к типичному варианту (19) с одинаковым числом переключений $N_1 = N_2 = N = 2$ двухканального управления при $\varepsilon = \varepsilon_{\min}^{(2,2)}$ получаем, что число R точек альтернанса определяется в виде

$$R = \begin{cases} N_1 + N_2, & \text{если } \varepsilon > \varepsilon_{\min}^{(N_1, N_2)}; \\ N_1 + N_2 + 1, & \text{если } \varepsilon = \varepsilon_{\min}^{(N_1, N_2)}. \end{cases} \quad (21)$$

Типичные технологические требования в рассматриваемой задаче сводятся к достижению удовлетворительной по величине ε в (4) точности нагрева с помощью управляющих воздействий самой простой из возможных в этих условиях (и, следовательно, легче всего реализуемой) структуры с выбором векторов $\psi_1^{(N_1)}$, $\psi_2^{(N_2)}$ минимальной размерности.

Так, в большинстве случаев в прикладных задачах оптимального быстрогодействия ограничиваются вариантом двухинтервальных управляющих воздействий релейной формы (режим «включить-выключить») с выбором $N_1 = N_2 = N = 2$ в (21). В рассматриваемом случае каждое из программных управляющих воздействий $u_1^*(t)$, $u_2^*(t)$ определяется двумя искомыми параметрами $\psi_1^{(N_1)} = (\tilde{\psi}_{11}, \tilde{\psi}_{12})$, $\psi_2^{(N_2)} = (\tilde{\psi}_{21}, \tilde{\psi}_{22})$ и, полагая $\varepsilon = \varepsilon_{\min}^{(2,2)}$ в (20), получим в (21):

$$R = N_1 + N_2 + 1 = 5. \quad (22)$$

Таким образом, соотношения (20) с учетом (21) оказываются замкнутыми относительно всех параметров процесса управления: $\psi^{(N)} = (\tilde{\psi}_{11}, \tilde{\psi}_{12}, \tilde{\psi}_{21}, \tilde{\psi}_{22})$, $\varepsilon_{\min}^{(2,2)}$.

Основное затруднение теперь состоит в том, что равенствам (20) формально соответствует множество вариантов по форме кривой пространственного распределения. Для однозначного определения вида этой кривой нужно установить знаки разностей $Q(x_j^0, \psi^{(N)}) - Q^*(x_j^0)$ в каждом из уравнений и найти координаты точек x_j^0 . Эта задача может быть решена только при известной конфигурации кривой температурного распределения $Q(x_j^0, \psi^{(N)}) - Q^*(x_j^0)$ на отрезке $x \in [x_0, x_1]$ при двухканальном оптимальном управлении по мощности источников тепла, устанавливаемой на основании физических закономерностей процессов нестационарной теплопроводности в зависимости от величины ε [2, 11].

В качестве примера рассматривается процесс индукционного нагрева пластины из титановых сплавов при [4]:

$$W_1(\xi, x) = \frac{\operatorname{ch}(\sqrt{2}\xi x) - \cos(\sqrt{2}\xi x)}{\operatorname{sh}(\sqrt{2}\xi) - \sin(\sqrt{2}\xi)} \sqrt{2}\xi; \quad W_2(\xi, x) = W_1(\xi, 1-x),$$

где ξ – характерный параметр, вычисляемый по формулам:

$$\xi = \frac{x_1 \sqrt{2}}{\delta}, \quad \delta = \sqrt{\frac{2}{\mu \omega \sigma}}.$$

Здесь x_1 – толщина пластины; δ – глубина проникновения тока в металл; ω – частота питающего тока; σ – электропроводность нагреваемого материала; μ – абсолютная магнитная проницаемость.

Физические закономерности процесса индукционного нагрева приводят в данном случае подобно [4, 14] к показанной на рис. 1 форме кривой пространственного распределения на отрезке $x \in [0, 1]$, соответствующей системе в следующем однозначно устанавливаемом виде:

$$\begin{aligned} Q(0, \psi^{(N)}) - Q^* &= -\varepsilon_{\min}^{(2,2)}; & Q(x_4^0, \psi^{(N)}) - Q^* &= \varepsilon_{\min}^{(2,2)}; \\ Q(x_2^0, \psi^{(N)}) - Q^* &= \varepsilon_{\min}^{(2,2)}; & Q(1, \psi^{(N)}) - Q^* &= -\varepsilon_{\min}^{(2,2)}; \\ Q(x_3^0, \psi^{(N)}) - Q^* &= -\varepsilon_{\min}^{(2,2)}; & \frac{\partial Q(x_j^0, \psi^{(N)})}{\partial x} &= 0, \quad j = 2, 3, 4. \end{aligned} \quad (23)$$

Решение этой линейной по $\psi^{(N)}$ системы восьми уравнений относительно восьми неизвестных (финишных значений сопряженных переменных программных управлений $\tilde{\psi}_{11}, \tilde{\psi}_{12}, \tilde{\psi}_{21}, \tilde{\psi}_{22}$; величины $\varepsilon_{\min}^{(2,2)}$ и координат $x_j^0, j = 2, 3, 4$ точек достижения предельно допустимых отклонений $Q(x_j^0, \psi^{(N)})$ от $Q^*(x_j^0)$) известными численными методами [15] и при учете достаточно большого числа членов сходящегося ряда в (15) исчерпывает решение исходной задачи оптимального управления с требуемой точностью.

Некоторые расчетные результаты, полученные для значений $\xi = 4$, $Bi_1 = Bi_2 = 0.5$, $Q^* = 0.5$, представлены на рис. 1 и рис. 2.

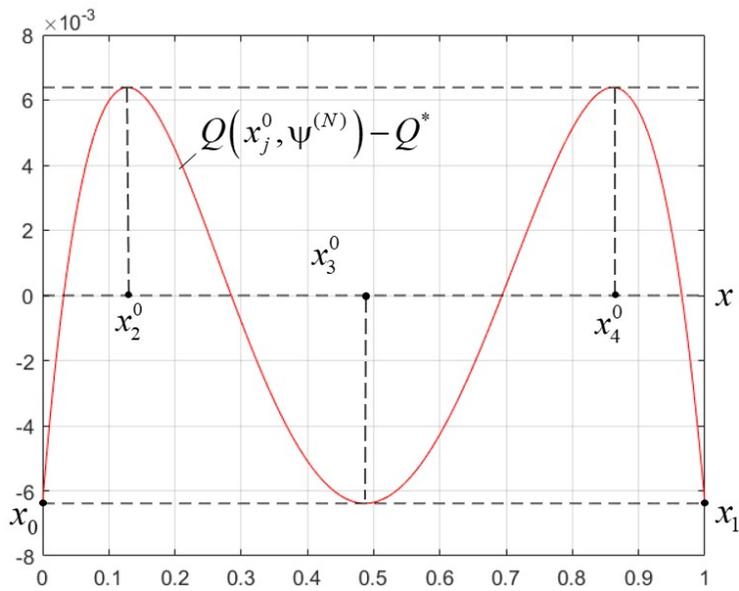


Рис. 1. Температурное распределение в конце оптимального процесса для случая $T = 0.95$ ($\varepsilon_{\min}^{(2,2)} = 0.0064$; $x_2^0 = 0.13$; $x_3^0 = 0.49$; $x_4^0 = 0.86$)

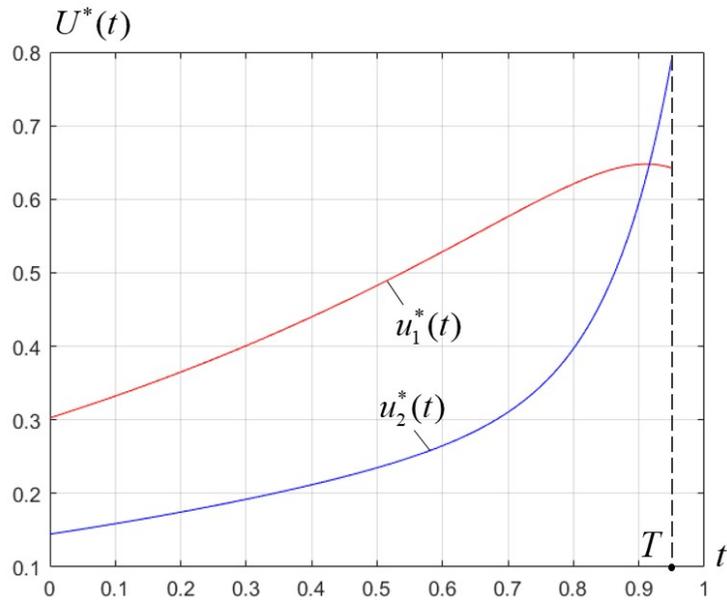


Рис. 2. Программные оптимальные управления, построенные по (17) с найденными значениями сопряженных переменных: $\tilde{\psi}_{11} = 1.51$, $\tilde{\psi}_{12} = 0.19$, $\tilde{\psi}_{21} = 0.72$, $\tilde{\psi}_{22} = 0.77$

Заклучение

Разработанная в (5) конструктивная технология решения краевых задач оптимального по расходу энергии управления СРП параболического типа в условиях оценки в равномерной метрике ограничений на конечные состояния объекта распространена на двухканальный характер программного управления. Получаемые результаты могут быть использованы для решения достаточно широкого круга актуальных проблем разработки энергосберегающих алгоритмов управления, в том числе применительно к представляющим самостоятельный интерес задачам оптимизации по энергопотреблению объектов технологической теплофизики.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Бутковский А.Г.* Методы управления системами с распределенными параметрами. М.: Наука, 1975. 588 с.
2. *Рапопорт Э.Я.* Оптимальное управление системами с распределенными параметрами. М.: Высшая школа, 2009.
3. *Рей У.* Методы управления технологическими процессами. М.: Мир, 1983. 368 с.
4. *Рапопорт Э.Я., Плишивцева Ю.Э.* Оптимальное управление температурными режимами индукционного нагрева. М.: Наука, 2012.
5. *Плишивцева Ю.Э., Рапопорт Э.Я.* Программное управление с минимальным энергопотреблением в системах с распределенными параметрами // Известия РАН. Теория и системы управления, 2020. № 4. С. 42–57.
6. *Рапопорт Э.Я., Плишивцева Ю.Э.* Методы полубесконечной оптимизации в прикладных задачах управления системами с распределенными параметрами. М.: Наука, 2021. 286 с.
7. *Рапопорт Э.Я.* Структурное моделирование объектов и систем с распределенными параметрами. М.: Высшая школа, 2003. 299 с.
8. *Мартыненко Н.А., Пустыльников Л.М.* Конечные интегральные преобразования и их применение к исследованию систем с распределенными параметрами. М.: Наука, 1986, 303 с.
9. *Понтрягин Л.С., Болтянский В.Г., Гамкрелидзе Р.В., Мищенко Е.Ф.* Математическая теория оптимальных процессов. М.: Наука, 1969.
10. *Плишивцева Ю.Э., Рапопорт Э.Я.* Метод последовательной параметризации управляющих воздействий в краевых задачах оптимального управления системами с распределенными параметрами // Известия РАН. Теория и системы управления, 2009. № 3. С. 22–33.
11. *Рапопорт Э.Я.* Альтернативный метод в прикладных задачах оптимизации. – М.: Наука, 2000.
12. *Плишивцева Ю.Э.* Последовательная параметризация управляющих воздействий и полубесконечная оптимизация алгоритмов управления технологическими объектами с распределенными параметрами: дис. д-ра техн. наук. Самара, 2009. 416 с.
13. *Коллатц Л., Крабс В.* Теория приближений. Чебышевские приближения и их приложения. М.: Наука, 1978. 272 с.
14. *Irina N.* Parametric Optimization of Nonstationary Heat Conductivity Processes with Two Control Actions // XXI International Conference Complex Systems: Control and Modeling Problems (CSCMP), Samara, Russia, 2019. Pp. 271–276.
15. Численные методы: учеб. и практикум для академ. бакалавриата / под ред. У.Г. Пирумова. М.: Юрайт, 2017. 421 с.

Статья поступила в редакцию 20 ноября 2023 г.

TWO-CHANNEL OPTIMAL ENERGY-EFFICIENT CONTROL OF DISTRIBUTED PARAMETER SYSTEMS*

N.A. Ilina

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

E-mail: ilina.natalyaa@yandex.ru

Abstract. *A formulation and method for solving the problem of the energy-efficient two-channel programmed control of an object with distributed parameters with a given-precision uniform approximation of the resulting spatial distribution of the controlled quantity to the required state is proposed. Two internal controls on the power of heat sources in the electromagnetic field of the inductor are considered as control actions. Proposed solution approach involves a special-form preliminary parametrization procedure for control actions on finite-dimensional subsets of the terminal values of conjugate variables in the boundary-value problem of Pontryagin's maximum principle, in combination with the subsequent reduction to a semi-infinite optimization problem, which is solved with respect to the requisite parameter vector using the alternance method based on additional information about fundamental laws of the subject area. An example of optimal energy-efficient control of transient heat conduction, which is of independent interest, is given.*

Keywords: *optimal energy-efficient control, two-channel control, alternance method, semi-infinite optimization, induction heating.*

REFERENCES

1. *Butkovskii A.G.* Teoriya optimal'nogo upravleniya sistemami s raspredelennymi parametrami [Optimal Control Theory of Distributed Parameter Systems]. M.: Nauka, 1965. 474 p. (In Russian).
2. *Rapoport E.Ya.* Optimal'noe upravlenie sistemami s raspredelennymi parametrami [Optimal Control for Systems with Distributed Parameters]. M.: Vyssh. Shkola, 2009. 677 p. (In Russian).
3. *Ray W.H.* Advanced Process Control. New York, McGraw-Hill, 1981. 368 p.
4. *Rapoport E.Ya., Pleshivtseva Yu.E.* Optimal'noe upravlenie temperaturumi regimami induktsionnogo nagreva [Optimal Control of Induction Heating Processes]. M.: Nauka, 2012. 309 p. (In Russian).
5. *Pleshivtseva Yu.E., Rapoport E.Ya.* Optimal Energy-Efficient Programmed Control of Distributed Parameter Systems // *Izvestiya RAN. Teoriya i sistemami upravleniya*, 2020. No. 4. Pp. 42–57. (In Russian).
6. *Rapoport E.Ya., Pleshivtseva Yu.E.* Metody polubeskonechnoy optimizatsii v prikladnykh zadachakh upravleniya sistemami s raspredelennymi parametrami [Methods of semi-infinite optimization in applied problems of control of systems with distributed parameters]. M.: Nauka. 2021. 286 p. (In Russian).
7. *Rapoport E.Ya.* Strukturnoe modelirovanie ob'ektov i sistem upravleniya s raspredelennymi parametrami [Structural modeling of objects and systems with distributed parameters]. M.: Vishaya shkola, 2003. 299 p. (In Russian).
8. *Martynenko N.A., Pustynnikov L.M.* Konechnye integralnye preobrazovaniya i ih primeneniye k issledovaniyu sistem s raspredelennymi parametrami [Final engineering transformations and its application to the study of systems with distributed parameters]. M.: Nauka, 1986. 303 p. (In Russian).

Natalya A. Ilina (Ph.D. (Techn.)), engineer.

The study was supported by the Russian Science Foundation, grant no. 22-29-00180, <https://rscf.ru/en/project/22-29-00180/>

9. *Pontryagin L.S., Boltyanskiy V.G., Gamkrelidze R.V., Mischenko E.F.* Matematicheskaya teoriya optimalnykh protsessov [Mathematical theory of optimal processes]. M.: Nauka, 1969. 384 p. (In Russian).
10. *Pleshivtseva Yu.E., Rapoport E.Ya.* Method of sequential parameterization of control actions in boundary value problems of optimal control of systems with distributed parameters // *Izvestiya RAN. Teoriya i sistemami upravleniya*, 2009. No. 3. Pp. 22–33. (In Russian).
11. *Rapoport E.Ya.* Al'ternansnyy metod v prikladnykh zadachakh optimizatsii [Alternance Method for Solving Applied Optimization Problems]. M.: Nauka, 2000. 336 p. (In Russian).
12. *Pleshivtseva Yu.E.* Posledovatel'naya parametrizatsiya upravlyayushchih vozdeystvii i polubeskonechnaya optimizatsiya algoritmov upravleniya tekhnologicheskimi ob'ektami s raspredelennymi parametrami. Diss. ... dokt. techn. nauk. Samara, 2009. Pp. 416. (In Russian).
13. *Collatz L., Krabs W.* Teoriya priblizhenii. Chebyshevskie priblizheniya i ih prilozheniya [The theory of approximations. Chebyshev approximations and its applications]. M.: Nauka, 1978. 271 p. (In Russian).
14. *Ilina N.* Parametric Optimization of Nonstationary Heat Conductivity Processes with Two Control Actions // *XXI International Conference Complex Systems: Control and Modeling Problems (CSCMP)*. Samara. Russia, 2019. Pp. 271–276.
15. *Pirumov U.G.* Chislennyye metody: uchebnyy i praktikum dlya akademicheskogo bakalavriata [Numerical Methods: textbook and workshop for academic undergraduate studies]. M.: Urait, 2017. Pp. 421. (In Russian).

УДК 65.011.56

УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ КАДРОВОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ НЕФТЯНОЙ ОТРАСЛИ САМАРСКОЙ ОБЛАСТИ*

Е.П. Тупоносова, М.Ю. Ливищиц, П.А. Голованов

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

E-mail: alenushka1982@inbox.ru, mikhaillivshits@gmail.com, golovanov1951@inbox.ru

Аннотация. Решена задача построения динамических моделей в форме дифференциальных уравнений или передаточных функций, рассматриваемых как управляющие факторы и связывающих индикаторы эффективности нефтяной отрасли Самарской области, с показателями работы регионального вуза, который имеет в своем составе крупный институт нефтегазовых технологий. В качестве входных факторов моделей выбираются нормативные показатели деятельности Самарского государственного технического университета (СамГТУ). Эффективность регионального нефтяного кластера Самарской области оценивается установленными Федеральной службой государственной статистики (Росстатом) индикаторами, в частности количеством нефти, поступившей на переработку. Для разработки алгоритма управления процессом кадрового обеспечения нефтяной промышленности области решена задача структурно-параметрической идентификации процесса подготовки кадров в вузе по статистическим характеристикам в качестве экспериментальных данных. С использованием библиотеки типовых линейных моделей объектов управления Н.С. Райбмана построены математические модели процесса кадрового обеспечения отрасли в форме передаточных функций. Верификация математических моделей осуществляется путем сравнения с официальными статистическими данными. На основе полученных передаточных функций проводится синтез алгоритмов автоматического управления процессом кадрового обеспечения отрасли и регулирования в системе поддержки принятия управленческих решений.

Ключевые слова: динамическая модель, передаточная функция, система управления, ПИ-регулятор, вуз, кадровое обеспечение, нефтяная отрасль, математическое моделирование, выпуск студентов, число научных публикаций, выполнение НИР по грантам, генерация объектов интеллектуальной собственности.

Введение

Развитие нефтяной отрасли, совершенствование производства и применение новых инновационных технологий для работы предприятий невозможно без квалифицированных специалистов разных направлений и специальностей, которых

* Елена Павловна Тупоносова, старший преподаватель кафедры «Прикладная математика и информатика».

Михаил Юрьевич Ливищиц, доктор технических наук, заведующий кафедрой «Управление и системный анализ теплоэнергетических и социотехнических комплексов».

Павел Александрович Голованов, старший преподаватель кафедры «Управление и системный анализ теплоэнергетических и социотехнических комплексов».

готовят вузы. При этом подготовка специалистов вузом в настоящее время отражающих текущую потребность в специалистах. Для развития отрасли и повышения показателей эффективности нефтяной отрасли можно управлять ее кадровым обеспечением, учитывая как текущую, так и перспективную потребность в кадрах.

Вопросам определения факторов, влияющих на эффективность развития нефтяной отрасли, посвящено большое количество работ [1–12]. Использование систем и алгоритмов поддержки принятия решений при управлении промышленным предприятием, построение моделей для выполнения управленческих функций и управление в нефтяной отрасли рассматриваются в работах [6–12], в которых авторы анализируют модели и методы управления инновационной деятельностью и регулирования внутренних процессов предприятий нефтегазового сектора. В диссертационной работе [9] автор разрабатывает модели методом анализа иерархий теории нечетких множеств для управления проектами НИОКР и инновационными источниками развития нефтяной отрасли.

Одним из главных факторов стабильного развития предприятия, высокой конкурентоспособности, повышения прибыли и производительности труда является кадровый потенциал организации. В работах [13–23] рассмотрены вопросы управления кадровым потенциалом организации.

Однако несмотря на большое количество работ по управлению и моделированию, проблема повышения эффективности нефтяной отрасли за счет подготовки кадров в вузах изучена недостаточно.

Рассмотрим возможность управления кадровым обеспечением региональной нефтяной отрасли. Ограничимся анализом подготовки кадров высокой квалификации, которые для нефтяной отрасли Самарской области готовят вузы. При этом будем считать, что в исходных статистических данных за достаточный период времени при выборе одного управляющего фактора возможные изменения остальных учтены ретроспективно как случайная составляющая в исходной статистике, а также будем считать, что обеспечены необходимые условия функционирования подготовленных кадров на производстве.

С 1947 года значимую часть специалистов для нефтяной отрасли Самарской области и соседних регионов готовит Самарский государственный технический университет (СамГТУ), имеющий в своем составе крупный институт нефтегазовых технологий, который ежегодно выпускает около 25 % специалистов от общего количества выпускников СамГТУ. Вуз обеспечивает потребности нефтяной отрасли в специалистах различных направлений и профилей. Несмотря на то, что обучение в университете ведется на 5 факультетах, в 5 институтах и в высшей биологической школе [28], около 40 % выпущенных из вуза специалистов в дальнейшем работают в нефтяной отрасли.

Постановка и обоснование метода решения задачи структурно-параметрической идентификации

При разработке алгоритма управления кадровым обеспечением отрасли для повышения эффективности производства нефтепродуктов необходимо решить задачу структурно-параметрической идентификации процесса по статистическим характеристикам в качестве экспериментальных данных и построить динамическую модель входо-выходных характеристик в форме дифференциальных уравнений или передаточных функций, которая в общей постановке сводится к решению некорректной обратной задачи.

Задача состоит в определении оценки \bar{A} оператора A , переводящего случайный векторный входной сигнал $x(t)$ в случайный выходной скалярный сигнал:

$$y(t) = A \cdot [x(t)]; \quad (1)$$

$$\bar{y} = \bar{A} \cdot [x(t)]; \quad (2)$$

$$\bar{A} = \arg \min_A \rho(y, \bar{y}), \quad (3)$$

где \bar{y} – реакция модели объекта идентификации при воздействии на входной сигнал оценки \bar{A} оператора A [24, 25].

Для регуляризации некорректной задачи (1)–(3) сузим ее общую постановку и ограничимся поиском оператора \bar{A} в форме неоднородного линейного дифференциального уравнения с постоянными коэффициентами для каждого j -го входа x_j , $j = \overline{1, n}$, где n – количество входных переменных (входных факторов) и выхода y :

$$\sum_{i=0}^3 a_i \frac{d^i \bar{y}}{dt^i} = \sum_{\alpha=0}^2 b_\alpha \frac{d^\alpha x_j}{dt^\alpha}, \quad \frac{d^0 x_j}{dt^0} = x_j, \quad \frac{d^0 \bar{y}}{dt^0} = \bar{y} \quad (4)$$

с нулевыми начальными условиями

$$\bar{y}^{(i-1)}(0) = \bar{y}^{(i-2)} = \bar{y}(0) = 0. \quad (5)$$

Здесь $\bar{y}(t) = \bar{y}(t_0) - \bar{y}(t - t_0) = 0$, приращение расчетного показателя эффективности относительно его базового значения $\bar{y}(t_0)$ в момент времени $t = t_0$.

Этому дифференциальному уравнению отвечают передаточная функция

$$W(p) = \frac{\sum_{\alpha=0}^2 b_\alpha p^\alpha}{\sum_{i=0}^3 a_i p^i} \quad (6)$$

и импульсная переходная характеристика

$$g(t) = L^{-1}[W(p)], \quad (7)$$

которая в соответствии с принципом суперпозиции определяет выходную величину $y(t)$ интегралом свертки:

$$y(t) = \sum_{j=1}^n \int_0^\infty g_i(t) x_j(t - \tau) dt, \quad t \geq 0. \quad (8)$$

В соответствии с (6)–(8) идентификации оператора A в форме (4) сводится к идентификации импульсной переходной характеристики $g_i(t)$.

Для завершения процедуры регуляризации задачи идентификации перейдем к автокорреляционным $r_{xx}(t)$ функциям входных и выходных сигналов, введя допущение о стационарности и эргодичности рассматриваемого процесса на промежутке времени 5–10 лет в случае отсутствия глубоких возмущений в этом периоде (войны, кризисы, стихийные бедствия и т. п.):

$$r_{xx}(t) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x(t)x(t-\tau)dt, \quad (9)$$

и взаимным корреляционным функциям $r_{yx}(t)$:

$$r_{yx}(t) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{+T} x(t)Y(t-\tau)dt. \quad (10)$$

Здесь T – интервал времени наблюдения.

В этих допущениях корреляционные и импульсные переходные характеристики функции входных и выходных сигналов связаны уравнением Винера – Хопфа:

$$r_{yx}(t) = \int_0^{\infty} g_i(t)r_{xx}(t-\tau)dt, \quad t \geq 0. \quad (11)$$

Сузим область поиска $g_i(t)$ до компактного множества и будем отыскивать решение (3) на достаточно широком, но счетном множестве типовых значений $r_{yx}^T(t)$ и $r_{xx}^T(t)$, сведенных в таблицу для широкого круга типовых объектов вида (4) [24]. При этом задача становится корректной, а значит, устойчивой по входным данным, и незначительное расхождение между реальными $r_{xx}(t)$ и $r_{yx}(t)$ и табличными значениями $r_{yx}^T(t)$ и $r_{xx}^T(t)$ не приведет к существенной ошибке в определении импульсной переходной характеристики $g_i(t)$.

Для идентификации будем использовать дифференциальное уравнение, связывающее автокорреляционные $r_{xx}(t)$ и взаимные корреляционные $r_{yx}(t)$ функции, аналогичное (4) для линейных стационарных объектов:

$$\sum_{i=0}^3 a_i \frac{d^i r_{yx}(t)}{dt^i} = \sum_{\alpha=0}^2 b_{\alpha} \frac{d^{\alpha} r_{\alpha xx}(t)}{dt^{\alpha}},$$

$$\frac{d^{0\alpha} r_{\alpha xx}}{dt^0} = r_{\alpha xx}, \quad \frac{d^{0i} r_{yx}}{dt^0} = r_{yx}. \quad (12)$$

В силу того, что рассматриваемые объекты отыскиваются из класса устойчивых, на коэффициенты моделей (4) и (12) согласно критерию устойчивости Раussa – Гурвица накладывается ограничение (13):

$$a_3 > 0, \quad a_1 > 0, \quad a_2 > 0, \quad a_1 a_2 > a_3. \quad (13)$$

Кроме того значения используемых коэффициентов a_i и b_{α} в (4) и в (12) лежат в пределах (14):

$$a_{i \min} \leq a_i \leq a_{i \max}, \quad b_{\alpha \min} \leq b_{\alpha} \leq b_{\alpha \max}, \quad (14)$$

определяемых условиями высокой степени затухания колебательного характера переходного процесса.

Таким образом, условия (4), (12) и ограничения вида (13), (14) определяют совместно с библиотекой таблиц [24] компактную область корректности задачи идентификации (2), (3).

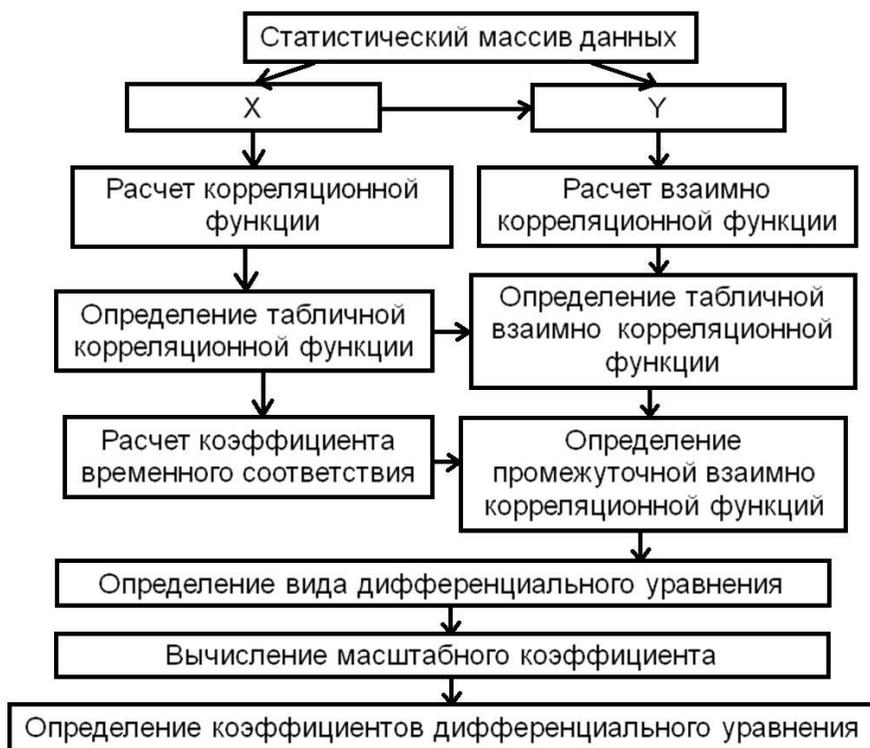


Рис. 1. Алгоритм структурно-параметрической идентификации объекта управления

1. Выбранный метод позволяет с использованием экспериментально определенных корреляционных функций на основе статистической информации и с помощью библиотеки типовых линейных моделей [24] найти импульсную переходную характеристику системы [24–27]. На рис. 1 представлен алгоритм структурно-параметрической идентификации. По известным статистическим данным определяются экспериментальные автокорреляционные $r^{\vartheta}_{xx}(t)$ и взаимные корреляционные функции и $r^{\vartheta}_{yx}(t)$.

2. Из достаточно полной библиотеки таблиц типовых линейных моделей [24] выбирается наиболее близкая по форме кривая к $r^{\vartheta}_{yx}(t)$ автокорреляционной функции $r^T_{xx}(t)$.

3. Для обеспечения временного соответствия экспериментальной $r^{\vartheta}_{xx}(t)$ и табличной $r^T_{xx}(t)$ автокорреляционной функций вычисляется масштабный временной коэффициент k_t :

$$k_t = \frac{T_T}{T_{\vartheta}}, \quad (15)$$

где T_T и T_{ϑ} – отрезки оси времени на графиках кривых $r^T_{xx}(t)$ и $r^{\vartheta}_{xx}(t)$ соответственно от нуля до первого пересечения кривых с временной осью.

4. Выбранной табличной автокорреляционной функции $r_{xx}^T(t)$ соответствуют набор графиков взаимных корреляционных функций $r_{yx}(t)$.

5. С учетом коэффициента k_t (пункт 3) уточняется промежуточная взаимная корреляционная функция выходной и входной переменных $r_{yx}^{np}(t)$:

$$r_{yx}^{np}(t) = k_t \cdot r_{yx}^{\ominus} \left(\frac{t}{k_t} \right). \quad (16)$$

6. По таблицам, предложенным профессором Н.С. Райбманом [24], выбирается табличная взаимная корреляционная функция $r_{yx}^T(t)$ выходной и входной переменных, близкая по форме к $r_{yx}^{np}(t)$.

7. В соответствии с определенной табличной взаимной корреляционной функцией $r_{yx}^T(t)$ определяются структура и коэффициенты дифференциального уравнения (12) и конкретные значения коэффициентов дифференциального уравнения (12).

8. Вычисляется масштабный коэффициент:

$$k_{yx}^M = \frac{\max r_{yx}^{np}(t) \cdot \max r_{xx}^T(t)}{\max r_{yx}^T(t) \cdot \max r_{xx}^{\ominus}(t)}. \quad (17)$$

9. В зависимости от найденных значений k_t (пункт 3) и k_{yx}^M (пункт 8) корректируются по формулам коэффициенты дифференциального уравнения (12) (в зависимости от порядка объекта).

10. После определения вида структуры и параметров дифференциального уравнения (12) определяется передаточная функция объекта управления.

После получения корреляционной динамической математической модели в форме дифференциальных уравнений или передаточных функций производится верификация математической модели для сравнения экспериментальных и модельных данных.

Полученные верифицированные модели предполагается использовать для динамического управления. Математическим аппаратом для формирования алгоритма принятия такого рода управленческих решений могут служить методы теории автоматического управления.

На этой основе появляется возможность разработки различных схем и алгоритмов управления кадровым потенциалом и трансформации действий топ-менеджеров в эти алгоритмы через систему поддержки принятия решений.

Моделирование управления кадровым потенциалом региональной нефтяной отрасли

Построим математическую модель, связывающую показатели подготовки кадров в вузе с индикаторами эффективности регионального нефтяного кластера Самарской области. Входными величинами модели нефтяной отрасли будем считать показатели деятельности вуза, влияющие на отрасль: выпуск студентов (S , чел.), общее число научных публикаций (P , шт.), выполнение НИР по грантам (G , ед.) и генерация объектов интеллектуальной собственности (I , ед.), а выходной величиной – один из индикаторов эффективности нефтяной промышленности, установленный Федеральной службой государственной статистики (Рос-

статом), в Самарской области – объем нефти, поступившей на переработку (Y_1 , тыс. т).

С помощью корреляционных функций получаем 4 передаточные функции вида (6) в соответствии с описанным выше алгоритмом (см. рис. 1), связывающие динамику изменения объема нефти, поступившей на переработку Y_1 , как индикатор эффективности работы областной нефтяной отрасли, с показателями работы СамГТУ (табл. 1) [29].

Таблица 1

Передаточные функции

Y_1	Объем нефти, поступившей на переработку
x_1	$W_{y_1x_1}(p) = \frac{0,00032 \cdot (4375p^2 - 2500p + 1)}{p^3 + 3,5p^2 + 0,025p + 1}$
x_2	$W_{y_1x_2}(p) = \frac{0,0196 \cdot (16p^2 + 40p + 1)}{6,4p^3 + 5,6p^2 + 1,6p + 1}$
x_3	$W_{y_1x_3}(p) = \frac{16 \cdot (5,625p + 1)}{64p^2 + 8p + 1}$
x_4	$W_{y_1x_4}(p) = \frac{90 \cdot (10,92p^2 + 49,61p + 1)}{1250p^3 + 875p^2 + 200p + 1}$

Динамическая модель кадрового обеспечения нефтяного кластера как объекта управления определяется как реакция на сумму входов:

$$y(t) = \sum_{j=1}^4 \int_{t-T}^t g_j(\tau) x_j(t-\tau) d\tau. \quad (18)$$

Сравнение экспериментальных и модельных исходных статистических данных объема нефти, поступившей на переработку, представлено на рис. 2.

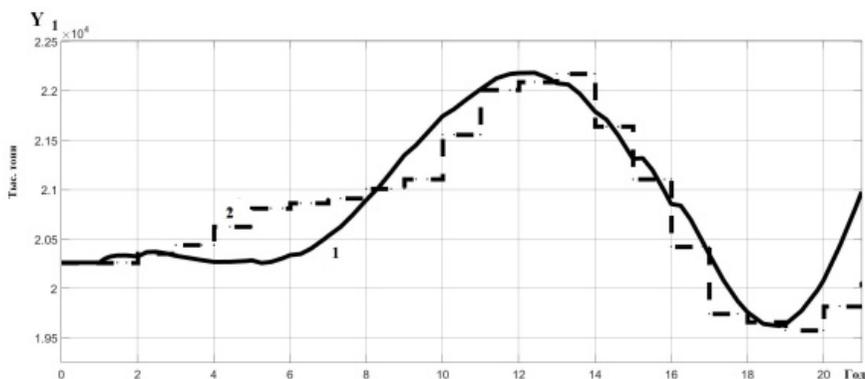


Рис. 2. Модельные (1) и статистические данные (2) Y_1

Полученные в пакете MATLAB верифицированные модели (см., например, рис. 2) демонстрируют хорошую сходимость с реальными данными. Модели предназначены для использования в качестве объекта управления для синтеза

алгоритма динамического управления кадровым потенциалом нефтяной отрасли путем формирования региональной компоненты финансирования вуза через финансирование его ресурсов путем формирования регионом выходных показателей университета.

При этом основное финансирование СамГТУ идет из федерального бюджета с учетом регионального отраслевого заказа. Поскольку значительная доля самарского промышленного потенциала связана с нефтью, нефтяной факультет является крупнейшим в университете и большинство его выпускников идет работать в нефтяную отрасль, то и финансирование СамГТУ кроме федерального потока определяется целевыми вложениями нефтяных предприятий региона в расходы вуза на проведение НИР в интересах отрасли и т. п. Существующие и желательные показатели эффективности отрасли сравниваются между собой, и формируется проект части регионального заказа вузу в форме требуемого значения соответствующих показателей его деятельности.

Динамическое влияние управляемых показателей деятельности СамГТУ на показатель эффективности нефтяной отрасли Самарской отрасли – объем нефти, поступивший на переработку, – оценим с помощью моделирования в пакете Simulink в среде MATLAB (рис. 3).

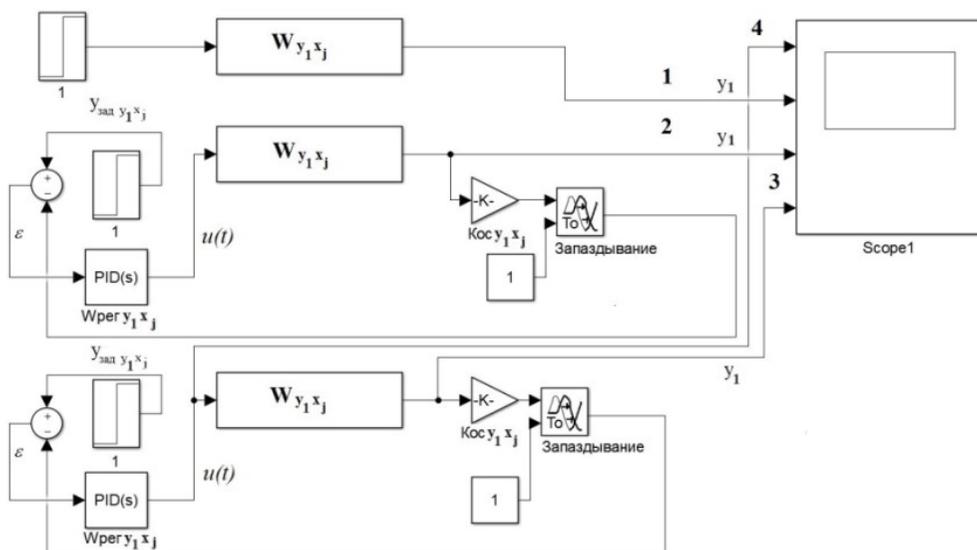


Рис. 3. Схема моделирования алгоритма динамического управления для настройки регуляторов

На рис. 3 обозначены: реакция Y_1 объекта на единичное ступенчатое воздействие – 1 (без регулирования); выход Y_1 для различных вариантов настройки регулятора при единичном ступенчатом задании – 2 и 3; автоматически сформированный ПИ-регулятором вход объекта при лучших результатах настройки регулятора – 4.

Каждая передаточная функция $W_{y_1x_j}(p)$ (см. табл. 1) связывает показатель y_1 эффективности регионального нефтяного кластера с одним из j -х входов, представляющих выходные индикаторы деятельности вуза, где $j = \overline{1,4}$. Коэффициент обратной связи $K_{oc_{y_1x_j}}$ отражает долю дохода, который затрачивается нефтяной отраслью на формирование желательной траектории $y_{зад\ y_1x_j}$ в соответствии с передаточной функцией регулятора $W_{рег\ y_1x_j}(p)$ роста или стабилизации этого показателя на заданном промежутке времени. Задание $y_{зад\ y_1x_j}$ устанавливается для каждого выхода по j -му входу $j = \overline{1,4}$ (на рис. 3 – относительная единица), и на регулятор $W_{рег\ y_1x_j}(p)$ поступает разность $\varepsilon = y_{зад\ y_1x_j} - y_1$ между заданным $y_{зад\ y_1x_j}$ и текущим y_1 значениями, а заданное значение $y_{зад\ y_1x_j}$ определяется общими требованиями роста промышленности. Годовое запаздывание связано с особенностями подведения годовых финансовых результатов отрасли.

В рассматриваемой системе в качестве базового закона регулирования выбираем пропорционально-интегральный (ПИ) закон регулирования, где пропорциональная составляющая регулятора имеет смысл непрерывного ежемесячного финансирования вуза с целью изменения его j -го показателя, а интегральная составляющая соответствует отложенному накопленному финансированию для изменения этого же показателя.

Рассмотрим сначала влияние в отдельности каждого из четырех входов на динамику объема нефти, поступившей на переработку, и определим настройки регулятора.

Анализ результатов моделирования (рис. 4) демонстрирует возможности управления. Обеспечивается рост объема нефти, поступившей на переработку (кривые 2, 3), по сравнению с нерегулируемой траекторией (кривая 1). Для увеличения роста объема нефти, поступившей на переработку, будем использовать кривые с более длительным ростом.

При моделировании в MATLAB используем звено «пропорционально-интегральный регулятор (ПИ-регулятор)»:

$$u(t) = P + I = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt, \quad (19)$$

где $u(t)$ – закон регулирования; P – пропорциональная составляющая; I – интегральная составляющая; K_p – коэффициент пропорциональности, где

$$K_p = K_{y_kx_j}; K_i – коэффициент интегрирования, где $K_i = \frac{K_{y_kx_j}}{T_{y_kx_j}}.$$$

Настроечные параметры коэффициента пропорциональности (K_p), коэффициента интегрирования (K_i) ПИ-регуляторов и коэффициент обратной связи (K_{oc}) представлены в табл. 2.

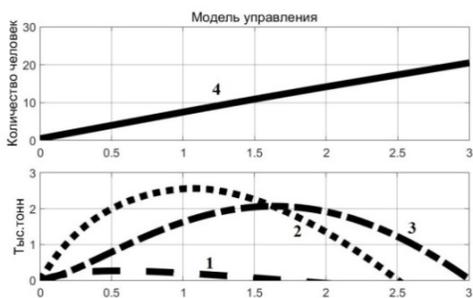


Рис. 4. Моделирование канала $S - Y_1$

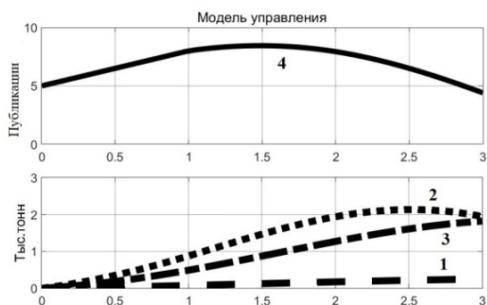


Рис. 5. Моделирование канала $P - Y_1$

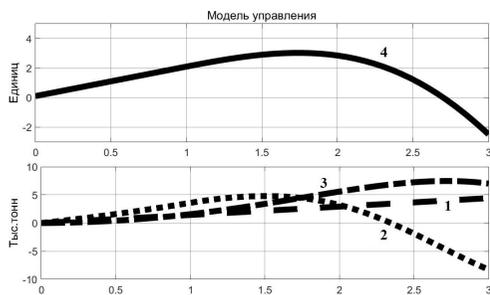


Рис. 6. Моделирование канала $G - Y_1$

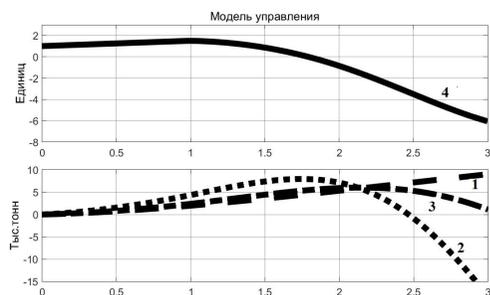


Рис. 7. Моделирование канала $I - Y_1$

Таблица 2

Настройки ПИ-регуляторов и K_{OC} для Y_1

№	$X_1 = S$	$X_2 = P$	$X_3 = G$	$X_4 = I$
1	Без регулирования	Без регулирования	Без регулирования	Без регулирования
2	$K_p = 5, K_i = 7$ $K_{OC} = 0,05$	$K_p = 10, K_i = 3$ $K_{OC} = 1$	$K_p = 2, K_i = 1$ $K_{OC} = 1$	$K_p = 2, K_i = 0,5$ $K_{OC} = 1$
3	$K_p = 0,5, K_i = 7$ $K_{OC} = 0,05$	$K_p = 5, K_i = 3$ $K_{OC} = 1$	$K_p = 0,1, K_i = 2$ $K_{OC} = 1$	$K_p = 1, K_i = 0,5$ $K_{OC} = 1$
4	$X_1 = S$	$X_2 = P$	$X_3 = G$	$X_4 = I$

Видно, что за счет кадрового обеспечения вуза по алгоритму можно обеспечить рост объема нефти, поступившей на переработку:

- в течение трех лет при линейном нарастании количества принятых молодых специалистов обеспечивается рост объема нефти, поступившей на переработку, а дальнейшее увеличение числа выпуска специалистов приведет к снижению показателя, очевидно, за счет оттока средств на их адаптацию;

- увеличение финансирования числа публикаций по рассматриваемой методике в течение 1,5 лет ведет к росту объема нефти, поступившей на переработку, интенсивность которого повышается с увеличением коэффициента пропорциональности;

- финансирование НИР по грантам и генерации объектов интеллектуальной собственности необходимо увеличивать в течение двух лет.

На рассматриваемом временном интервале входные факторы по-разному влияют на эффективность нефтяной отрасли, и в дальнейшем, применяя по каждому каналу разные весовые коэффициенты и суммируя реакцию всех четырех входов при различных заданиях и настройках ПИ-регулятора, можно обеспечить желательную траекторию развития региональной нефтяной отрасли.

Рассмотрим суммарное влияние на отраслевые показатели эффективности нефтяной промышленности Самарской области всех четырех показателей деятельности СамГТУ при значениях весовых коэффициентов $k_{x_1} = 0,2$, $k_{x_2} = 0,2$, $k_{x_3} = 0,3$, $k_{x_4} = 0,3$, которые содержат в скрытой форме затраты на соответствующую часть кадрового обеспечения. Проблема определения этих коэффициентов решается известными методами (МАИ, DEA) [30]. Схема моделирования алгоритма управления показателем эффективности по j -му входу в программном пакете Simulink в среде MATLAB представлена на рис. 8.

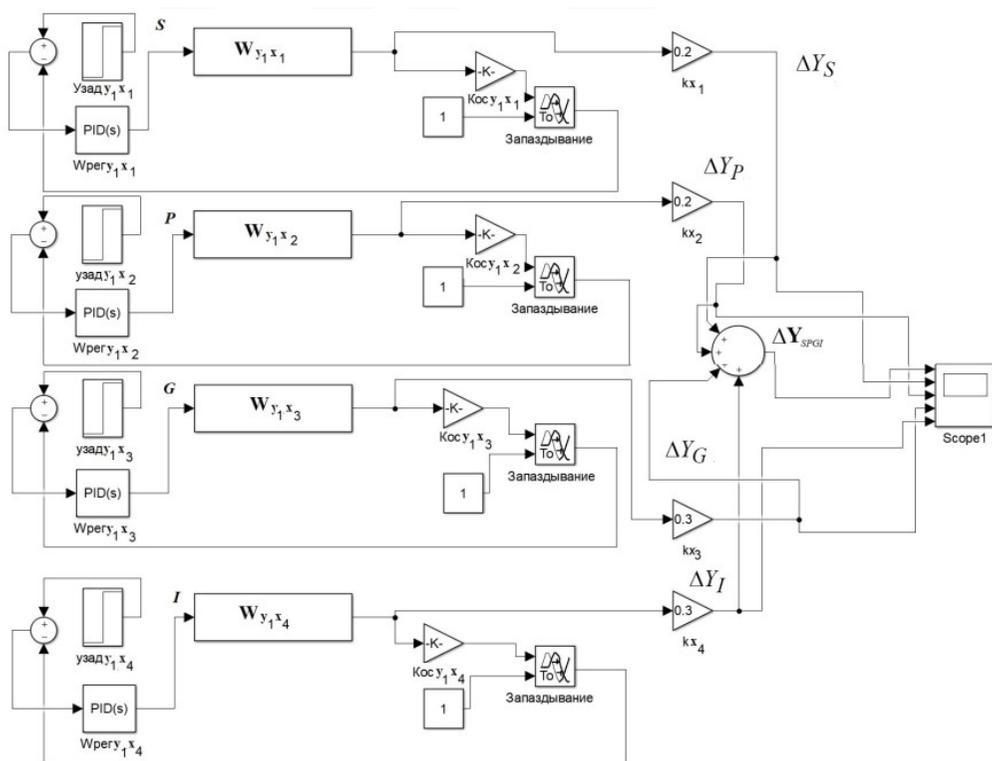


Рис. 8. Схема динамического моделирования алгоритма управления

Настроечные параметры ПИ-регуляторов показаны в табл. 2, а заданные значения $y_{зад}$ – в табл. 3.

Таблица 3

Настройки $y_{зад}$ для Y_1

$X_1 = S$	$X_2 = P$	$X_3 = G$	$X_4 = I$
10	20	10	20

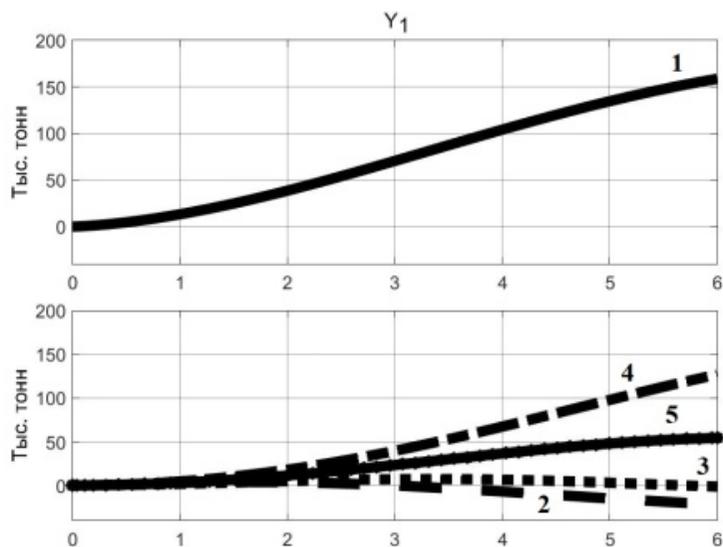


Рис. 9. Моделирование суммарного автоматизированного управления Y_1

На рис. 9 представлен график роста показателя объема нефти, поступившей на переработку Y_1 , при совместном воздействии входных величин (кривая 1), ΔY_S (кривая 2), ΔY_P (кривая 3), ΔY_G (кривая 4) и ΔY_I (кривая 5).

Результаты моделирования демонстрируют возможность кадрового управления для обеспечения стабильного роста объема нефти, поступившей на переработку в Самарской области.

Заключение

В работе предложена методика структурно-параметрической идентификации корреляционной динамической модели кадрового обеспечения для региональной нефтяной отрасли. Регуляризация соответствующей некорректной структурно-параметрической задачи идентификации осуществляется путем последовательного сужения до компакта области идентификации. Проведенная верификация математической модели показала хорошую сходимость данных.

Разработано алгоритмическое обеспечение схемы управления нефтяной отраслью в форме системы поддержки принятия решения, выполненное как пропорционально-интегральный регулятор. При этом в качестве исходных данных используется набор статистической информации со значительной случайной составляющей. Полученные передаточные функции предназначены для использования алгоритма управления кадровым потенциалом региональной нефтяной отрасли. Результаты моделирования суммарного влияния рассматриваемых показателей деятельности СамГТУ на отраслевой индикатор эффективности нефтяной промышленности Самарской области демонстрируют возможность стабильного роста объема нефти, поступившей на переработку в Самарской области, за счет кадрового управления в среднем на 29 % в год.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Кутернин М.И., Силаев А.А.* Повышение эффективности инвестиционных программ развития нефтяной отрасли региона // Финансовые рынки и банки. 2022. № 7. С. 41–46.
2. *Li J., Xiao X., Boukouvala F. [et al.]* Data-driven mathematical modeling and global optimization framework for entire petrochemical planning operations // AIChE Journal. 2016. Vol. 62, No. 9. Pp. 3020–3040.
3. *Кузнецов Н.П., Ахмадуллин И.Б., Сабуров А.К.* Пути повышения эффективности нефтяной отрасли России // Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России. 2019. № 3 (143). С. 43–53.
4. *Смирнова Н.В., Пикалова Т.А.* Повышение эффективности деятельности предприятий нефтяной отрасли за счет применения инструмента бенчмаркинга // Экономика и предпринимательство. 2015. № 5–1 (58). С. 458–461.
5. *Кулаков М.Ю.* Повышение эффективности использования ресурсного потенциала нефтеперерабатывающего комплекса на основе современных методов управления: Дис. ... канд. экон. наук. М., 2006. 164 с.
6. *Суцеский Е.А.* Специфика функционирования нефтяной отрасли в России, современные методы управления производством в нефтяной отрасли // Студенческий вестник. ООО «Интернаука». М., 2020. № 4–3 (102). С. 82–88.
7. *Затик О.С.* Алгоритмы и программные средства имитационного моделирования для управления эколого-экономическими процессами предприятий нефтяной отрасли на основе метода компонентных цепей: Дис. ... канд. техн. наук. Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники. Томск, 2011. 187 с.
8. *Дмитриева О.М.* Модель управления инновационной деятельностью нефтяных компаний // Проблемы экономики и управления нефтегазовым комплексом. 2009. № 12. С. 19–25.
9. *Онопrienко Ю.Г.* Разработка моделей и методик для управления инновационными источниками развития на основе методов многокритериального принятия решений (на примере нефтяной отрасли): Дис. ... канд. экон. наук. Волгоград, 2006. 176 с.
10. *Постников В.М., Черненький В.М.* Методы принятия решений в системах организационного управления: Учеб. пособие. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2014. 205 с.
11. *Корнаков А.Н., Цветков В.Я.* Поддержка принятия решений при управлении промышленным предприятием // Современные наукоемкие технологии. 2010. № 1. С. 94–95.
12. *Мескон М., Альберт М., Хедоури Ф.* Основы менеджмента. М.: ДЕЛЮ, 1997. С. 493.
13. *Катковская И.В.* Условия и инструменты управления кадровым потенциалом организации // Молодой ученый. 2016. № 15 (119). С. 301–305.
14. *Байков Н.М.* Кадровый потенциал органов власти: опыт социологического анализа. Хабаровск: ДВАГС, 2005. 254 с.
15. *Травин В.В.* Основы кадрового менеджмента: Практ. пособие. 3-е изд., исп. и доп. М., 2005. 516 с.
16. *Кибанов А.Я.* Управление персоналом организации: Учебник / под ред. А.Я. Кибанова. М.: ИНФРА-М, 2007. 638 с.
17. *Сулемов В.А.* Государственная кадровая политика в современной России. М., 2005. 356 с.
18. *Шаховой В.А.* Кадровый потенциал системы управления. М., 2004. 268 с.
19. *Коптякова С.В., Гафурова В.М., Захарова Я.М.* Совершенствование управленческого инструментария повышения эффективности использования трудового потенциала на предприятиях нефтедобывающей отрасли // Вопросы управления. 2022. № 4 (77). С. 47–60.
20. *Ayari A., AlHamaqi A.* Investigation of Organizational Commitment and Turnover Intention: A Study of Bahraini Oil and Gas Industry. Employ Respons Rights J 34, 123–138 (2022).
21. *Hazini K., Sohrobi M.* Strategic human resource management and its challenges in oil & gas industry projects. In 12th International Institute for Energy Studies (IIES) Oil & Gas International, July. 2007.
22. *Родионов Д.Г., Данияли С.М.* Профессиональные кадры в системе ключевых факторов повышения эффективности НГК Ирана // Kant. 2020. № 2 (35). С. 49–55. DOI 10.24923/2222-243X.2020-35.9.
23. *Zavalyova E.K., Kucherov D.G., Kosheleva S.V., Tsybova V.S., Alsufyev A.I.* Analysis of Effective Utilization of Human Capital (by example of the Russian oil and gas companies). Working Paper #1(E). 2015. Graduate School of Management, St. Petersburg State University: SPb, 2014.
24. *Анисимов С.А., Зайцева И.С., Райбман Н.С., Яралов А.А.* Типовые линейные модели объектов управления / Под ред. Н.С. Райбмана. М.: Энергоатомиздат, 1983. 264 с.

25. Балакирев В.С., Дворецкий С.И., Аниськина Н.Н., Акишин В.Н. Математическое моделирование технологических процессов: Учеб. пособие / под ред. В.С. Балакирева. Ярославль: ИД Н.П. Пастухова, 2018. 350 с.
26. Голованов П.А., Ливищ М.Ю., Тупоносова Е.П. Динамическое моделирование и управление кадровым обеспечением регионального производства // Всероссийская научная конференция по проблемам управления в технических системах. 2023. Т. 1. С. 196–199.
27. Голованов П.А., Ливищ М.Ю., Тупоносова Е.П. Идентификация модели подготовки кадров для нефтяного кластера Самарской области как объекта управления // Математические методы в технологиях и технике. СПб., 2022. № 2. С. 24–31.
28. Самарский государственный технический университет [Электронный ресурс]. URL: <https://samgtu.ru> (дата обращения 01.10.2023).
29. Голованов П.А., Тупоносова Е.П. Построение передаточных функций, отражающих влияние деятельности вуза на производство нефтепродуктов в Самарской области // Перспективные информационные технологии (ПИТ 2022): труды Международной научно-технической конференции. Самара, 18–21 апреля 2022 года. Самара: Издательство Самарского научного центра РАН, 2022. С. 390–393.
30. Дилигенский Н.В., Гаврилова А.А., Цапенко М.В. Построение и идентификация математических моделей производственных систем. Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2005. 126 с.

Статья поступила в редакцию 23 октября 2023 г.

MANAGING THE STAFFING PROCESS OF THE SAMARA REGION OIL INDUSTRY*

E.P. Tuponosova, M.Y. Livshits, P.A. Golovanov

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

E-mail: alenushka1982@inbox.ru, mikhaillivshits@gmail.com, golovanov1951@inbox.ru

Abstract. *The problem of constructing dynamic models in the form of differential equations or transfer functions linking the performance indicators of the oil industry of the Samara region with the performance indicators of a regional university with a large institute of oil and gas technologies, considered as the controlling factors of staffing the oil industry, is solved. The input factors of the model are the normative performance indicators of the Samara State Technical University (SamSTU). The effectiveness of the regional oil cluster of the Samara region is assessed by indicators established by the Federal State Statistics Service (Rosstat), in particular, the amount of oil received for processing. For the algorithm of personnel management of the oil industry of the region, the problem of structural and parametric identification of the personnel training process at the university based on statistical characteristics as experimental data is solved. Using the library of typical linear models of management objects by N.S. Raibman, mathematical models of the process of staffing the industry in the form of transfer functions are constructed. Verification of mathematical models is carried out by comparison with official statistical data. On the basis of the obtained transfer functions, the synthesis of algorithms for automatic management of the personnel management process of the regulatory industry in the management decision support system is carried out.*

Keywords: *dynamic model, transfer function, control system, PI controller, university, staffing, oil industry, mathematical modeling, student graduation, number of scientific publications, research on grants, generation of intellectual property objects.*

REFERENCES

1. *Kuternin M.I., Silaev A.A.* Povyshenie effektivnosti investicionnyh program razvitiya neftyanoj otrasli regiona [Increasing the efficiency of investment programs for the development of the regional oil industry] // *Finansovye rynki i banki*. 2022. № 7. Pp. 41–46. (In Russian)
2. *Li J., Xiao X., Boukouvala F. [et al.]*. Data-driven mathematical modeling and global optimization framework for entire petrochemical planning operations // *AIChE Journal*. 2016. Vol. 62, No. 9. Pp. 3020–3040.
3. *Kuznecov N.P., Ahmadullin I.B., Saburov A.K.* Puti povysheniya effektivnosti neftyanoj otrasli Rossii [Ways to improve the efficiency of the Russian oil industry] // *Oboronnyj kompleks – nauchno-tekhnicheskomu progressu Rossii*. 2019. № 3 (143). Pp. 43–53. (In Russian)
4. *Smirnova N.V., Pikalova T.A.* Povyshenie effektivnosti deyatelnosti predpriyatij neftyanoj otrasli zaschet primeneniya instrumenta benchmarkinga [Increasing the efficiency of oil industry enterprises through the use of a benchmarking tool] // *Ekonomika i predprinimatel'stvo*. 2015. № 5–1 (58). Pp. 458–461. (In Russian)
5. *Kulakov M.Yu.* Povyshenie effektivnosti ispol'zovaniya resursnogo potentsiala neftepererabatyvayushchego kompleksa na osnove sovremennyh metodov upravleniya [Increasing the efficiency of using the resource potential of the oil refining complex based on modern management methods]: Dis. ... kand. ekon. nauk. M., 2006. 164 s. (In Russian)
6. *Sushchevskij E.A.* Specifika funkcionirovaniya neftyanoj otrasli v Rossii, sovremennyye metody upravleniya proizvodstvom v neftyanoj otrasli [Specifics of the functioning of the oil industry in Russia, modern methods of production management in the oil industry] // *Studencheskij vestnik. OOO "Internauka"*. M., 2020. № 4–3 (102). Pp. 82–88. (In Russian)

* *Elena P. Tuponosova, Senior Lecturer.*
Mikhail Y. Livshits (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Pavel A. Golovanov, Senior Lecturer.

7. *Zatik O.S.* Algoritmy i programmnye sredstva imitacionnogo modelirovaniya dlya upravleniya ekologo-ekonomicheskimi processami predpriyatij neftyanoj otrasli na osnove metoda komponentnyh cepej [Algorithms and simulation modeling software for managing environmental and economic processes of oil industry enterprises based on the component chain method]: Dis. ... kand. tekhn. nauk. Tomsk. gos. un-t sistem upr. i radioelektroniki. Tomsk, 2011. 187 p. (In Russian)
8. *Dmitrieva O.M.* Model' upravleniya innovacionnoj deyatel'nost'yu neftyanyh kompanij [Model for managing innovative activities of oil companies] // Problemy ekonomiki i upravleniya neftegazovym kompleksom. 2009. № 12. Pp. 19–25. (In Russian)
9. *Onoprienko Yu.G.* Razrabotka modelej i metodik dlya upravleniya innovacionnymi istochnikami razvitiya na osnove metodov mnogokriterial'nogo prinyatiya reshenij (naprimere neftyanoj otrasli) [Development of models and methods for managing innovative sources of development based on multi-criteria decision-making methods (using the example of the oil industry)]: Dis. ... kand. ekon. nauk. Volgograd, 2006. 176 p. (In Russian)
10. *Postnikov V.M., Chernen'kij V.M.* Metody prinyatiya reshenij v sistemah organizacionnogo upravleniya [Decision-making methods in organizational management systems]. Ucheb. posobie. M.: MGТУ im. N.E. Bauman, 2014. 205 p. (In Russian)
11. *Kornakov A.N., Cvetkov V.Ya.* Podderzhka prinyatiya reshenij pri upravlenii promyshlennym predpriyatiem [Decision support for industrial enterprise management] // Sovremennye naukoemkie tekhnologii. 2010. № 1. Pp. 94–95. (In Russian)
12. *Meskon M., Al'bert M., Hedouri F.* Osnovy menedzhmenta [Fundamentals of Management]. M.: DELO, 1997. P. 493.
13. *Katkovskaya I.V.* Usloviya i instrumenty upravleniya kadrovym potencialom organizacii [Conditions and tools for managing the organization's human resources potential] // Molodochuchenyj. 2016. № 15 (119). Pp. 301–305. (In Russian)
14. *Bajkov N.M.* Kadrovyy potencial organov vlasti: opyt sociologicheskogo analiza [Personnel potential of government bodies: experience of sociological analysis]. Habarovsk: DVAGS, 2005. 254 p. (In Russian)
15. *Travin V.V.* Osnovy kadrovogo menedzhmenta [Fundamentals of HR Management]. Prakticheskoe posobie. 3-e izd., isp. i dop. M., 2005. 516 p. (In Russian)
16. *Kibanov A.Ya.* Upravlenie personalom organizacii [Organizational personnel management]. Uchebnik pod red. A.Ya. Kibanova. M.: INFRA-M, 2007. 638 p. (In Russian)
17. *Sulemov V.A.* Gosudarstvennaya kadrovaya politika v sovremennoj Rossii [State personnel policy in modern Russia]. M., 2005. 356 p. (In Russian)
18. *Shahovoj V.A.* Kadrovyy potencial sistemy upravleniya [Personnel potential of the management system]. M., 2004. 268 p. (In Russian)
19. *Koptyakova S.V., Gafurova V.M., Zaharova Ya.M.* Sovershenstvovanie upravlencheskogo instrumentariya povysheniya effektivnosti ispol'zovaniya trudovogo potenciala na predpriyatiyah nefteobrabatovayushchej otrasli [Improving management tools to increase the efficiency of using labor potential at oil industry enterprises] // Voprosy upravleniya. 2022. № 4 (77). Pp. 47–60. (In Russian)
20. *Ayari A., AlHamaqi A.* Investigation of Organizational Commitment and Turnover Intention: A Study of Bahraini Oil and Gas Industry. *Employ Respons Rights J* 34, 123–138 (2022).
21. *Hazini K., Sohrabi M.* Strategic human resource management and its challenges in oil & gas industry projects. In 12th International Institute for Energy Studies (IIES) Oil & Gas International, July, 2007.
22. *Rodionov D.G., Daniyali S.M.* Professional'nye kadryv sisteme klyuchevyh faktorov povysheniya effektivnosti NGK Irana [Professional personnel in the system of key factors for increasing the efficiency of the oil and gas complex of Iran] // Kant. 2020. № 2 (35). Pp. 49–55. (In Russian)
23. *Zavyalova E.K., Kucherov D.G., Kosheleva S.V., Tsybova V.S., Alsufyev A.I.* Analysis of Effective Utilization of Human Capital (by example of the Russian oil and gas companies). Working Paper № 1(E). 2015. Graduate School of Management, St. Petersburg State University: SPb, 2014.
24. *Anisimov S.A., Zajceva I.S., Rajbman N.S., Yaralov A.A.* Tipovye linejnye modeli ob"ektov upravleniya [Typical linear models of control objects]. Pod. red. Rajbmana N.S. M.: Energoatomizdat, 1983. 264 p. (In Russian)
25. *Balakirev V.S., Dvoreckij S.I., Anis'kina N.N., Akishin V.N.* Matematicheskoe modelirovanie tekhnologicheskikh processov [Mathematical modeling of technological processes]. Ucheb. posobie pod red. V.S. Balakireva. Yaroslavl': ID N.P. Pastuhova, 2018. 350 p. (In Russian)

26. *Golovanov P.A., Livshic M.Yu., Tuponosova E.P.* Dinamicheskoe modelirovanie i upravlenie kadrovym obespecheniem regional'nogo proizvodstva [Dynamic modeling and management of staffing for regional production] // Vserossiyskaya nauchnaya konferenciya po problemam upravleniya v tekhnicheskikh sistemah. 2023. T. 1. Pp. 196–199. (In Russian)
27. *Golovanov P.A., Livshic M.Yu., Tuponosova E.P.* Identifikaciya modeli podgotovki kadrov dlya neftyanogo klastera Samarskoj oblasti kak ob'ekta upravleniya [Identification of a personnel training model for the oil cluster of the Samara region as a management object] // Matematicheskie metody v tekhnologiyah i tekhnike. Sankt-Peterburg. 2022. № 2. P. 24–31. (In Russian)
28. Samarskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet. URL: <https://samgtu.ru> (accessed 01.10.2023).
29. *Golovanov P.A., Tuponosova E.P.* Postroenie peredatochnyh funkcij, otrazhayushchih vliyanie deyatel'nost' vuza na proizvodstvo nefteproduktov v Samarskoj oblasti [Construction of transfer functions reflecting the impact of the activities of the university on the production of petroleum products in the Samara region] // Perspektivnye informacionnye tekhnologii (PIT 2022): trudy Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii. Samara: 18–21 aprelya 2022 goda. Samara: Samarski nauchnyu centr RAN, 2022. Pp. 390–393. (In Russian)
30. *Diligenskij N.V., Gavrilova A.A., Capenko M.V.* Postroenie i identifikaciya matematicheskikh modelej proizvodstvennyh system [Construction and identification of mathematical models of production systems]. Samara: SamGTU, 2005. 126 s. (In Russian)

Энергетика и электротехника

УДК 621.311

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ ОБЪЕКТОВ ИНДИВИДУАЛЬНОГО ЖИЛИЩНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА РАЗНОЙ ЭТАЖНОСТИ И ПЛОЩАДИ

*А.Р. Ахметшин**

Казанский государственный энергетический университет
Россия, 420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51
Ассоциация «Росэлектромонтаж»
Россия, 123557, г. Москва, пер. Электрический, д. 3/10, стр. 1, ком. 5

E-mail: dr.akhmetshin@ieec.org

Аннотация. В Российской Федерации нарастающими темпами осуществляется строительство объектов индивидуального жилищного строительства. При этом отсутствуют соответствующие нормативные документы с адекватной методикой расчета нагрузок для строительства электрических сетей. Данная ситуация привела к низкой загрузке электросетевого оборудования, соответственно инвестиции перешли в категорию невозвратных. Устойчивое развитие частного и индустриального строительства объектов индивидуального жилья возможно только при разработке нормативных технических документов, отвечающих современным трендам. Для выполнения данной задачи была выполнена научно-исследовательская работа с целью разработки нормативных документов, используемых при проектировании электрических сетей коттеджных поселков, с учетом разной этажности и площади объектов индивидуального жилищного строительства. На примере двух коттеджных поселков г. Казани по параметру суточного и месячного электропотребления удалось получить выборку, данные которой подчиняются закону нормального распределения. Проведенный анализ выборочных совокупностей коттеджных поселков показывает, что по параметру электропотребления их можно группировать в зависимости от количества этажей и площади домов. Полученные результаты позволяют сформировать будущую методику расчета электрических нагрузок с внесением изменений в Федеральный свод правил.

Ключевые слова: объекты индивидуального жилищного строительства, электропотребление, электроснабжение, проектирование электрических сетей, нормативно-техническая документация.

Введение

В Российской Федерации нарастающими темпами осуществляется строительство объектов индивидуального жилищного строительства (ОИЖС) благодаря реализации указов президента, федеральных проектов

* Азат Ринатович Ахметшин, кандидат технических наук, доцент кафедры «Энергетическое машиностроение».

с одновременным выполнением проекта развития индивидуального жилищного строительства. На сегодняшний день ежегодно возводятся 350–450 тысяч ОИЖС средней площадью 130–140 м². Доля ОИЖС в общем объеме ввода жилья выросла с 43 % (2018) до 56 % (2022) (рис. 1). Стратегия развития строительной отрасли включает в себя комплекс мер, направленных на развитие индустриального строительства ОИЖС.

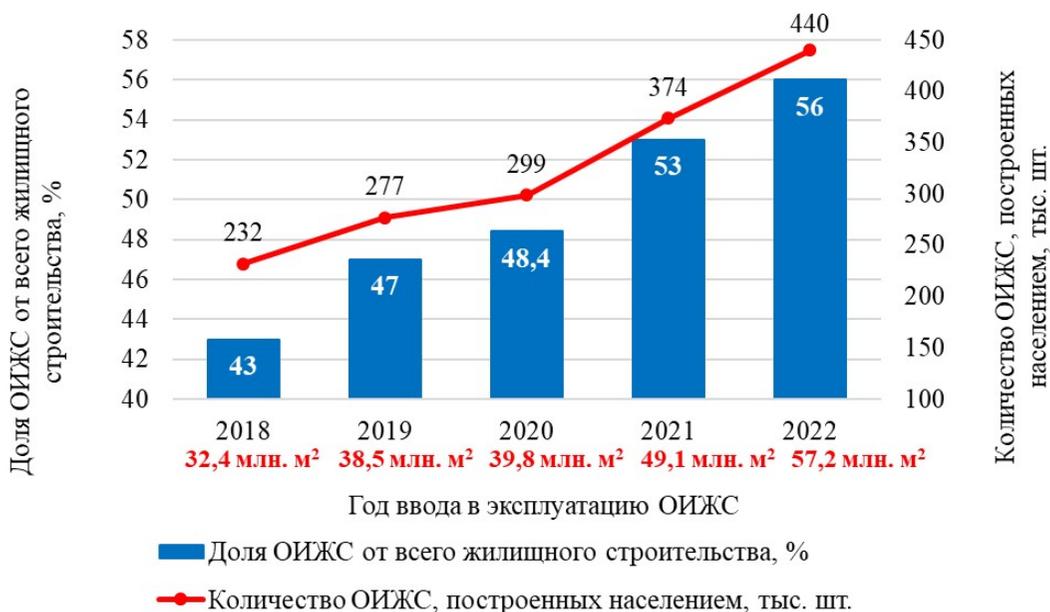


Рис. 1. Ввод объектов индивидуального жилищного строительства в Российской Федерации с 2018 до 2022 гг.

Одной из проблем развития индустриального строительства является отсутствие адекватной нормативно-технической базы по проектированию электрических сетей. Устойчивое развитие строительства индивидуальных и индустриальных ОИЖС возможно только при разработке современных нормативных технических документов по расчету электрических нагрузок.

Выполнению разработки нормативных технических документов способствует цифровая трансформация в электроэнергетике, в частности внедрение интеллектуальных приборов учета электроэнергии (ИПУЭЭ) [1–4]. Внедрение ИПУЭЭ позволяет выполнять мониторинг фактических электрических нагрузок в течение нескольких лет [5–13] с последующим проведением расчетов по прогнозированию электрических нагрузок [14–17].

Научно-исследовательская работа, выполненная ассоциацией «Росэлектромонтаж» совместно с АО «Сетевая компания», выявила низкую загрузку электросетевого оборудования (менее 20 %) в поселках городских и сельских агломераций [3]. Построенные электрические сети и трансформаторные подстанции 10/0,4 кВ по факту оказываются недогруженными [5–9, 18], тем самым инвестиционные ресурсы сетевых

компаний используются неэффективно, а центры питания, построенные и реконструированные для нужд технологического присоединения, не обеспечены заявленной потребителями мощностью.

Разработка нормативных технических документов, основанных на фактических замерах, обеспечит выбор силовых трансформаторов с оптимальным коэффициентом загрузки и приведет к минимизации потерь электроэнергии [19–22], а также позволит выбрать генерирующее оборудование (возобновляемые источники энергии, газотурбинные и газопоршневые станции), обеспечивающее необходимые выходные параметры с высоким КПД [23] для энергоснабжения изолированных и дальних районов. Затраты при строительстве электрических сетей уменьшатся за счет сокращения количества и мощности силовых трансформаторов, длины и сечения кабельных линий [5–12].

Важно отметить, что стоимость технологического присоединения к электрическим сетям возросла в соответствии с Федеральным законом от 16.02.2022 № 12-ФЗ «О внесении изменения в статью 23.2 Федерального закона «Об электроэнергетике». Например, в Самарской области вместо 550 руб. стоимость технологического присоединения составит 63 840 руб. за 15 кВт (4 256 руб. за 1 кВт) при условии, что расстояние от энергопринимающих устройств до существующих объектов электросетевого хозяйства сетевых организаций составляет не более 200 м в городах и поселках городского типа и не более 300 м в сельской местности. Стоимость подключения зависит от региона (рис. 2).

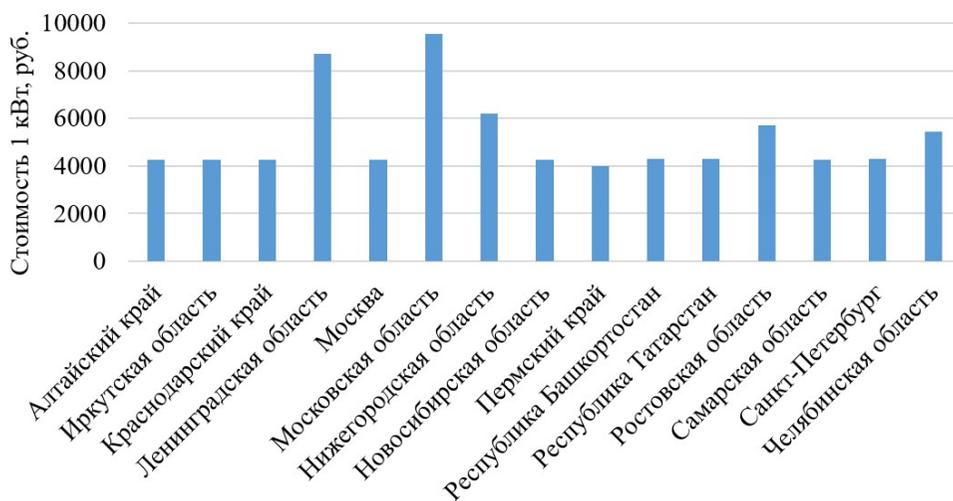


Рис. 2. Стоимость технологического присоединения к электрическим сетям в разных регионах страны

Ассоциация «Росэлектромонтаж» разработала дорожную карту, позволяющую существенно снизить стоимость строительства электрических сетей для ОИЖС. Она включает в себя актуализацию нормативных электрических нагрузок ОИЖС и разработку новой методики по выбору электросетевого оборудования.

Статистическая обработка по значениям среднемесячного электропотребления за период наблюдений

В качестве исследуемой выборки были рассмотрены два коттеджных поселка г. Казани. Исследование данной выборки проводилось по величине расхода электроэнергии ОИЖС. Величина расхода электроэнергии определялась по суточным профилям активной мощности с шагом в 30 минут. Для проведения статистической обработки использовались суточные профили активной мощности коттеджных поселков № 1 (71 коттеджа) и № 2 (62 коттеджей). Период наблюдений для поселка № 1 – с 1 октября 2021 г. по 20 февраля 2022 г., для поселка № 2 – с 1 февраля по 5 марта 2022 г.

По профилям активной мощности было определено среднемесячное электропотребление коттеджей. В результате статистической обработки электропотребления были получены основные показатели выборок (табл. 1).

Таблица 1

Основные статистические показатели среднемесячного электропотребления выборок ОИЖС рассматриваемых поселков

Объем выборки, шт.	Среднемесячное электропотребление, кВт·ч	Среднеквадратическое отклонение, кВт·ч	Медиана, кВт·ч	Минимальное значение, кВт·ч	Максимальное значение, кВт·ч
Поселок № 1					
71	505,43	481,88	364,68	100,66	2725,53
Поселок № 2					
62	508,98	380,13	366,24	57,78	1686,6

Как видно из табл. 1, среднемесячное электропотребление ОИЖС составляет в среднем 507 кВтч/месяц. Максимальное значение электропотребления (2725 и 1686,6 кВт·ч) может свидетельствовать о наличии электрических обогревательных приборов, а минимальное значение (57,78 и 100,66 кВт·ч), в свою очередь, о том, что в домах не живут постоянно. Поскольку возможны случаи, что в течение месяца ОИЖС не эксплуатируются, в дальнейшем будет использоваться суточное электропотребление.

Статистическая обработка по значениям суточного электропотребления за сутки с максимальной нагрузкой

Построение гистограмм распределения электропотребления позволит визуально оценить его характер, что даст возможность сделать вывод о существовании обособленных, имеющих статистически значимые различия групп внутри выборочной совокупности ОИЖС.

Для построения гистограмм распределения электропотребления были определены сутки с максимальным электропотреблением в течение всего периода наблюдений.

Для оценки численных значений возможных выбросов была построена ящичная диаграмма электропотребления выборок ОИЖС за день

с максимальным электропотреблением 19 декабря 2021 г. (поселок № 1) и 2 февраля 2022 г. (поселок № 2).

Из выборки коттеджей поселка № 1 были исключены выбросы значениями выше 25,6 кВт·ч/сутки (12 объектов), из выборки коттеджей поселка № 2 – выбросы значениями выше 28,0 кВт·ч/сутки (10 объектов) для выполнения закона нормального распределения [24, 25]. В результате исключения выбросов из исследуемых выборочных совокупностей коттеджей поселков № 1 и № 2 для 83 % объектов (поселок № 1 – 59 коттеджей, поселок № 2 – 52 коттеджа) выборки поселков был выявлен признак зависимости по электропотреблению. Остальные 17 % объектов не укладываются в статистические закономерности, причем исключительно со стороны максимальных значений выборки.

На рис. 3 и рис. 4 приведены гистограмма распределения электропотребления и плотность распределения вероятности, полученная методом «ядерного сглаживания», график квантиль-квантиль.

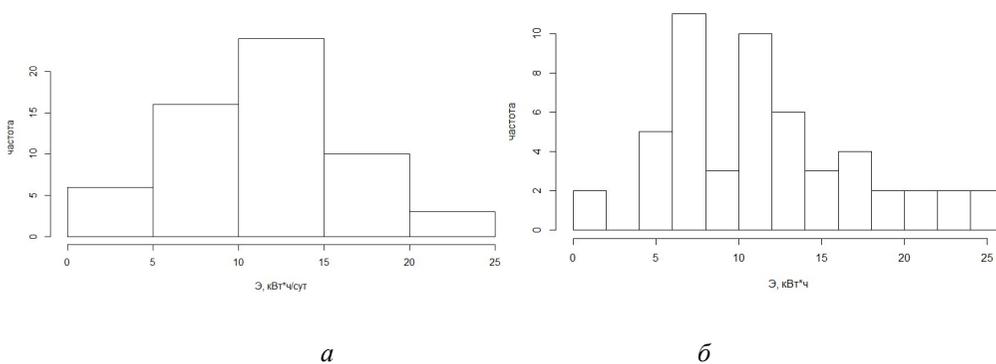


Рис. 3. Гистограмма распределения выборочной совокупности после отбраковки выбросов: *а* – поселок № 1; *б* – поселок № 2

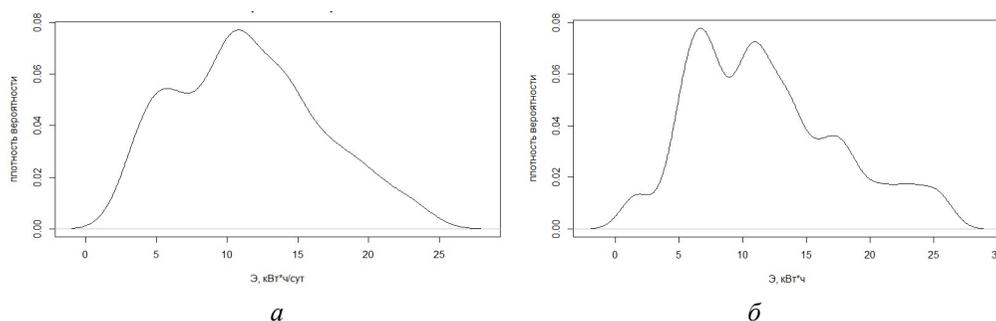


Рис. 4. Плотность распределения вероятности, полученная методом «ядерного сглаживания» после отбраковки выбросов: *а* – поселок № 1; *б* – поселок № 2

Анализ графиков позволяет выдвинуть гипотезу о нормальности распределения данных выборок. Данная гипотеза была проверена расчетными тестами.

Наличие «горбов» (см. рис. 4) на графиках плотности распределения вероятности, полученной методом «ядерного сглаживания», позволяет

выдвинуть гипотезу о наличии внутри пилотных выборок ОИЖС нескольких обособленных групп.

Выделение групп в совокупности ОИЖС

Исследования проводились на основании данных коттеджных поселков № 1 и № 2. Объем выборочной совокупности поселка № 1 составил 67 объектов, поселка № 2 – 61 объект (из исходной пилотной выборки были исключены объекты в связи с отсутствием данных: количество этажей и площадь).

Данные по площади и количеству этажей ОИЖС коттеджных поселков были получены с официального сайта Федеральной службы государственной регистрации, кадастра и картографии (Росреестр) [26].

Выборки формировались по значениям суточного (за сутки с максимальной нагрузкой) и среднемесячного (за период наблюдений) электропотребления.

Деление ОИЖС на группы по количеству этажей

Выборочные совокупности суточного и среднемесячного электропотребления ОИЖС поселков № 1 и № 2 были разделены на группы в зависимости от количества этажей ОИЖС.

Поселок № 1:

– 1-я группа – одноэтажные коттеджи (13 объектов);

– 2-я группа – двухэтажные коттеджи (49 объектов).

Поселок № 2:

– 1-я группа – одноэтажные коттеджи (12 объектов);

– 2-я группа – двухэтажные коттеджи (44 объекта).

Третья группа (3-этажные коттеджи) у обоих поселков была исключена из дальнейшего рассмотрения ввиду своей малочисленности.

Оценка статистической значимости разделения ОИЖС на группы по количеству этажей

Для проверки предположения о статистической значимости групп ОИЖС отобразим рассчитанные по выборкам групп статистические показатели на ящичной диаграмме. Данные для двух групп ОИЖС обоих поселков по значениям суточного электропотребления за сутки с максимальной нагрузкой и среднемесячного электропотребления за период наблюдений показаны на рис. 5 и рис. 6 соответственно. Для наглядности из групп ОИЖС были исключены грубые выбросы.

Признаком статистической значимости разницы средних в группах ОИЖС является условие, что «ящички» распределений не пересекаются. Как видно из диаграммы на рис. 5, «ящички» распределений 1-й и 2-й групп ОИЖС практически не пересекаются. Это позволяет выдвинуть гипотезу о том, что данные группы являются обособленными. По диаграмме на рис. 6 однозначного вывода сделать нельзя. Результаты проверки выборок двух групп поселков расчетными тестами по параметрам среднесуточного (за сутки с максимальной нагрузкой) и среднемесячного (за период наблюдений) электропотребления представлены в табл. 2.

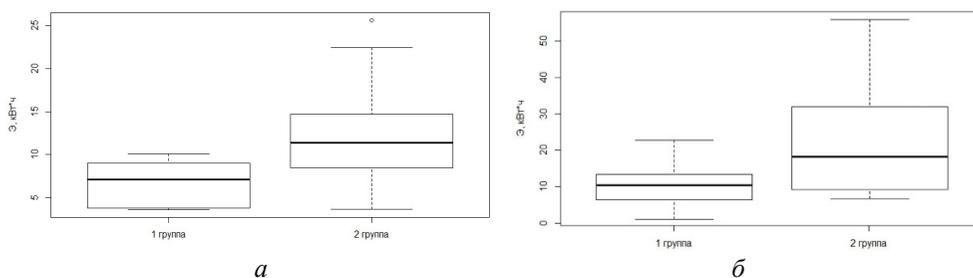


Рис. 5. Ящичная диаграмма суточного электропотребления групп ОИЖС:
а – поселок № 1; *б* – поселок № 2

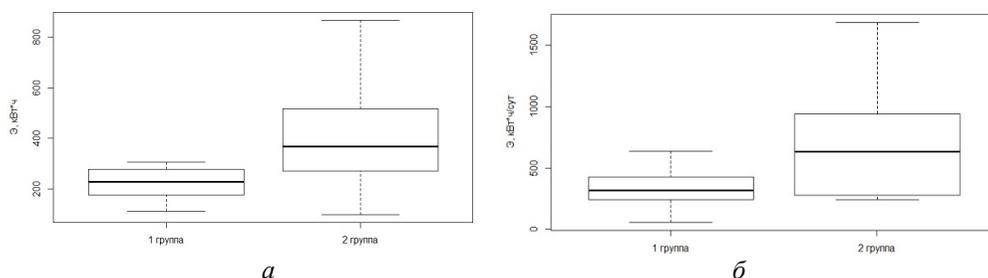


Рис. 6. Ящичная диаграмма среднемесячного электропотребления групп ОИЖС:
а – поселок № 1; *б* – поселок № 2

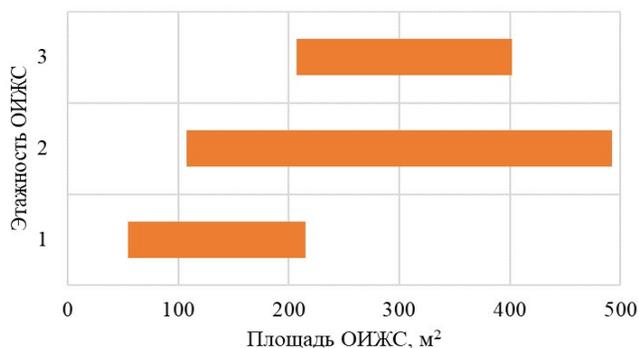
Таблица 2

Значение p-value для рассматриваемых поселков

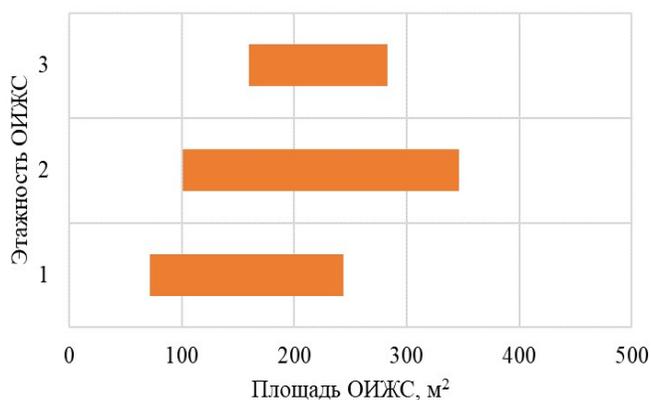
Показатель	Название теста	
	Тест Уэлча	Тест Уилкоксона
Суточное электропотребление	Поселок № 1	
	$7,8 \cdot 10^{-05} < 0,05$ – разные группы	$0,001 < 0,05$ – разные группы
	Поселок № 2	
	$0,049 < 0,05$ – разные группы	$0,04 < 0,05$ – разные группы
Среднемесячное электропотребление	Поселок № 1	
	$3,8 \cdot 10^{-06} < 0,05$ – разные группы	$0,0005 < 0,05$ – разные группы
	Поселок № 2	
	$0,025 < 0,05$ – разные группы	$0,008 < 0,05$ – разные группы

Согласно проведенным тестам (см. табл. 2) отклоняем гипотезу о равенстве средних, т. е. различия значений суточного электропотребления по группам являются статистически значимыми. Значит, принятое разбиение ОИЖС на группы по количеству этажей корректно. На рис. 7 представлен диапазон изменения площади ОИЖС в зависимости от этажности.

Как видно из рис. 7, ОИЖС могут иметь разную этажность, но одинаковую площадь. В связи с этим было выполнено исследование на предмет группировки домов по площади.



a



б

Рис. 7. Диапазон изменения площади объектов индивидуального жилищного строительства в зависимости от этажности: *a* – поселок № 1; *б* – поселок № 2

Деление ОИЖС на группы по площади

Выборки ОИЖС поселков № 1 и № 2 были разделены на группы в зависимости от площади ОИЖС.

Ввиду своей малочисленности были исключены группы до 100 м² и свыше 400 м² для коттеджного поселка № 1 и группы до 100 м² и свыше 300 м² для коттеджного поселка № 2.

Для остальных групп была проведена статистическая обработка значений суточного и среднемесячного электропотребления.

Поселок № 1:

- 1-я группа – коттеджи площадью 100÷200 м² (26 объектов);
- 2-я группа – коттеджи площадью 200÷300 м² (18 объектов);
- 3-я группа – коттеджи площадью 300÷400 м² (15 объектов).

Поселок № 2:

- 1-я группа – коттеджи площадью 100÷200 м² (38 объектов);
- 2-я группа – коттеджи площадью 200÷300 м² (14 объектов).

Оценка статистической значимости разделения ОИЖС на группы по площади

Для проверки предположения о статистической значимости полученных групп ОИЖС отобразим рассчитанные по выборкам групп статистические показатели на ящичной диаграмме. Данные для групп ОИЖС поселков по значениям суточного (за сутки с максимальной нагрузкой) и среднемесячного (за период наблюдений) электропотребления показаны на рис. 8 и рис. 9.

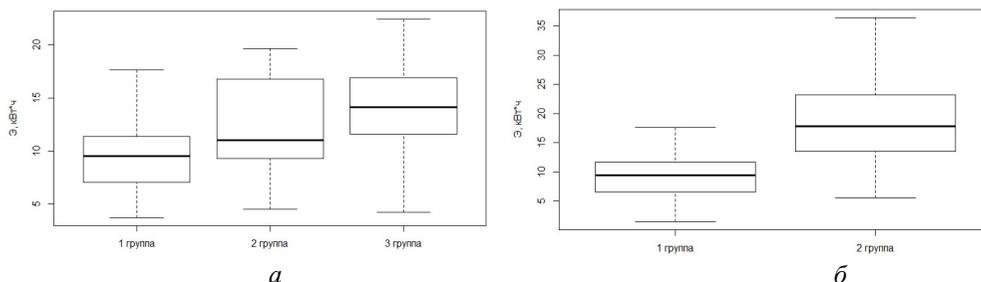


Рис. 8. Ящичная диаграмма суточного электропотребления групп ОИЖС:
а – поселок № 1; б – поселок № 2

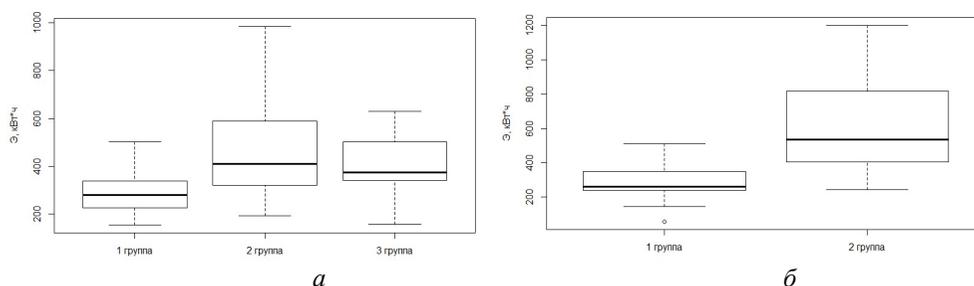


Рис. 9. Ящичная диаграмма среднемесячного электропотребления групп ОИЖС:
а – поселок № 1; б – поселок № 2

Как видно из диаграмм на рис. 8 и рис. 9, «ящички» распределений 1-й и 2-й групп поселков практически не пересекаются между собой. Это позволило выдвинуть гипотезу о том, что данные группы являются обособленными. «Ящик» 3-й группы поселка № 1 полностью совпадает с «ящиком» 2-й группы, поэтому объединяем их и получаем группу 2.

Проводим проверку групп 1 и 2 на равенство средних поселка № 1. Ящичная диаграмма суточного электропотребления групп 1 и 2 приведена на рис. 10.

Как видно из рис. 10, «ящички» распределений групп ОИЖС пересекаются. Результаты проверки выборок двух групп поселков расчетными тестами по параметрам среднесуточного и среднемесячного электропотребления представлены в табл. 3.

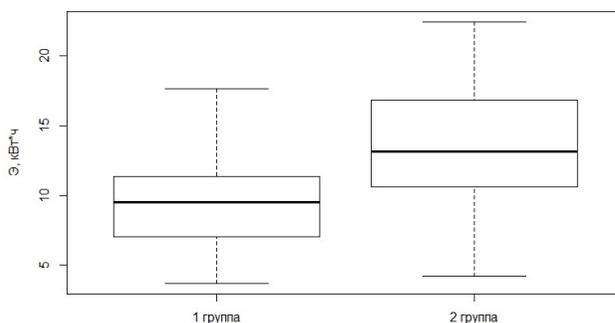


Рис. 10. Ящичная диаграмма суточного электропотребления групп ОИЖС поселка № 1

Таблица 3

Значение p-value для 1-й и 2-й групп коттеджных поселков

Показатель	Название теста	
	Тест Уэлча	Тест Уилкоксона
Суточное электропотребление	1 и 2	1 и 2
	Поселок № 1	
	0,015<0,05 – разные группы	0,011<0,05 – разные группы
	Поселок № 2	
	0,002<0,05 – разные группы	0,0001<0,05 – разные группы
Среднемесячное электропотребление	1 и 2	1 и 2
	Поселок № 1	
	1,3e-04<0,05 – разные группы	6e-11<0,05 – разные группы
	Поселок № 2	
	0,030<0,05 – разные группы	0,0008<0,05 – разные группы

Согласно проведенным тестам (см. табл. 3) отклоняем гипотезу о равенстве средних, т. е. различия значений суточного электропотребления по группам являются статистически значимыми. Следовательно, принятое разбиение ОИЖС на группы по площади корректно.

Заключение

Для разработки нормативных значений удельных нагрузок на один ОИЖС необходимо оперировать репрезентативными выборками. Результаты выполненных расчетов показали, что полученная информация в количественном отношении недостаточна. Связано это с большим разбросом значений электропотребления в отличие от аналогичных показателей для МКД.

По параметру суточного электропотребления удалось получить выборку, данные которой подчиняются закону нормального распределения, но при этом из пилотной выборки были удалены 17% объектов, причем исключительно со стороны максимальных значений выборки.

Проведенный анализ выборочных совокупностей ОИЖС поселков № 1 и № 2 показывает, что по параметру электропотребления их можно группировать в зависимости от количества этажей и площади ОИЖС; соответственно, электрическая нагрузка поселка будет зависеть от этих параметров.

В зависимости от количества этажей ОИЖС можно разделять на группы по 1 и 2 этажам и площади до 200 м² и свыше 200 м². Также важно отметить, что ОИЖС площадью 200 и 300 м² относятся к одной группе.

Полученные результаты позволят сформировать будущую методику расчета электрических нагрузок коттеджных поселков с внесением изменений в Федеральный свод правил, что, в свою очередь, приведет к экономическому эффекту за счет выбора силовых трансформаторов с оптимальной загрузкой и кабельно-проводниковой продукцией с оправданным сечением.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Солуянов Ю.И., Федотов А.И., Ахметшин А.Р. и др.* Актуализация удельных электрических нагрузок многоквартирных жилых домов Москвы и Московской области // *Электричество*. 2023. № 7. С. 52–65.
2. *Жилкина Ю.В.* Процессы реформирования электроэнергетики в России // *Энергетик*. 2020. № 1. С. 29–32.
3. *Жилкина Ю.В.* Концепции интернета вещей как способ мотивации к энергосбережению // *Электрические станции*. 2020. № 2 (1063). С. 23–26.
4. *Майоров А.В.* Развитие системы оперативно-технологического управления электросетевым комплексом в рамках концепции цифровой трансформации 2030 // *Электроэнергия. Передача и распределение*. 2019. № S2 (13). С. 2–7.
5. *Солуянов Ю.И., Федотов А.И., Галицкий Ю.Я. и др.* Актуализация нормативных значений удельной электрической нагрузки многоквартирных домов в Республике Татарстан // *Электричество*. 2021. № 6. С. 62–71.
6. *Солуянов Ю.И., Федотов А.И., Чернова Н.В. и др.* Анализ фактических электрических нагрузок объектов индивидуального жилищного строительства // *Электроэнергия. Передача и распределение*. 2021. № 5 (68). С. 60–65.
7. *Морсин И.А., Шведов Г.В.* Формирование электрических нагрузок на шинах вводного распределительного устройства современных многоквартирных домов // *Промышленная энергетика*. 2023. № 7. С. 22–29.
8. *Соловьева А.С., Шведов Г.В.* Сравнительный анализ зимних и летних графиков электрической нагрузки рабочих и выходных дней многоквартирных домов с электроплитами в системах электроснабжения крупных городов // *Вестник Южно-Уральского государственного университета*. Серия: Энергетика. 2023. Т. 23, № 1. С. 27–37.
9. *Морсин И.А., Шведов Г.В.* Математическая модель электрической нагрузки вводного распределительного устройства многоквартирного жилого дома // *Электроэнергия. Передача и распределение*. 2023. № 5 (80). С. 20–25.
10. *Надтока И.И., Павлов А.В.* Повышение точности расчета электрических нагрузок многоквартирных домов с электроплитами // *Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки*. 2015. № 2. С. 45–48.
11. *Надтока И.И., Павлов А.В.* Расчеты электрических нагрузок жилой части многоквартирных домов с электрическими плитами, основанные на средних нагрузках квартир // *Известия вузов. Электромеханика*. 2014. № 3. С. 36–39.
12. *Надтока И.И., Павлов А.В., Новиков С.И.* Проблемы расчета электрических нагрузок коммунально-бытовых потребителей микрорайонов мегаполисов // *Известия вузов. Электромеханика*. 2013. № 1. С. 136–139.
13. *Таваров С.Ш., Сидоров А.И., Суворов И.Ф., Святых А.Б.* Метод прогнозирования и расчета электрической нагрузки коммунально-бытовых потребителей в условиях неопределенности // *iPolytech Journal*. 2023. Т. 27, № 3. С. 565–573.
14. *Гольдштейн В.Г., Нурбосынов Д.Н., Табачникова Т.В.* Разработка математической модели электротехнического комплекса узлов подстанции // *Вестник Самарского государственного технического университета*. Серия: Технические науки. 2018. № 1 (57). С. 83–91.
15. *Ведерников А.С., Шипилов А.С., Ярыгина Е.А.* Факторы, влияющие на прогнозирование электропотребления системы собственных нужд АЭС // *Вестник Самарского государственного технического университета*. Серия: Технические науки. 2023. Т. 31. № 2 (78). С. 129–141.

16. *Гофман А.В., Ведерников А.С., Шелушенина О.Н.* Применение скользящего смещения средней температуры при прогнозировании электропотребления // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2012. № 1 (33). С. 114–118.
17. *Ведерников А.С., Ярыгина Е.А.* Разработка программы для решения задач краткосрочного прогнозирования электропотребления на основе искусственных нейронных сетей // Энергетик. 2019. № 2. С. 32–35.
18. *Грачева Е.И., Наумов О.В., Федотов Е.А.* Влияние нагрузочной способности силовых трансформаторов на их эксплуатационные характеристики // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2017. Т. 19. № 7–8. С. 71–77.
19. *Воропай Н.И., Ретанц К., Хэгер У. и др.* Разработка инновационных технологий и средств для оценки и повышения гибкости современных энергосистем // Электроэнергия. Передача и распределение. 2021. № 1 (64). С. 52–63.
20. *Лоскутов А.Б., Лоскутов А.А., Зырин Д.В.* Разработка и исследование гибкой интеллектуальной электрической сети среднего напряжения, основанной на гексагональной структуре // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. Н. Новгород, 2016. № 3 (114). С. 85–94.
21. *Лоскутов А.Б., Соснина Е.Н., Лоскутов А.А. и др.* Интеллектуальные распределительные сети 10–20 кВ с гексагональной конфигурацией // Промышленная энергетика. 2013. № 12. С. 3–7.
22. *Воропай Н.И., Стычински З.А., Козлова Е.В. и др.* Оптимизация суточных графиков нагрузки активных потребителей // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2014. № 1. С. 84–90.
23. *Илюшин П.В.* Особенности учета параметров нагрузки при анализе переходных процессов в сетях с объектами распределенной генерации // Электроэнергия. Передача и распределение. 2018. № 6 (51). С. 54–61.
24. *Гореева Н.М., Демидова Л.Н.* Статистика. М.: Прометей, 2019. 496 с.
25. *James G., Witten D., Hastie T., Tibshirani R.* An introduction to statistical learning with Applications in R 2nd ed. Cham: Springer. 2021. P. 612.
26. Федеральная служба государственной регистрации, кадастра и картографии (Росреестр): официальный сайт [Электронный ресурс]. URL: <https://rosreestr.gov.ru/> (дата обращения: 22.11.2023).

Статья поступила в редакцию 28 ноября 2023 г.

STUDY OF ELECTRIC CONSUMPTION OF INDIVIDUAL HOUSING CONSTRUCTION FACILITIES OF DIFFERENT STORIES AND AREA

*A.R. Akhmetshin**

Kazan State Power Engineering University
51, Krasnoselskaya st., Kazan, 420066, Russian Federation
Roselectromontazh Association
room 5, building 1, 3/10, Elektrichesky lane, Moscow, 123557, Russian Federation

E-mail: dr.akhmetshin@ieec.org

Abstract. *In the Russian Federation, the construction of individual housing construction projects is being carried out at an increasing pace, for the construction of electrical networks for which there are no regulatory documents with an adequate methodology for calculating electrical loads. This situation led to low load on power grid equipment, and accordingly, investments became non-refundable. Sustainable development of private and industrial construction of individual housing projects is possible only with the development of regulatory technical documents that meet modern trends. To accomplish this task, research work was carried out to develop regulatory documents used in the design of electrical networks in cottage villages, taking into account the different number of floors and area of individual housing construction projects. Using the example of two cottage villages in Kazan, based on the parameter of daily and monthly electricity consumption, it was possible to obtain a sample whose data obeys the law of normal distribution. The analysis of sample sets of cottages in the villages shows that according to the power consumption parameter they can be grouped depending on the number of floors and area of the houses. The results obtained make it possible to formulate a future methodology for calculating electrical loads with amendments to the Federal Code of Rules.*

Keywords: *objects of individual housing construction, power consumption, power supply, design of electrical networks, regulatory and technical documentation.*

REFERENCES

1. *Soluyanov Yu.I., Fedotov A.I., Akhmetshin A.R. et al. Aktualizatsiya udel'nykh elektricheskikh nagruzok mnogokvartirnykh zhilykh domov Moskvyy i Moskovskoy oblasti [Updating the specific electrical loads of apartment buildings in Moscow and the Moscow region] // Elektrichestvo. 2023. № 7. Pp. 52–65. (In Russian)*
2. *Zhilkina Yu.V. Protsessy reformirovaniya elektroenergetiki v Rossii [Processes of reforming the electric power industry in Russia] // Energetik. 2020. № 1. Pp. 29–32. (In Russian)*
3. *Zhilkina Yu.V. Kontseptsii interneta veshchey kak sposob motivatsii k energosberezheniyu [Concepts of the Internet of Things as a way to motivate energy saving] // Elektricheskiye stantsii. 2020. № 2 (1063). Pp. 23–26. (In Russian)*
4. *Mayorov A.V. Razvitiye sistemy operativno-tehnologicheskogo upravleniya elektrosetyvm kompleksom v ramkakh kontseptsii tsifrovoy transformatsii 2030 [Development of an operational and technological management system for the electric grid complex within the framework of the concept of digital transformation 2030] // Elektroenergiya. Peredacha i raspredeleniye. 2019. № S2 (13). Pp. 2–7. (In Russian)*
5. *Soluyanov Yu.I., Fedotov A.I., Galitsky Yu.Ya. et al. Aktualizatsiya normativnykh znacheniy udel'noy elektricheskoy nagruzki mnogokvartirnykh domov v Respublike Tatarstan [Updating the standard values of the specific electrical load of apartment buildings in the Republic of Tatarstan] // Elektrichestvo. 2021. № 6. Pp. 62–71. (In Russian)*

* *Azat R. Ahmetshin (Ph.D. (Techn.)), assistant professor.*

6. *Soluyanov Yu.I., Fedotov A.I., Chernova N.V. et al.* Analiz fakticheskikh elektricheskikh nagruzok ob"yektov individual'nogo zhilishchnogo stroitel'stva [Analysis of actual electrical loads of individual housing construction objects] // *Elektroenergiya. Peredacha i raspredeleniye*. 2021. № 5 (68). Pp. 60–65. (In Russian)
7. *Morsin I.A., Shvedov G.V.* Formirovaniye elektricheskikh nagruzok na shinakh vvodnogo raspredelitel'nogo ustroystva sovremennykh mnogokvartirnykh domov [Formation of electrical loads on the buses of the input switchgear of modern apartment buildings] // *Promyshlennaya energetika*. 2023. № 7. Pp. 22–29. (In Russian)
8. *Solovyova A.S., Shvedov G.V.* Sravnitel'nyy analiz zimnikh i letnikh grafikov elektricheskoy nagruzki rabochikh i vykhodnykh dney mnogokvartirnykh domov s elektroplitami v sistemakh elektrosnabzheniya krupnykh gorodov [Comparative analysis of winter and summer schedules of electrical load on working days and weekends of apartment buildings with electric stoves in power supply systems of large cities] // *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika*. 2023. T. 23, № 1. Pp. 27–37. (In Russian)
9. *Morsin I.A., Shvedov G.V.* Matematicheskaya model' elektricheskoy nagruzki vvodnogo raspredelitel'nogo ustroystva mnogokvartirnogo zhilogo doma [Mathematical model of the electrical load of the input switchgear of an apartment building] // *Elektroenergiya. Peredacha i raspredeleniye*. 2023. № 5 (80). Pp. 20–25. (In Russian)
10. *Nadtoka I.I., Pavlov A.V.* Povysheniye tochnosti rascheta elektricheskikh nagruzok mnogokvartirnykh domov s elektroplitami [Increasing the accuracy of calculating electrical loads of apartment buildings with electric stoves] // *Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskiy region. Tekhnicheskiye nauki*. 2015. № 2. Pp. 45–48. (In Russian)
11. *Nadtoka I.I., Pavlov A.V.* Raschety elektricheskikh nagruzok zhiloy chasti mnogokvartirnykh domov s elektricheskimi plitami, osnovannyye na srednikh nagruzkakh kvartir [Calculations of electrical loads of the residential part of apartment buildings with electric stoves, based on the average loads of apartments] // *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika*. 2014. № 3. Pp. 36–39. (In Russian)
12. *Nadtoka I.I., Pavlov A.V., Novikov S.I.* Problemy rascheta elektricheskikh nagruzok kommunal'no-bytovykh potrebiteley mikrorayonov megapolisov [Problems of calculating electrical loads of municipal consumers in microdistricts of megacities] // *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika*. 2013. № 1. Pp. 136–139. (In Russian)
13. *Tavarov S.Sh., Sidorov A.I., Suvorov I.F., Svyatikh A.B.* Metod prognozirovaniya i rascheta elektricheskoy nagruzki kommunal'no-bytovykh potrebiteley v usloviyakh neopredelonnosti [Method for forecasting and calculating the electrical load of municipal consumers under conditions of uncertainty] // *iPolytech Journal*. 2023. T. 27, № 3. Pp. 565–573. (In Russian)
14. *Goldshtein V.G., Nurbosynov D.N., Tabachnikova T.V.* Razrabotka matematicheskoy modeli elektrotekhnicheskogo kompleksa uzlovoy podstantsii [Development of a mathematical model of the electrical complex of a junction substation] // *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskiye nauki*. 2018. № 1 (57). Pp. 83–91. (In Russian)
15. *Vedernikov A.S., Shipilov A.S., Yarygina E.A.* Faktory, vliyayushchiye na prognozirovaniye elektropotrebleniya sistemy sobstvennykh nuzhd AES [Factors influencing the forecasting of power consumption of the NPP auxiliary system] // *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskiye nauki*. 2023. T. 31. № 2 (78). Pp. 129–141. (In Russian)
16. *Gofman A.V., Vedernikov A.S., Shelushenina O.N.* Primeneniye skol'zyashchego smeshcheniya sredney temperatury pri prognozirovanii elektropotrebleniya [Application of a sliding displacement of average temperature in forecasting power consumption] // *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskiye nauki*. 2012. № 1(33). Pp. 114–118. (In Russian)
17. *Vedernikov A.S., Yarygina E.A.* Razrabotka programmy dlya resheniya zadach kratkosrochnogo prognozirovaniya elektropotrebleniya na osnove iskusstvennykh neyronnykh setey [Development of a program for solving problems of short-term forecasting of power consumption based on artificial neural networks] // *Energetik*. 2019. № 2. Pp. 32–35. (In Russian)
18. *Gracheva E.I., Naumov O.V., Fedotov E.A.* Vliyaniye nagruzochnoy sposobnosti silovykh transformatorov na ikh ekspluatatsionnyye kharakteristiki [The influence of the load capacity of power transformers on their operational characteristics] // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki*. 2017. T. 19. № 7–8. Pp. 71–77. (In Russian)

19. Voropai N.I., Retans K., Hager U. et al. Razrabotka innovatsionnykh tekhnologiy i sredstv dlya otsenki i povysheniya gibkosti sovremennykh energosistem [Development of innovative technologies and tools for assessing and increasing the flexibility of modern energy systems] // Elektroenergiya. Peredacha i raspredeleniye. 2021. № 1 (64). Pp. 52–63. (In Russian)
20. Loskutov A.B., Loskutov A.A., Zyrin D.V. Razrabotka i issledovaniye gibkoy intellektual'noy elektricheskoy seti srednego napryazheniya, osnovannoy na geksagonal'noy strukture [Development and research of a flexible intelligent medium voltage electrical network based on a hexagonal structure] // Trudy NGTU im. R.Ye. Alekseyeva. N. Novgorod, 2016. № 3 (114). Pp. 85–94. (In Russian)
21. Loskutov A.B., Sosnina E.N., Loskutov A.A. et al. Intellektual'nyye raspredelitel'nyye seti 10–20 kV s geksagonal'noy konfiguratsiyey [Intelligent distribution networks 10–20 kV with a hexagonal configuration] // Promyshlennaya energetika. 2013. № 12. Pp. 3–7. (In Russian)
22. Voropai N.I., Stychinski Z.A., Kozlova E.V. et al. Optimizatsiya sutochnykh grafikov nagruzki aktivnykh potrebiteley. [Optimization of daily load schedules of active consumers] // Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Energetika. 2014, № 1. Pp. 84–90. (In Russian)
23. Ilyushin P.V. Osobennosti ucheta parametrov nagruzki pri analize perekhodnykh protsessov v setyakh s ob"yektami raspredelennoy generatsii [Features of taking into account load parameters when analyzing transient processes in networks with distributed generation facilities] // Elektroenergiya. Peredacha i raspredeleniye. 2018. № 6 (51). Pp. 54–61. (In Russian)
24. Goreeva N.M., Demidova L.N. Statistika [Statistics] // M.: Prometei, 2019. 496 pp. (In Russian)
25. James G., Witten D., Hastie T., Tibshirani R. An introduction to statistical learning with Applications in R 2nd ed. Cham: Springer. 2021. 612 pp.
26. Federal'naya sluzhba gosudarstvennoy registratsii, kadastra i kartografii (Rosreestr). URL: <https://rosreestr.gov.ru/> (дата обращения: 22.11.2023).

УДК 621.315.175

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ПЛАВКЕ ГОЛОЛЕДА НА ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

А.А. Базаров, С.И. Будко *

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

E-mail: aleksbazarov@yandex.ru, budko-1998@mail.ru

***Аннотация.** Выполнен анализ проблемы образования гололеда на проводах линий электропередачи, проведен обзор работ в области плавки гололеда на различных линиях. Отмечены существующие достижения и проблемы. Одной из причин низкой оснащенности линий автоматизированными системами плавки является необходимости перевода линии из рабочего состояния в режим плавки. Одним из способов решения проблемы является совмещение этих режимов с помощью загрузки линии дополнительными токами без увеличения пропускаемой мощности потребителям. Рассмотрен комплекс вопросов по моделированию тепловых процессов в ледяной оболочке проводов линии электропередачи во время плавки гололеда. Ограничение мощности тепловыделения в проводах приводит к необходимости построения достаточно точной математической модели для гарантированного расплавления при различных значениях скорости ветра и температуры. Проведено исследование процессов нагрева проводов с помощью моделей стационарной и нестационарной теплопроводности. Предложен алгоритм решения тепловой задачи при проплавлении нагретым проводом ледяной оболочки, основанный на имитации перемещения границы раздела твердой и жидкой фаз воды. Описаны особенности моделирования процесса плавления и кристаллизации численным методом. При переходе льда в расплавленное состояние отражено изменение плотности и образование воздушной прослойки, сопровождающееся значительным уменьшением тепловых потоков в нижнюю область ледяной оболочки. Представлены результаты численного моделирования процесса проплавления ледяной оболочки проводом при разных значениях коэффициента конвективного теплообмена. При анализе результатов моделирования выявлены условия для возникновения недопустимого перегрева провода, освобожденного ото льда. Предложены различные варианты построения системы управления процессом плавки, позволяющие исключить перегрев провода.*

Ключевые слова: конвективный теплообмен, плавление, мощность тепловыделения, гололед, провода ЛЭП, метод конечных элементов.

* Александр Александрович Базаров, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».

Степан Игоревич Будко, аспирант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».

Введение

Вопросы борьбы с гололедообразованием на проводах высоковольтных линий электропередачи широко известны. Особенно актуальна эта проблема в отдельных районах нашей страны, в которых ежегодно происходят массовые повреждения на линиях, связанные с этим непредсказуемым явлением. К таким районам относятся зоны с повышенной влажностью, низкими температурами, повышенной ветровой активностью, резкими перепадами температур, характерными для степной местности. Аварийность при интенсивном гололедообразовании крайне высока, так как образование ледяной корки на линии охватывает протяженные участки трассы, приводя к разрушению опор, разрыву проводов и удерживающих тросов, разрушению изоляторов и железной арматуры. Все это имеет серьезные последствия, такие как нарушение стабильности работы энергосистемы и подачи электроэнергии конечному потребителю, а также финансовые расходы на восстановительные работы. В тяжелых случаях такие мероприятия затягиваются на продолжительное время и, как следствие, влекут за собой огромные затраты на капитальный ремонт оборудования ЛЭП.

В связи с этим возникает потребность в оперативном и своевременном предотвращении образования гололеда. На данный момент самым распространенным и эффективным способом решения проблемы борьбы с гололедом на проводах является нагрев проводников линии увеличенными токами. Существующие системы плавки имеют определенные недостатки, обусловленные несовершенством способов, и предполагают стандартные мероприятия: отключение линии от источника питания; плавка гололеда с последующим объездом трассы оперативным персоналом; восстановительные операции, направленные на устранение механических повреждений. Только после выполненных мероприятий линия снова включается в работу. Эффективность таких решений бывает невысокой из-за недостаточной оснащенности средствами диагностики и автоматизации процессов плавки гололеда.

Для более простого решения проблемы предлагается обеспечить нагрев линии за счет пропускания дополнительных реактивных токов, достаточных для формирования нужного по величине уровня мощности тепловыделения [1]. Ток в линии формируется нагрузкой подключенных потребителей и реактивной мощностью реактора, специально подключенного в конце линии и имеющего индуктивность L . Одновременное подключение в начале линии батареи конденсаторов, имеющих суммарную емкость C , позволяет компенсировать реактивную мощность и разгрузить питающий трансформатор от реактивных токов. Для обеспечения необходимого значения тока в линии реактор и батарея конденсаторов имеют несколько ступеней регулирования.

Существует три основных вида гололедных образований: гололед, изморозь, а также смесь из этих осадков.

При значительных скоростях формирования гололеда требуется оперативное вмешательство, так как нарастание массы и площади поверхности ледяной оболочки приводит к предельным нагрузкам на провод при сильном ветре.

Гололедное отложение имеет твердую прозрачную или полупрозрачную структуру с плотностью 600–900 кг/м³ [2]. При отрицательной температуре осадки налипают на поверхность металлических проводов. Процесс образования

оболочки из льда происходит при температуре от 0 до -10 °С при скорости ветра до 5–20 м/с. Если направление ветра перпендикулярно оси провода, то гололед образуется с наветренной стороны. Если же ветер направлен вдоль проводника, то гололед образуется на всей его поверхности. Однако в таком случае отложения гололеда имеют меньшую интенсивность и более пористую структуру.

При рассмотрении методов плавки гололеда на линиях электропередачи, а также причин его возникновения следует выделить ряд исследовательских работ. В работе [3] предлагается плавка гололеда токами высокой частоты, сгенерированными радиопередатчиками вдоль всей длины ЛЭП.

В статье [4] выполнен обзор типовых решений по плавке гололеда на проводах, предложены новые технические решения для предотвращения гололедообразования на грозозащитных тросах.

В работах [5, 6] рассмотрены способы плавки гололеда без отключения потребителей. В них предлагается плавка гололеда на параллельных и кольцевых линиях наложением постоянного тока на рабочий переменный ток.

Вопросам расширения возможностей систем плавки гололеда для обеспечения функционирования системы питания коммутационных аппаратов, устанавливаемых на опорах линий электропередачи напряжением 220 и 330 кВ и предназначенных для создания контура при плавке гололеда электрическим током, посвящена работа [7].

Применение компьютерных моделей процесса плавления льда при нагреве фазных и грозозащитного проводов описано в статье [8]. Модель построена с помощью метода точечных источников. Полученные зависимости времени сброса наледи от толщины и теплоемкости оболочки и провода показывают возможность практической реализации.

В работе [9], посвященной исследованию формирования и таяния льда, предложена одномерная модель термодинамики формирования и таяния ледяной оболочки. Модель позволяет получить пространственное распределение ледяного слоя и может быть применима при исследованиях, описывающих движение льда.

В статьях [10, 11] выполнено численное моделирование таяния слоя льда на вертикальной подложке, нагреваемой от источника излучения в виде галогенной лампы. Расчетная модель учитывает селективный характер источника излучения.

Представляет интерес работа [12], в которой приведены результаты компьютерного моделирования режимов плавления гололеда при подогреве проводов токами, увеличенными за счет добавления реактивной нагрузки.

В работах [13, 14] рассмотрен способ плавки гололеда на проводах контактной сети при питании участков контактной сети от разных фаз тяговой подстанции.

Способ очистки проводов от налипшего гололеда путем нагрева электрическим током является широко применяемым на трассах ЛЭП. Образование гололеда на проводах возможно лишь в том случае, если провод имеет температуру ниже 0 °С. Если же провод вследствие нагрева проходящими по нему токами имеет температуру выше 0 °С, то гололед на нем образовываться не будет. Если провод уже покрылся гололедом, то, пропуская через него ток соответствующей силы, можно нагреть его до температуры, при которой гололед начинает постепенно таять и опадать с провода.

Интенсивность прогрева проводника током значительно зависит от температуры воздуха и скорости ветра. При низких температурах воздуха и большой скорости ветра охлаждение проводника происходит интенсивнее, из-за чего для его нагрева до температуры, необходимой для плавления льда, требуются большие силы тока, пропускаемого по проводам.

Целью работы является построение компьютерной модели теплового процесса в системе «провод – оболочка», обладающей допустимой погрешностью и позволяющей определить время разрушения ледяной корки при использовании ограниченной мощности.

Чтобы определить параметры системы нагрева и режимов работы, необходимо проанализировать процессы в системе «провод – ледяная оболочка – окружающая среда». Учитывая допущения о симметричном расположении ледяной оболочки и постоянной скорости движения воздуха, можно сделать вывод, что теплообмен может быть описан дифференциальным уравнением в частных производных, дополненным граничными и начальными условиями. Это соответствует подходу численной реализации, при котором свойства задаются для каждой геометрической подобласти модели.

Геометрическая модель системы «провод – ледяная оболочка» для провода АС-185 содержит две области: внутренняя является металлической с усредненными параметрами; внешняя оболочка представляет собой лед с разными свойствами в зависимости конкретной задачи. При нагреве провода тепло передается в ледяную оболочку, что приводит к ее смещению вниз из-за образования жидкой фазы над металлическим проводом. Полного расплавления корки при этом не происходит. Система нагрева провода должна обеспечить проплавление ледяной оболочки и падение корки на землю. В зависимости от состояния корки процесс нагрева и плавления протекает по-разному. При формировании ледяной корки за счет образования изморози ее плотность составляет $0,15\text{--}0,4 \text{ г/см}^3$ [2, 15]. При замерзании капель мороси или ледяного дождя на проводах образуется лед с плотностью около $0,9 \text{ г/см}^3$ [2, 15]. При температуре $-0,5 \text{ }^\circ\text{C}$ осадки в виде мокрого снега также налипают на провода. Плотность корки может изменяться в широких пределах.

Образующаяся корка создает значительную дополнительную статическую и динамическую нагрузку на линию. Увеличение парусности проводов сказывается на амплитуде колебаний и усилиях, которые передаются на опоры. На тепловых процессах это сказывается в виде образования ледяной оболочки неодинаковой толщины с разных сторон и формирования несимметричного распределения температуры в горизонтальной и вертикальной плоскостях.

Построение математической модели

Задание коэффициента теплопроводности корки в виде снега или рыхлой ледяной крошки удобно выполнить с помощью формулы М. Штурма [16], полученной при средней температуре снега $-15 \text{ }^\circ\text{C}$ для плотности, изменяющейся в диапазоне $0,156 < \rho < 0,6 \text{ г/см}^3$ [2,15]:

$$\lambda = 0,138 - 1,01\rho + 3,233\rho^2 \text{ Вт/(м} \cdot \text{град)},$$

где ρ – плотность снега (льда).

Теплоемкость пористого льда (слежавшегося снега) в расчетах от плотности практически не зависит и принимается равной $2090 \div 2100 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{град)}$ [2, 15].

В случае сплошного льда при температуре $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ плотность имеет значение $916,2\text{ кг/м}^3$. В соответствии с данными, приведенными в [16], с понижением температуры удельная теплоемкость льда уменьшается, а теплопроводность и плотность льда, напротив, растут. Например, при температуре $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ его плотность становится равной $918,9\text{ кг/м}^3$.

Значение удельной теплоемкости льда при $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ составляет $2050\text{ Дж/(кг}\cdot\text{град)}$. При снижении температуры льда до $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ его удельная теплоемкость снижается до $2000\text{ Дж/(кг}\cdot\text{град)}$. Теплоемкость льда в два раза меньше, чем у воды ($4200\text{ Дж/(кг}\cdot\text{град)}$).

Теплопроводность льда при понижении его температуры с 0 до $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ увеличивается с $2,22$ до $2,3\text{ Вт/(м}\cdot\text{град)}$, а теплопроводность воды в 4 раза меньше ($0,56\text{ Вт/(м}\cdot\text{град)}$).

Процессы передачи тепла в твердых телах описываются дифференциальными уравнениями в частных производных. Модель построена в декартовой системе координат. При учете воздействия ветра на провод необходим учет направления ветра. Поэтому использование более экономичной осесимметричной модели в данной задаче приведет к существенной погрешности из-за угловой несимметрии условий теплообмена с внешней средой. При использовании численных методов расчета для каждой отдельной подобласти уравнение содержит отличающиеся параметры. В случае нелинейной постановки задачи свойства среды неизменны только в пределах одного элемента. С учетом наличия нескольких сред в системе «ледяная оболочка – провод» уравнение теплопроводности записывается в общем виде

$$\rho_k C_k \frac{\partial T_k}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_k \frac{\partial T_k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_k \frac{\partial T_k}{\partial y} \right) - \rho_k L \frac{\partial b}{\partial t} + w_k \quad (1)$$

с начальными условиями

$$T(x, y, 0) = T_0(x, y). \quad (2)$$

Здесь k – номер материала (1 – алюминий; 2 – лед); ρ_k – плотность материала; C_k – удельная теплоемкость; λ_k – коэффициент теплопроводности; T_k – температура; w_k – удельная мощность тепловыделения; L – удельная теплота плавления льда; b – граница между твердой и жидкой фазами.

Начальные условия для упрощения предполагают задание начальной температуры системы «провод – оболочка», равной температуре окружающей среды. В большинстве вычислительных экспериментов температура среды равна $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Теплопередача в системе «провод – ледяная оболочка» осуществляется за счет теплопроводности. Поэтому с учетом возможностей программного комплекса Comsol геометрическая модель неизменна, но свойства отдельных элементов могут изменяться. Граничные условия задаются на внешней поверхности ледяной оболочки.

В качестве граничных условий на боковой поверхности $x, y \in L_{нов}$ задан конвективный теплообмен:

$$\lambda_n \frac{\partial T_n}{\partial n} = \alpha(T - T_c). \quad (3)$$

Коэффициент конвективного теплообмена может иметь разное значение на поверхности провода. При моделировании в программе Comsol предусмотрено разделение кольцевой линии на четыре сектора, что позволяет на каждом участке задавать нужный вид теплообмена и нужные значения параметров.

Процессы плавления или кристаллизации льда моделируются с помощью замены процесса движения фронта раздела жидкой и твердой фаз, в выражении

(1) представленном в виде слагаемого $L \frac{\partial b}{\partial t}$, на приращение теплосодержания

в момент перехода через точку кристаллизации (плавления). С учетом дискретного характера вычислительного процесса при моделировании теплота плавления приравнивается к произведению величины интервала температур ΔT , на котором происходит фазовое превращение, на расчетное значение добавочной теплоемкости C^* :

$$L = C^* \Delta T.$$

Теплота плавления льда равна 330 кДж. При величине интервала температур, равной одному градусу, добавка к коэффициенту теплообмена составляет 330000 Дж/(кг·град). Сама по себе эта величина создает сложности при расчетах, но к еще более серьезной проблеме приводит скорость изменения теплоемкости. По причине ухудшения сходимости вычислительного процесса приходится не только уменьшать шаг дискретизации по времени, но и увеличивать интервал температур для фазового перехода.

Сложность задачи плавления гололеда на проводах заключается в том, что необходим учет поглощения и выделения теплоты плавления. Оба эти процесса протекают одновременно. На верхней поверхности провода лед плавится, а в нижней части происходит кристаллизация. Под действием силы тяжести вода стекает вниз, где заполняет поры между крупинками льда. В итоге провод перемещается вверх относительно ледяной оболочки. Скорость перемещения зависит от мощности нагрева и скорости расплавления пограничного слоя. Таким образом, расчет тепловых процессов должен учитывать не только явления плавления и кристаллизации, но и перемещение вещества. Подобные задачи сопровождаются перестроением сетки конечных элементов. В рассматриваемой задаче такое усложнение не только трудно реализуемо, но и не оправдано с точки зрения получаемого результата. Разброс физических свойств ледяной оболочки, зависящих от условий формирования, приводит к сильно отличающимся результатам, что делает нецелесообразным доскональный учет всех параметров сложного процесса.

Для упрощения расчетной модели (1) изменение агрегатного состояния выполнено путем добавления теплоты плавления к величине удельной теплоемкости в узком диапазоне температур [1]. При задании перепада температуры, равного двум градусам, при котором лед переходит в жидкое состояние, получена прибавка теплоемкости 165 кДж/кг. Для данного уточнения параметров модели (1) зависимость теплоемкости от температуры содержит ступенчатую функцию H , позволяющую переходить от значения теплоемкости льда C_l к значению теплоемкости C^* , учитывающей поглощение теплоты плавления, и затем к значению теплоемкости воды $C_{ж}$:

$$C_{np} = C_l \cdot (1 - H(T - T_2)) + C^* (H(T - T_1) - H(T - T_2)) + C_{ж} \cdot H(T - T_2).$$

Процесс теплопроводности в системе тел дополняется вектором скорости для провода:

$$\rho_{np} C_{np} \frac{\partial T_{np}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_{np} \frac{\partial T_{np}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_{np} \frac{\partial T_{np}}{\partial y} \right) - v \frac{\partial T_{np}}{\partial y} + w. \quad (4)$$

При отсутствии в математической модели связи между температурой и перемещением границы жидкой и твердой фаз удобно использовать упрощенный алгоритм расчета. Скорость движения заранее неизвестна и должна быть подобрана для обеспечения соответствия скорости перемещения фронта расплавления льда. Такой подход имитирует реальное перемещение провода в ледяной оболочке и является более простым и экономичным способом задания относительного движения. При этом неизбежна дополнительная вычислительная погрешность, обусловленная изменением условий задачи, так как толщина льда над проводом постепенно уменьшается.

Для отображения процесса расплавления льда в верхней части, стекания воды в нижнюю зону и образования воздушной прослойки под нижней поверхностью провода из-за повышения плотности льда внизу предусмотрено изменение коэффициентов теплопроводности и плотности в зависимости от температуры и места расположения. Так, под нижней поверхностью провода процесс расплавления приводит к образованию тонкого слоя воздуха, имеющего плотность $1,29 \text{ кг/м}^3$ и коэффициент теплопроводности $0,0258 \text{ Вт/(м}\cdot\text{град)}$.

Определение значения мощности тепловыделения в проводнике должно быть выполнено при соблюдении некоторых условий. Во-первых, нежелателен перегрев провода, который возможен на отдельных участках при неодновременном разрушении корки. В то время как происходит плавление ледяной оболочки, на соседних, уже освободившихся от льда, участках может значительно возрасти температура. Во-вторых, имеется ограничение пропускной способности трансформатора, питающего линию. Значительно увеличить ток линии для ускорения процесса плавления не всегда возможно.

Для решения задачи поиска мощности тепловыделения в проводах, обеспечивающей разрушение ледяной оболочки, выполнен комплекс расчетов.

Моделирование процессов плавления

Мощность внутренних источников сконцентрирована в области проводника. Несмотря на то, что диапазон температур невелик, предусмотрены зависимости всех коэффициентов от температуры нагрева, так как свойства изменяются довольно значительно при изменении агрегатного состояния.

Процесс разогрева ледяной оболочки приводит к превращению тонкого слоя льда на границе проводника и оболочки в жидкое состояние. Физически происходит следующее: жидкость стекает к нижней зоне, где может произойти обратное замораживание, просачивание через стенку или сохранение в жидком состоянии. В любом случае изменения геометрических параметров нижней полости приводят к ухудшению теплового контакта нижней зоны жидкости или льда с проводником. Это частично уменьшает отвод тепла в нижнюю зону и увеличивает интенсивность прогрева верхней зоны ледяной корки. Описанные особенности протекания процесса плавки существенно усложняют алгоритм расчета.

Задачей моделирования процесса плавки ледяной оболочки путем

проплавления является также определение возможности протекания процесса при минимально возможных значениях уровня мощности, достаточных для предотвращения образования гололеда.

Для расчетов приняты следующие параметры модели: диаметр проводника 15 мм; толщина ледяной оболочки 10 мм; коэффициент конвективного теплообмена между поверхностью ледяной оболочки и воздухом имеет значения от 5 до 25 Вт/(м²·град); мощность тепловыделения в проводнике – 33 Вт; длина проводника – 1 м. Тепловыделение в проводнике соответствует протеканию длительно-допустимого тока.

Для определения теплового баланса между поверхностью провода, покрытого слоем льда, и окружающим воздухом произведены расчеты для стационарного режима, когда сформировано установившееся распределение температуры. Процессы плавления и кристаллизации в данном случае не учитываются. Тепловая задача с неподвижным проводником в ледяной оболочке рассмотрена при разных коэффициентах конвективного теплообмена между поверхностью ледяной оболочки провода и окружающей средой. На рис. 1 представлены диаграммы температуры, соответствующие значениям коэффициента теплообмена от 5 до 25 Вт/(м²·град). На рисунке отсчет координат ведется сверху вниз. По сравнению с последующими расчетами для нестационарных процессов картина выглядит нереальной из-за высоких значений температуры, при которых вода находится в жидком состоянии.

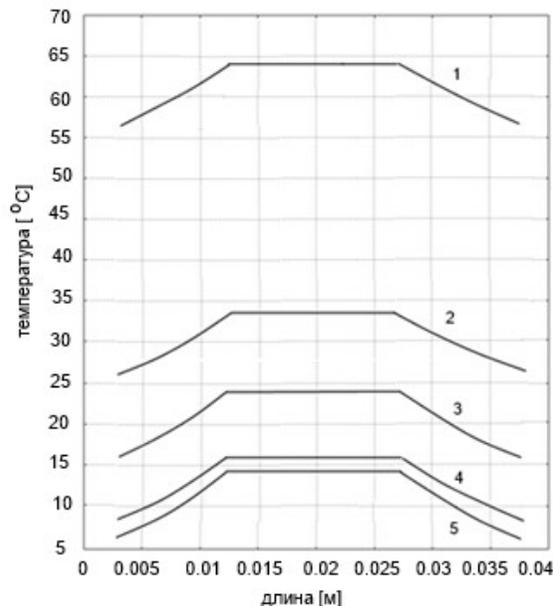


Рис. 1. Диаграммы температуры вдоль горизонтальной осевой линии провода при коэффициенте конвективного теплообмена: 1 – 5 Вт/(м²·град); 2 – 10 Вт/(м²·град); 3 – 15 Вт/(м²·град); 4 – 20 Вт/(м²·град); 5 – 25 Вт/(м²·град)

Следует отметить сложность зависимости коэффициентов от скорости ветра, требуется учет радиуса проводника или ледяной оболочки. Необходимо рассмотрение подветренной и наветренной сторон по отдельности, а также стационарный или нестационарный режимы движения воздуха. При порывистом ветре среднее значение скорости приводит к другим значениям эквивалентного коэффициента теплообмена в отличие от спокойного характера движения воздуха.

На рисунке горизонтальные участки диаграмм температуры соответствуют проводнику, а наклонные участки характеризуют перепад температуры по толщине ледяной корки. Как видно из диаграмм, их вид мало изменяется с ростом температуры проводника. Мощность, выделяющаяся в проводнике, обеспечивает полное расплавление ледяной корки при условии, что процесс образования ледяной корки не является более интенсивным.

Расчеты на модели нестационарного процесса нагрева провода с ледяной оболочкой показали, что при коэффициенте теплообмена, равном $5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град})$, постоянная времени составляет 3650 с, а при коэффициенте теплообмена, равном $25 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град})$, постоянная времени равна 760 с. Тепловой процесс довольно инерционный, даже без учета процесса плавления.

Оценка параметров процесса плавки гололеда выполняется путем расчетов на модели, учитывающей переход льда из твердого в жидкое состояние и обратно, а также образование воздушной прослойки под проводом в ледяном слое. В данном случае имеется в виду оценка соответствия двух параметров – скорости перемещения провода относительно оболочки и скорости движения фронта положительной температуры над проводом. При совпадении этих величин в любой момент времени над проводом наблюдается постоянная толщина прослойки с положительной температурой. При этом учитываются затраты энергии на процесс плавления. В ходе численных экспериментов определено значение мощности, равное 106 Вт, которое обеспечивает формирование области с положительной температурой над проводом при скорости перемещения проводника $v = 0,1 \text{ мм}/\text{с}$. После разогрева в течение 900 с начинается процесс проплавления. Расчетное время прохождения проводом ледяной оболочки при скорости перемещения проводника $0,1 \text{ мм}/\text{с}$ и толщине корки льда $\Delta H = 10 \text{ мм}$ определяется по формуле $\Delta t = \Delta H / v$ и составляет 100 с. Коэффициент теплообмена задан равным $5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град})$. После проведения расчетов значение скорости может быть скорректировано так же, как и момент начала движения.

Согласно диаграммам, показанным на рис. 2, проводник и прилегающий к нему слой водно-ледяной оболочки переходят в область положительных температур в моменты времени 450 и 560 с (в связи с ограничениями модели принято условное название для оболочки, предполагающее в указанной геометрической области твердое или жидкое состояние воды. Положительные значения температуры относятся только к жидкой фазе.) За этим следует перемещение проводника относительно оболочки. Можно говорить о том, что в момент времени 700 с провод проходит сквозь оболочку и освобождается от нее.

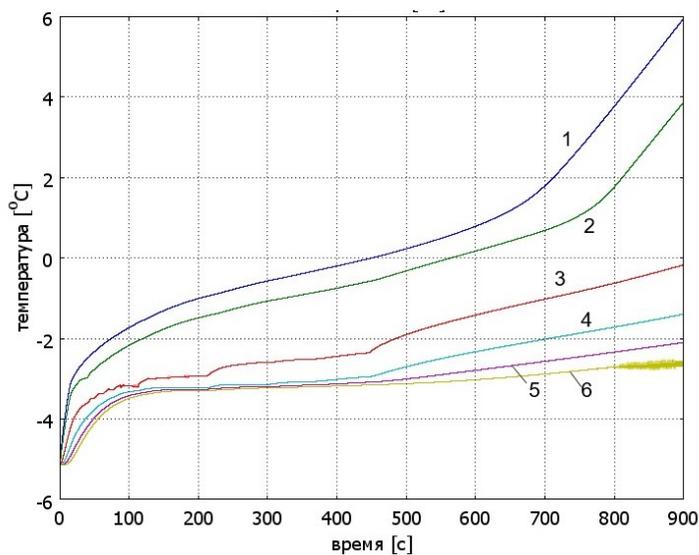


Рис. 2. Временные диаграммы температуры в оболочке на расстоянии от поверхности провода: 1 – 0 мм; 2 – 0,5 мм; 3 – 2,5 мм; 4 – 4,5 мм; 5 – 6,5 мм; 6 – 10 мм

На рис. 3 изображено распределение температуры в проводнике и в слое льда в момент времени 900 с. Несимметрия в картине распределения незначительна.

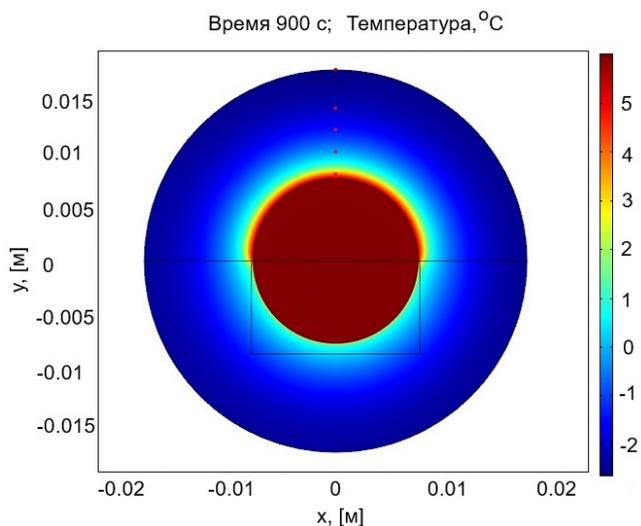


Рис. 3. Распределение температуры в проводе с ледяной оболочкой при плотности 900 кг/м^3 в момент времени 900 с

Диаграммы температуры в системе «провод – лед» вдоль вертикальной линии представлены на рис. 4. По сравнению со стационарным режимом

перепады температуры при разных коэффициентах теплообмена стали значительно меньше. Несимметрия диаграмм характеризуется разницей температур не более 0,3 градуса.

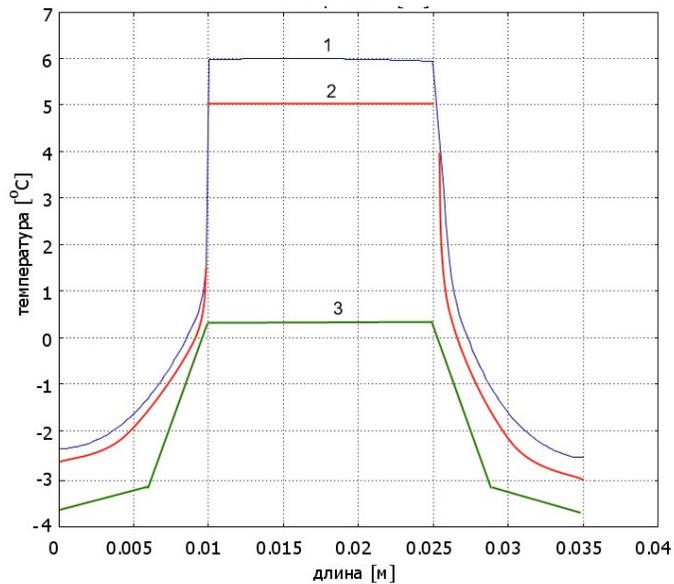


Рис. 4. Диаграммы температуры по высоте в проводе с оболочкой при коэффициенте теплообмена: 1 – 5 Вт/(м² · град) ; 2 – 25 Вт/(м² · град) ; 3 – 125 Вт/(м² · град)

Изменение плотности ледяной корки с 900 до 400 кг/м³ приводит к уменьшению времени нагрева до момента плавления на поверхности провода. Практически через 100 с температура на расстоянии 0,5 мм от поверхности становится положительной. При расчете значение мощности изменено со 106 до 88 Вт, остальные параметры оставлены прежними.

Согласно диаграммам, приведенным на рис. 5, температура водно-ледяной оболочки на расстоянии 6,5 мм от поверхности провода становится выше нуля через 650 с. Таким образом, время перемещения нагретого провода через комбинированную водно-ледяную оболочку снижается в несколько раз (положительные температуры соответствуют жидкой фазе). Мощность тепловыделения при заданных параметрах теплообмена с окружающей средой можно снизить еще больше.

Распределение температуры в системе «провод – лед (вода)» показано на рис. 6. Наблюдается значительное изменение по сравнению с предыдущим расчетом. Область положительных температур характеризуется не только повышенными значениями, но и существенной несимметрией. Сильно сказывается влияние воздушной прослойки под проводом, что приводит к уменьшению толщины области положительных температур. Таким образом, при определенных условиях в области ниже провода передача тепла снижается.

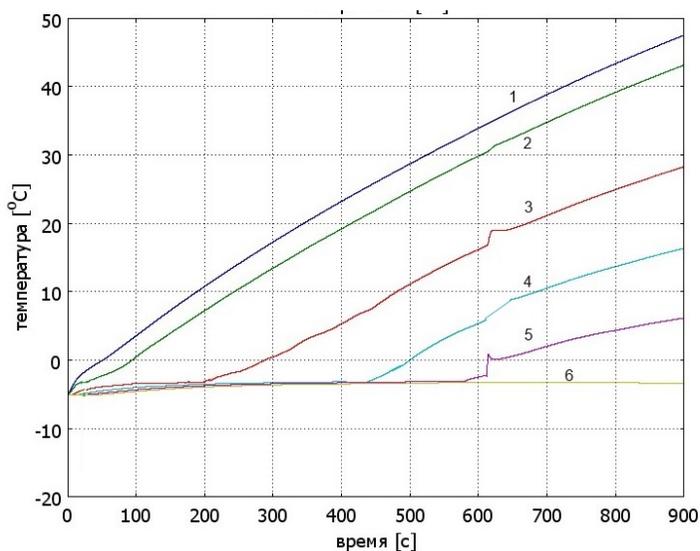


Рис. 5. Временные диаграммы температуры в оболочке на расстоянии от поверхности провода: 1 – 0 мм; 2 – 0,5 мм; 3 – 2,5 мм; 4 – 4,5 мм; 5 – 6,5 мм; 6 – 10 мм

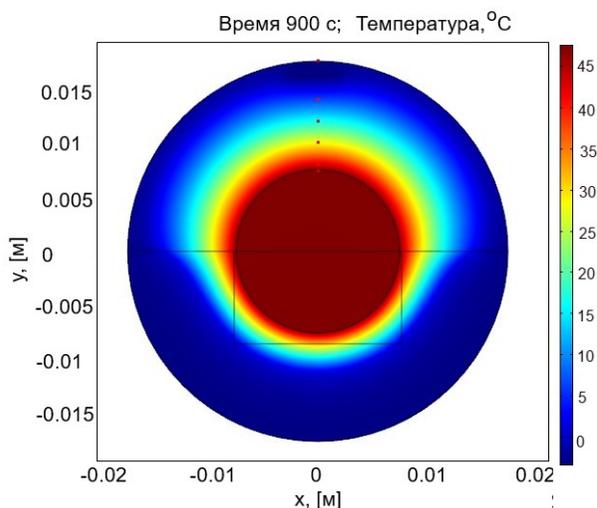


Рис. 6. Распределение температуры в проводе с оболочкой при плотности 400 кг/м^3 в момент времени 900 с

Расчет тепловых процессов в проводе с водно-ледяной оболочкой при коэффициенте теплообмена $25 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град})$ показывает практически полное совпадение с диаграммами температур, представленными на рис. 5, поэтому они не приведены. Это объясняется слабым влиянием внешнего термического сопротивления на перепад температуры в слое льда по сравнению с внутренним сопротивлением.

При моделировании процесса плавления ледяной оболочки с низкой плотностью, отличающейся пониженным коэффициентом теплопроводности, диаграммы температуры вдоль вертикальной оси имеют выраженную несимметрию (рис. 7).

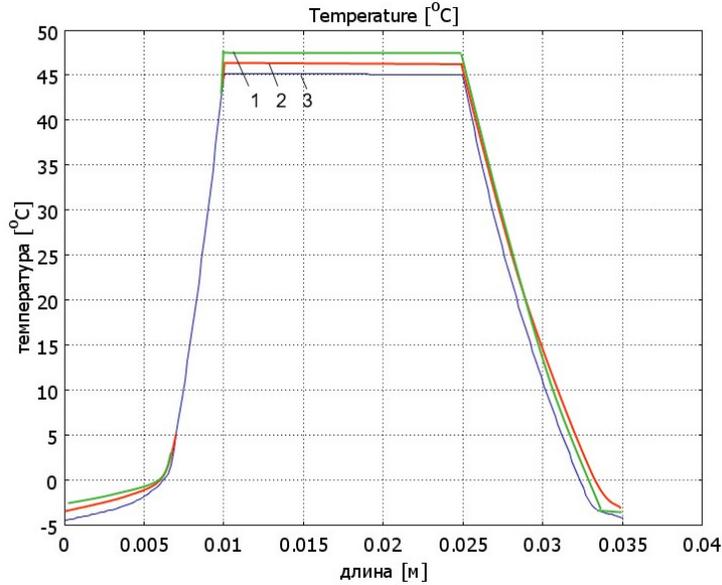


Рис. 7. Диаграммы температуры в проводе с ледяной (рыхлой) оболочкой при коэффициенте теплообмена: 1 – 5 Вт/(м² · град); 2 – 25 Вт/(м² · град); 3 – 125 Вт/(м² · град)

Выполнение основной задачи, связанной с освобождением провода от ледяной оболочки, приводит к изменению площади поверхности, так как теплообмен происходит между поверхностью провода и воздушной средой, а не между поверхностью ледяной оболочки и воздухом. Это приводит к изменению теплового потока в окружающую среду. Данный процесс сопровождается существенным повышением температуры провода. Результаты расчетов этого процесса представлены в виде таблицы и диаграмм (рис. 8).

Результаты расчетов

№	P , Вт	α , Вт/(м ² · град)	τ , с	T_{\max} , °C	T_{10} , °C	T_{30} , °C
1	106	5	1700	440	110	280
2	106	25	366	85	64	84
3	106	125	75	12,8	12,8	12,8
4	88	5	1800	365	100	230
5	88	25	350	69	56	69
6	88	125	90	9,8	9,8	9,8

В таблице отображены значения температуры в моменты времени 10 и 30 мин для того, чтобы определить необходимость проведения каких-либо действий.

Временные диаграммы температуры голого провода необходимы для оценки риска перегрева проводника при неравномерном покрытии поверхности провода ледяной оболочкой во время плавки гололеда. На основании анализа табличных данных и диаграмм видно, что даже при довольно невысоких мощностях тепловыделения нагрев голого провода приводит к недопустимому перегреву, если вовремя не снизить ток линии. Можно сделать вывод о том, что при коэффициентах конвективного теплообмена $5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град})$ при подогреве провода в течение времени свыше 500 с проводник разогревается до недопустимых температур. При заданном коэффициенте теплообмена предпочтительнее выглядит краткосрочный режим плавки с заданным временем, когда температуры в проводе не превышают $100 \text{ }^\circ\text{C}$. При коэффициентах конвективного теплообмена 25 и $125 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град})$, даже при длительности нагрева более 2000 с , диапазон конечных значений температуры не превышает $100 \text{ }^\circ\text{C}$. При таких погодных условиях длительный режим не приводит к перегреву и является более безопасным.

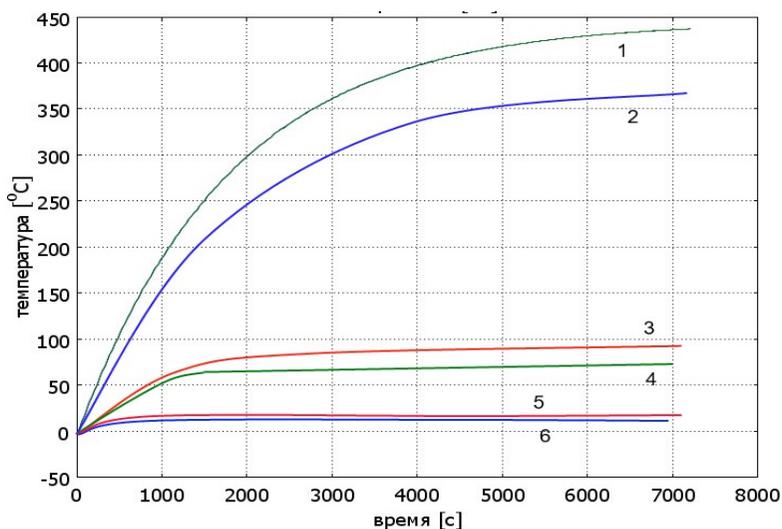


Рис. 8. Временные диаграммы температуры провода без ледяной корки:

- 1 – мощность 106 Вт , коэффициент теплообмена $5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град})$;
- 2 – мощность 88 Вт , коэффициент теплообмена $5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град})$;
- 3 – мощность 106 Вт , коэффициент теплообмена $25 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град})$;
- 4 – мощность 88 Вт , коэффициент теплообмена $25 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град})$;
- 5 – мощность 106 Вт , коэффициент теплообмена $125 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град})$;
- 6 – мощность 88 Вт , коэффициент теплообмена $125 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град})$

Проведение исследования целесообразности и эффективности использования различных моделей тепловых процессов при плавке гололеда на проводах показало, что стационарные модели дают ответ только на вопрос о возможности расплавления ледяной оболочки. Расчет тепловых процессов на нестационарной модели показал возможность не только проплавления ледяной оболочки, но и значительного перегрева освободившегося провода. Определены варианты развития событий. При низких значениях коэффициента теплообмена температура провода возрастает до недопустимых значений. Требуется контроль наличия ледяной оболочки или температуры провода. Альтернативой является измерение скорости ветра и ограничение времени нагрева. Увеличение коэффициента теплообмена между поверхностью ледяной оболочки или, после проплавления, провода с окружающей средой не приводит к отрицательным последствиям в виде недопустимого перегрева. Возможен перерасход энергии, который следует ограничить.

Заключение

Использование различных моделей процесса плавки гололеда на проводах показало возможность повышения точности расчетов в условиях ограниченных возможностей используемого математического аппарата.

Корректировка параметров упрощенной модели процесса плавления позволяет определить мощность и время при заданных значениях плотности и толщины оболочки и коэффициента теплообмена, зависящего от скорости ветра.

Проведение математических исследований процессов плавки гололеда на проводах в различных погодных условиях при разных токах нагрузки в линии позволит подбирать оптимальные режимы дополнительной загрузки линии реактивными токами для эффективной плавки при допустимой перегрузке трансформаторов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Базаров А.А., Данилушкин А.И., Осипов В.С.* Система плавки гололеда на проводах линий электропередачи без отключения нагрузки // Вестник СамГТУ. Технические науки. 2015. № 3. С. 109–117.
2. *Чубик И.А., Маслов А.М.* Справочник по теплофизическим характеристикам пищевых продуктов и полуфабрикатов. М.: Пищевая промышленность, 1970. 184 с.
3. *Мясоедов Ю.В., Коржова О.Н.* Плавка гололеда на линиях электропередачи: методы, инновации, эксплуатация // Вестник Амурского государственного университета. Серия: Естественные и экономические науки. Амурский государственный университет. 2019. № 87. С. 65–66.
4. *Черномаз Д.А., Шовкопляс С.С.* Предотвращение аварий при гололедообразовании на воздушных линиях электропередачи сверхвысокого напряжения // Кибернетика энергетических систем. Сборник материалов XL сессии научного семинара по тематике «Диагностика энергооборудования». 2018. Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова (Новочеркасск). С. 227–235.
5. *Елизарьев А.Ю., Валеев А.Р.* Плавка гололеда на воздушных линиях электропередачи без отключения потребителей // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2015. Т. 19, № 4 (70). С. 59–65.
6. *Елизарьев А.Ю., Шарифиева Г.А.* Технико-экономическая оценка системы плавки гололеда наложением постоянного тока на переменный без отключения потребителей // Молодежный вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2015. № 1 (13). С. 13–18.

7. *Кольцов А.В., Ковтун Г.Н., Горюшин Ю.А., Иваницкая И.В., Языченков Н.С., Волошин А.Г., Савотин О.А., Лебедев Д.Е.* Линейный комплекс коммутационных аппаратов: особенности организации системы питания и информационной системы // Вестник Северокавказского федерального университета. 2016. № 6 (57). С. 25–30.
8. *Князев С.Ю., Щербакова Е.Е., Щербаков А.А.* Моделирование плавки гололеда на проводах воздушных линий электропередач с помощью метода точечных источников поля // Пром-Инжиниринг. Труды II международной научно-технической конференции. ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (национальный исследовательский университет). 2016. С. 423–428.
9. *Ivanov V.A., Ryabtsev Y.N.* Simulation of formation and ice in the Kerch strait // Russian meteorology and hydrology. Alberton press, Inc. V. 43, № 1. 2018. С. 36–42.
10. *Sleptsov S.D., Rubtsov N.A., Savinova N.A.* Simulation of ice melting in a single-phase statement of the Stefan problem // 34th Siberian thermophysical seminar dedicated to the 85th anniversary of academician A.K. Rebrov, STS 2018. Novosibirsk, 27–30 августа 2018 г. Journal of physics: Conference series. Institute of Physics Publishing. V. 1105. 2018.
11. *Savinova N.A., Sleptsov S.D., Grishin M.A.* Numerical simulation of melting of scattering ice in a single-phase Stefan problem // 5th All-Russian scientific conference thermophysics and physical hydrodynamics with the school for young scientists, ТРН 2020 Yalta, Crimea, 13–20 сентября 2020 г. Journal of physics: Conference series. 5. Сер. "5th All-Russian Scientific Conference Thermophysics and Physical Hydrodynamics with the School for Young Scientists, ТРН 2020". V. 1675. 2020.
12. *Рогинская Л.Э., Карташев В.В., Лютов А.Г., Рахматуллина Г.Э.* Моделирование установки для плавки гололеда с использованием реактивных токов на ВЛ 10 кВ ПС Альмухаметово ООО «Башкирэнерго» // Вопросы надежности работы систем электроснабжения в условиях гололедно-ветровых нагрузок. Материалы международной научно-практической конференции. Уфимский государственный авиационный технический университет. Уфа, 2016. С. 76–81.
13. *Закарюкин В.П., Крюков А.В.* Моделирование динамики плавки гололеда на проводах воздушных линий электропередачи и контактных подвесках тяговых сетей // System analysis and mathematical modeling. Байкальский государственный университет. 2022. Т. 4, № 1. С. 11–37.
14. *Закарюкин В.П., Крюков А.В., Лагунова Н.С.* Моделирование режимов плавки гололеда в тяговых сетях // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. Иркутский государственный университет путей сообщения. 2017. № 2 (54). С. 167–174.
15. *Волков А.И., Жарский И.М.* Большой химический справочник. М.: Советская школа, 2005. 608 с.
16. *Михеев М.А., Михеева И.М.* Основы теплопередачи. М.: Энергия, 1977. 344 с.

Статья поступила в редакцию 30 октября 2023 г.

MODELING OF THERMAL PROCESSES WHEN MELTING ICE ON POWER LINES

A.A. Bazarov, S.I. Budko *

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

E-mail: aleksbazarov@yandex.ru, budko-1998@mail.ru

***Abstract.** An analysis of the problem of ice formation on power line wires was carried out, and a review of work in the field of melting ice on various lines was carried out. Existing achievements and problems are noted. One of the reasons for the low equipment of lines with automated melting systems is the need to transfer the line from the operating state to the melting mode. One way to solve the problem is to combine these modes by loading the line with additional current without increasing the power transmitted to consumers. A set of issues on modeling thermal processes in the ice shell of power line wires during ice melting is considered. Limiting the power of heat generation in wires leads to the need to build a sufficiently accurate mathematical model to guarantee melting at different values of wind speed and temperature. A study of wire heating processes was carried out using models of stationary and non-stationary thermal conductivity. An algorithm is proposed for solving the thermal problem when a heated wire penetrates an ice shell, based on simulating the movement of the interface between the solid and liquid phases of water. The features of modeling the melting and crystallization process using a numerical method are described. When ice transitions to a molten state, melting reflects a change in density and the formation of an air gap, accompanied by a significant decrease in heat flows to the lower region of the ice shell. The results of numerical modeling of the process of melting an ice shell with a wire at different values of the convective heat transfer coefficient are presented. When analyzing the modeling results, conditions were identified for the occurrence of unacceptable overheating of a wire freed from ice. Various options for constructing a control system for the smelting process have been proposed to prevent overheating of the wire.*

***Keywords:** convective heat transfer, melting, heat release power, ice, power line wires, finite element method.*

REFERENCES

1. *Bazarov A.A., Danilushkin A.I., Osipov V.S. Sistema plavki gololeda na provodah linij elektroperedachi bez otklyucheniya nagruzki [System for melting ice on power transmission line wires without disconnecting the load] // Vestnik SamGTU. Tekhnicheskie nauki. 2015. № 3. Pp. 109–117. (In Russian)*
2. *Chubik I.A., Maslov A.M. Spravochnik po teplofizicheskim harakteristikam pishchevyh produktov i polufabrikatov [Handbook on the thermophysical characteristics of food products and semi-finished products]. M.: Pishchevaya promyshlennost', 1970. 184 p. (In Russian)*

* *Aleksandr A. Bazarov (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Stepan I. Budko, Postgraduate Student.*

3. *Myasoedov Yu.V., Korzhova O.N.* Plavka gololeda na liniyah elektroperedachi: metody, innovacii, ekspluatatsiya [Melting ice on power lines: methods, innovations, operation] // Vestnik Amurskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: estestvennye i ekonomicheskie nauki. Amurskij gosudarstvennyj universitet. 2019. № 87. Pp. 65–66. (In Russian)
4. *Chernomaz D.A., Shovkopyas S.S.* Predotvrashchenie avarij pri gololedoobrazovanii na vozdušnyh liniyah elektroperedachi sverhvyssokogo napryazheniya [Prevention of emergency situations due to ice formation on ultra-high voltage overhead power lines] // Kibernetika energeticheskikh sistem. Sbornik materialov HL sessii nauchnogo seminaru po tematike «Diagnostika energooborudovaniya». 2018. Yuzhno-Rossijskij gosudarstvennyj politekhnicheskij universitet (NPI) imeni M.I. Platova (Novocherkassk). Pp. 227–235. (In Russian)
5. *Elizariiev A.Yu., Valeev A.R.* Plavka gololeda na vozdušnyh liniyah elektroperedachi bez otklyucheniya potrebitelej [Melting ice on overhead power lines without disconnecting consumers] // Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviacionnogo tekhnicheskogo universiteta. Ufimskij gosudarstvennyj aviacionnyj tekhnicheskij universitet. 2015. V. 19, № 4 (70). Pp. 59–65. (In Russian)
6. *Elizariiev A.Yu., Sharafieva G.A.* Tekhniko-ekonomicheskaya ocenka sistemy plavki gololeda nalozheniem postoyannogo toka na peremennyj bez otklyucheniya potrebitelej [Technical and economic system for assessing the melting of bare ice by applying direct current to alternating current without disconnecting consumers] // Molodezhnyj vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviacionnogo tekhnicheskogo universiteta. 2015. № 1 (13). Pp. 13–18. (In Russian)
7. *Koltsov A.V., Kovtun G.N., Goryushin Yu.A., Ivanitskaya I.V., Yazychenkov N.S., Voloshin A.G., Savotin O.A., Lebedev D.E.* Linejnyj kompleks kommutacionnyh apparatov: osobennosti organizacii sistemy pitaniya i informacionnoj sistemy [Linear complex of switching devices: features of the organization of power supply systems and information systems] // Vestnik Severokavkazskogo Federal'nogo Universiteta. 2016. № 6 (57). Pp. 25–30. (In Russian)
8. *Knyazev S.Yu., Shcherbakova E.E., Shcherbakov A.A.* Modelirovanie plavki gololeda na provodah vozdušnyh linij elektroperedach s pomoshch'yu metoda tochechnyh istochnikov polya [Modeling melting of ice on overhead power lines using the point source method] // Prom-Inzhiniring. Trudy II mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii. FGBOU VPO «Yuzhno-Ural'skij gosudarstvennyj universitet» (nacional'nyj issledovatel'skij universitet). 2016. Pp. 423–428. (In Russian)
9. *Ivanov V.A., Ryabtsev Yu.N.* Modeling of ice formation and formation in the Kerch Strait / Russian Meteorology and Hydrology. Alberton Press, Inc. 43, 2018, No. 1. Pp. 36–42.
10. *Sleptsov S.D., Rubtsov N.A., Savinova N.A.* Modeling of ice melting in a single-phase formulation of the Stefan problem / 34th Siberian Thermophysical Seminar dedicated to the 85th anniversary of Academician A.K. Rebrova, STS 2018. Novosibirsk, August 27–30, 2018. Physical Journal: Conference Series. Institute of Physical Publishing. Volume 1105. 2018.
11. *Savinova N.A., Sleptsov S.D., Grishin M.A.* Numerical modeling of the melting of scattering ice in the single-phase Stefan problem / 5th All-Russian Scientific Conference “Thermophysics and Physical Hydrodynamics” with the School of Young Scientists, TPH 2020, Yalta, Crimea, September 13–20, 2020 Physical Journal: Conference Series Ser. “5th All-Russian Scientific Conference “Thermophysics and Physical Hydrodynamics” with the School of Young Scientists TPH 2020” Volume 1675. 2020.
12. *Roginskaya L.E., Kartashev V.V., Lyutov A.G., Rakhmatullina G.E.* Modelirovanie ustanovki dlya plavki gololeda s ispol'zovaniem reaktivnyh tokov na VL 10 kV PS Al'muhametovo OOO "Bashkirenergo" [Modeling of an installation for melting ice using reactive currents on a 10 kV overhead line at Almukhametovo Substation LLC "Bashkirenergo"] // Voprosy nadezhnosti raboty sistem elektrosnabzheniya v usloviyah gololedno-vetrovyh nagruzok. Materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. Ufimskij gosudarstvennyj aviacionnyj tekhnicheskij universitet (Ufa). 2016. Pp. 76–81. (In Russian)
13. *Zakaryukin V.P., Kryukov A.V.* Modelirovanie dinamiki plavki gololeda na provodah vozdušnyh linij elektroperedachi i kontaktnyh podvesok tyagovyh setej [Modeling the dynamics of ice melting on the wires of overhead power lines and catenary suspensions of traction networks] // System analysis and mathematical modeling. Bajkal'skij gosudarstvennyj universitet. V. 4, № 1. 2022. Pp. 11–37.

14. *Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Lagunova N.S.* Modelirovanie rezhimov plavki gololeda v tyagovyh setyah [Modeling of ice melting modes in traction networks] // *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyj analiz. Modelirovanie.* Irkutskij gosudarstvennyj universitet putej soobshcheniya. 2017. № 2 (54). Pp. 167–174.
15. *Volkov A.I., Zharsky I.M.* Bol'shoj himicheskij spravochnik [Large chemical reference book]. M.: Sovetskaya shkola, 2005. 608 p.
16. *Mikheev M.A., Mikheeva I.M.* Osnovy teploperedachi [Basics of Heat Transfer]. M.: Energiya, 1977. 344 p.

УДК 537.312

ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ НАНОЖИДКОСТИ НА ОСНОВЕ ТРАНСФОРМАТОРНОГО МАСЛА

*С.М. Коробейников, В.Е. Шевченко, А.В. Ридель, Л.П. Горева**

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

E-mail: korobeynikov@corp.nstu.ru, ridel@corp.nstu.ru, goreva@corp.nstu.ru

Аннотация. *Предпринята попытка оценки электропроводности наножидкости на основе трансформаторного масла. Для этого было приготовлено несколько образцов наножидкости с различными концентрациями диэлектрических наночастиц диоксида кремния и проводящих наночастиц цинка. Экспериментально были измерены диэлектрическая проницаемость и электропроводность полученных наножидкостей. После обработки результатов эксперимента был произведен теоретический расчет с применением формулы Нильсена для композиционных диэлектрических материалов. Результаты расчета сопоставлены с данными эксперимента. В процессе сравнительного анализа отмечено качественное соответствие расчетных и экспериментальных значений диэлектрической проницаемости. Однако экспериментальные и расчетные значения электропроводности существенно различаются. Измеренная электропроводность наномасла оказалась в несколько раз ниже электропроводности исходного масла, в особенности при использовании наночастиц оксида кремния. Обнаруженное расхождение между расчетами и экспериментом объясняется адсорбцией ионов на поверхности частиц и уменьшением тем самым концентрации ионов в жидкости.*

Ключевые слова: *трансформаторное масло, наножидкости, ионы, адсорбция, электропроводность, наночастицы.*

Введение

Изучение влияния включений частиц на электропроводность жидких диэлектриков по-прежнему является актуальной проблемой для электроэнергетики. Значимость возможного влияния присутствия частиц была показана еще в 1970 г. К.У. Смитом и Дж.Х. Калдервудом [1]. При этом особое внимание следует уделить наночастицам, поскольку их фильтрация в ходе исследования [1] привела к наиболее заметному изменению электропроводности. Более поздние работы в этой области также подтверждают возможность существенного влияния наночастиц на электропроводность [2–6].

* *Сергей Миронович Коробейников, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой.*

В.Е. Шевченко, студент.

Александр Викторович Ридель, кандидат технических наук, доцент.

Людмила Павловна Горева, кандидат технических наук, доцент.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ № 22-7910198.

Существующие исследования в области изучения электропроводности наножидкостей включают описание широкого спектра образцов с различными жидкостями-основаниями и различными наночастицами [7–9]. Однако результаты аналогичных работ зачастую противоречат друг другу. На наш взгляд, это связано с учетом множества различных факторов, таких как вид используемых частиц, жидкостей или использование поверхностно-активных веществ для стабилизации наножидкости [10–12].

В качестве основы для приготовления наножидкостей особое внимание было уделено таким жидкостям, как вода, этиленгликоль и смеси этих жидкостей в различных концентрациях [13–18]. Общие выводы из рассмотренных работ – в большинстве случаев добавление наночастиц переводит слабопроводящую жидкость в проводящую, значительно увеличивая электропроводность. Кроме того, отмечено значительное влияние вязкости жидкости, концентрации ионов и наличия двойного электрического слоя на изменение электропроводности жидкости.

В рассмотренных статьях было предложено множество корреляционных уравнений для оценки изменения электропроводности на основе экспериментальных данных. Тем не менее в каждой работе предложенные выражения значительно отличались друг от друга, представляя собой линейную зависимость [19, 20], квадратичную и кубическую зависимости [21–23], а также логарифмическую зависимость [24]. В связи с этим на основе этих работ достаточно сложно выработать единую методику оценки электропроводности, особенно учитывая, что рассмотренные в них наножидкости были приготовлены на основе воды или этиленгликоля, а не рассматриваемого нами трансформаторного масла.

Основным же направлением существующих исследований наножидкостей, приготовленных на основе трансформаторного масла, является изучение изменения электрической прочности, причем электропроводность не всегда контролировалась [25–27]. В связи с этим было решено провести измерения электропроводности наножидкостей, приготовленных нами на основе чистого трансформаторного масла. Целью данного исследования является оценка и описание влияния наночастиц на электропроводность и диэлектрическую проницаемость жидкого диэлектрика с использованием теоретических и экспериментальных данных. При проведении эксперимента было решено также рассмотреть возможное влияние как диэлектрических, так и проводящих частиц на свойства наномасла, в качестве которых выбраны часто используемые наночастицы цинка и оксида кремния.

Расчет характеристик композиционного диэлектрического материала

Наиболее правдоподобное описание диэлектрической проницаемости масла с добавлением наночастиц может быть получено с использованием формулы Нильсена, которая ранее была применена для оценки характеристик трансформаторного масла с добавлением керамических микрочастиц [28]. В исследовании [28] было показано полное совпадение данных измерений и расчета с применением формулы Нильсена при значениях объемной доли частиц менее 50 %. В этом случае выражение для расчета диэлектрической проницаемости наножидкостей будет следующим:

$$\varepsilon = \varepsilon_{oil} \frac{1 + A \cdot B \cdot V_k}{1 - A \cdot \psi \cdot V_k}, \quad (1)$$

где ε_{oil} – диэлектрическая проницаемость чистого масла; A – коэффициент, характеризующий форму частиц; V_k – объемная доля частиц в масле.

Коэффициент B зависит от диэлектрической проницаемости частиц и рассчитывается следующим образом:

$$B = \frac{\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_{oil}} - 1}{\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_{oil}} + A}, \quad (2)$$

где ε_p – диэлектрическая проницаемость частиц.

Коэффициент ψ зависит от максимально возможной объемной доли частиц и был рассчитан в соответствии с выражением

$$\psi = 1 + \frac{1 - P_m}{P_m^2} \cdot V_k, \quad (3)$$

где P_m – максимально возможная объемная доля частиц.

Эти соображения также применимы для расчета электропроводности композиционных материалов. В этом случае (1) и (2) преобразуются следующим образом:

$$\sigma = \sigma_{oil} \frac{1 + A \cdot B \cdot V_k}{1 - B \cdot \psi \cdot V_k}, \quad (4)$$

$$B = \frac{\frac{\sigma_p}{\sigma_{oil}} - 1}{\frac{\sigma_p}{\sigma_{oil}} + A}, \quad (5)$$

где σ_{oil} – электропроводность чистого масла; σ_p – электрическая проводимость частиц.

В расчетах принимается, что частицы SiO_2 являются идеальным диэлектриком, а частицы Zn – идеальным проводником с соответствующими значениями диэлектрической проницаемости и электропроводности. Форму частиц считали сферической ($A=1,5$), а максимально возможную объемную долю твердой фазы принимали равной 0,74.

Электропроводность различных типов и марок трансформаторного масла может значительно отличаться друг от друга. Чтобы убедиться в точности результатов расчетов, было решено провести экспериментальные измерения электропроводности как для подготовленных наножидкостей, так и для чистого масла.

Результаты эксперимента

В качестве основы для наножидкости использовалось чистое трансформаторное масло ГК, в которое были добавлены или диэлектрические наночастицы диоксида кремния диаметром 20 нанометров, или проводящие наночастицы цинка диаметром 100 нанометров.

Свежее масло марки ГК не подвергалось дополнительной обработке после приобретения, как и наночастицы цинка и диоксида кремния. Единственный момент, который следует подчеркнуть, заключается в том, что эти вещества хранились в закрытых емкостях до смешивания.

Цель эксперимента состояла в том, чтобы зафиксировать изменения электрических характеристик масла после добавления нанопорошков и дальнейшие изменения этих параметров при увеличении концентрации частиц примерно на порядок величины.

Взвешивание частиц для приготовления смеси проводилось на химических весах с точностью до четвертого знака. Необходимый объем масла отмерялся в специальной мерной колбе. После замеров масло с добавленными частицами отправлялось на диспергирование для равномерного распределения частиц по всему объему масла.

Диспергирование осуществлялось в два этапа. Первый этап включал обработку ультразвуком с помощью ультразвукового устройства П10. Мощность устройства составляет 1200 Вт при рабочей частоте 22 килогерца. Обработка одного образца осуществлялась в течение 30 минут.

Вторая стадия приготовления наножидкости проводилась с помощью диспергатора ИКА Т25 со скоростью вращения 23000 оборотов в минуту. Перемешивание происходило в три подхода по 10 минут для каждого образца. Интервал между подходами составлял 10 минут. После завершения процесса диспергирования приготовленные наножидкости направлялись для проведения измерений.

Измерения проходили в соответствии со стандартом ИЕС для определения диэлектрической проницаемости, тангенса угла диэлектрических потерь и удельного электрического сопротивления [29].

В качестве измерительного прибора использовался тестер трансформаторного масла BAUR DTL C. Инструментальная погрешность измерения составляет 0,5 %. Измерения проводились при температуре масла, равной 90 °С, и напряжении, равном 500 вольтам. Достоверность данных, полученных в ходе измерения, была обеспечена двумя измерениями для каждого образца наножидкости.

Результаты измерений диэлектрической проницаемости и удельного электрического сопротивления для чистого масла и наножидкостей представлены в таблице.

В соответствии с (1)–(5) были рассчитаны диэлектрическая проницаемость и электропроводность полученных наножидкостей. Удельное электрическое сопротивление определяли из значений электропроводности. Далее был проведен сравнительный анализ результатов расчета с экспериментальными данными. Результаты представлены на рис. 1–4 в виде графиков зависимости диэлектрической проницаемости и удельного электрического сопротивления от объемного содержания частиц для наножидкостей с SiO₂ и Zn соответственно.

Следует отметить, что расчетные значения диэлектрической проницаемости не противоречат экспериментальным данным как для SiO_2 , так и для Zn , в том числе имеет значение тот факт, что диэлектрическая проницаемость масла с частицами Zn оказалась несколько выше по сравнению с диэлектрической проницаемостью наномасла на основе SiO_2 .

Значения диэлектрической проницаемости и удельного сопротивления для исследуемых образцов масла

Образец	Изменяемые параметры	
	Диэлектрическая проницаемость	Удельное сопротивление, Ом·м
Чистое масло	2.05	$114 \cdot 10^9$
Масло + SiO_2 , 0,001 г / 500 мл	2.05	$126 \cdot 10^9$
Масло + SiO_2 , 0,01 г / 500 мл	2.05	$267 \cdot 10^9$
Масло + SiO_2 , 0,1 г / 500 мл	2.05	$146 \cdot 10^{10}$
Масло + Zn , 0,1 г / 500 мл	2.06	$198 \cdot 10^9$
Масло + Zn , 1 г / 500 мл	2.06	$299 \cdot 10^9$

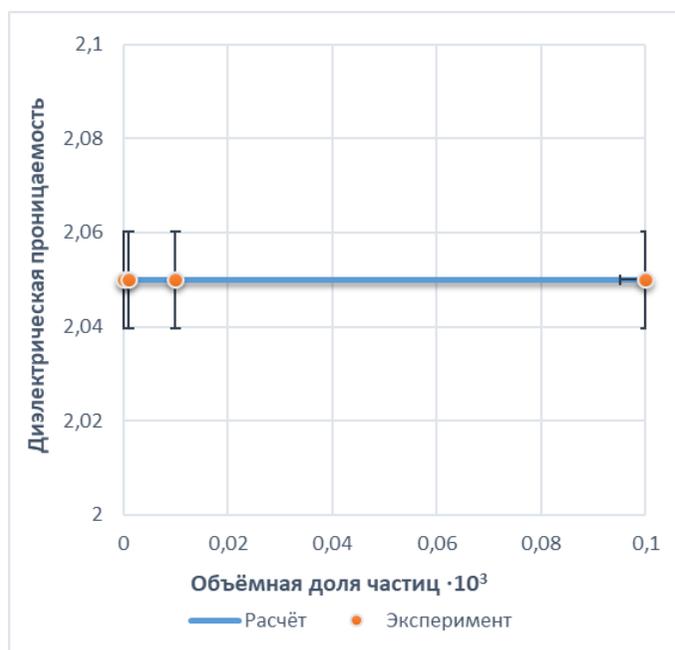


Рис. 1. Зависимость диэлектрической проницаемости наномасла на основе SiO_2 от объемной доли частиц

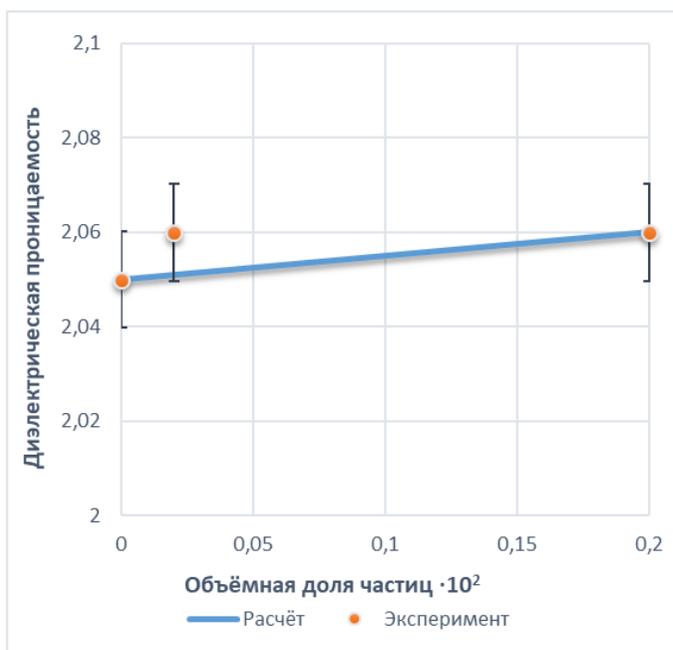


Рис. 2. Зависимость диэлектрической проницаемости наномасла на основе Zn от объёмной доли частиц

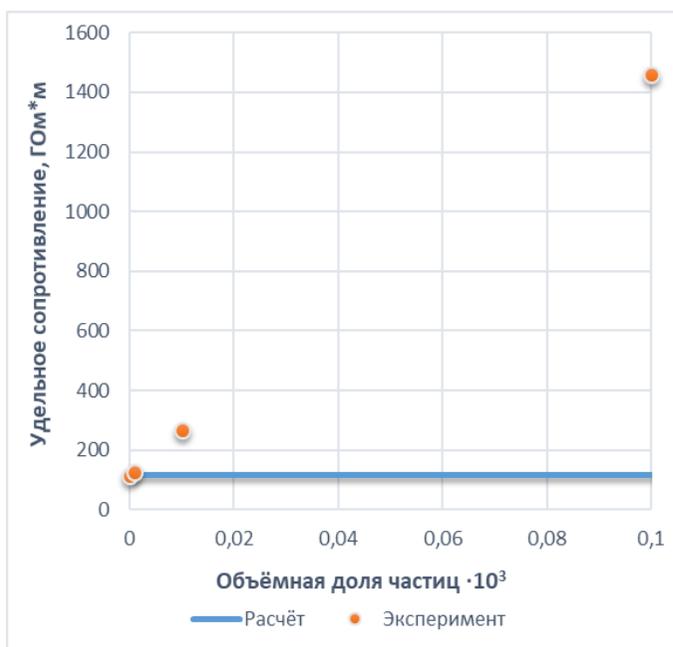


Рис. 3. Зависимость удельного электрического сопротивления наномасла на основе SiO₂ от объёмной доли частиц

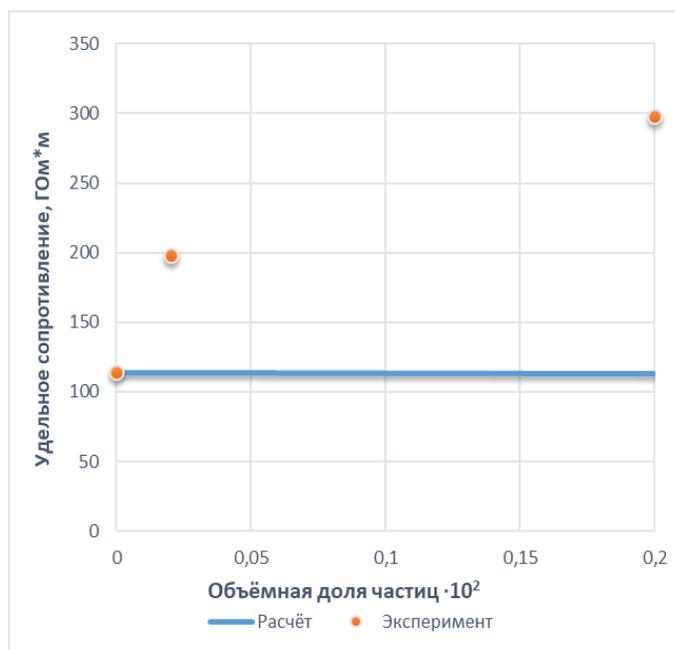


Рис. 4. Зависимость удельного электрического сопротивления наномасла на основе Zn от объемной доли частиц

Более примечательным является изменение удельного сопротивления смесей. Измеренная зависимость удельного сопротивления наномасла от объемной доли включений явно противоречит расчету, в котором зависимость удельного сопротивления от концентрации частиц незначительна.

С чем может быть связано это противоречие? Дело в том, что электропроводность жидких диэлектриков имеет преимущественно ионную природу [30, 31]. В этом случае носителями заряда будут ионы, содержащиеся в жидкости и образующиеся главным образом в результате электролитической диссоциации примесей. Когда наночастицы попадают в масло, запускается процесс адсорбции ионов частицами, в результате чего их поверхность приобретает заряд.

Это приводит к тому, что количество носителей заряда непосредственно в жидкости уменьшается и добавленные частицы становятся носителями заряда. Так как частицы в слабых электрических полях обладают значительно меньшей подвижностью по сравнению с ионами, результирующее сопротивление будет значительно выше за счет уменьшения числа ионов в жидкости.

Схожий эффект можно наблюдать в статье [32], где после определенного порога концентрации частиц отмечено снижение электропроводности приготовленной наножидкости, предположительно за счет того, что используемый в качестве частиц оксид алюминия является активным адсорбентом. Авторы связывают это снижение с недостатком в жидкости ионов для компенсации и увеличения подвижности за счет двойного электрического слоя.

Важным замечанием является то, что оксиды являются более активными адсорбентами по сравнению с металлами. Это объясняет более значительное снижение электропроводности наножидкости на основе SiO₂ при меньшей объемной доле в сравнении с наножидкостью на основе Zn.

Следует отметить, что адсорбция частицами ионов одного знака должна приводить к сдвигу ионного равновесия в жидкости. В свою очередь, этот сдвиг равновесия провоцирует дополнительную диссоциацию ионных примесей и образование большего количества ионов обоих знаков. По-видимому, этим же фактором можно объяснить рост электропроводности в ряде работ, в которых основой наножидкости являются слабопроводящие ионогенные жидкости типа воды, этиленгликоля [7, 9].

При высокой концентрации ионогенных примесей увеличение электропроводности в результате образования дополнительных носителей заряда может компенсировать снижение электропроводности и даже привести к ее увеличению по сравнению с чистым диэлектриком. В связи с этим можно сделать вывод, что в очищенном трансформаторном масле, рассматриваемом нами, недостаточно примесей, способных к диссоциации, чтобы компенсировать снижение электропроводности.

Заключение

В статье представлены результаты экспериментального измерения диэлектрической проницаемости и удельного электрического сопротивления наножидкостей, приготовленных на основе трансформаторного масла с добавлением различных концентраций нанопорошков SiO_2 и Zn .

После проведенных измерений была предпринята попытка описать процесс изменения электропроводности и диэлектрической проницаемости жидких диэлектриков в результате добавления наночастиц. Полученные теоретические результаты анализируются в сравнении с экспериментальными данными.

Анализ выявил, что расчетные значения диэлектрической проницаемости не противоречат экспериментальным данным. Однако выявилось несоответствие теоретического изменения электропроводности по сравнению с экспериментальными данными.

В связи с выявленным противоречием было предложено объяснение, указывающее на возможную причину расхождения и учитывающее большее изменение электропроводности наночастиц в смесях с оксидами кремния, чем с цинком при меньшей объемной доле частиц. Это связано с адсорбцией ионов на поверхности наночастиц, особенно оксида кремния, в результате чего количество ионов в жидкости уменьшается.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Mirza J.S., Smith C.W., Calderwood J.H.* Liquid motion and internal pressure in electrically stressed insulating liquids // *Journal of Physics D: Applied Physics*. 1970. V. 3. № 4. P. 580.
2. *Tettey K.E., Yee M.Q., Lee D.* Layer-by-layer assembly of charged particles in nonpolar media // *Langmuir*. 2010. V. 26. № 12. Pp. 9974–9980.
3. *Strubbe F., Beunis F., Neyts K.* Detection of elementary charges on colloidal particles // *Physical review letters*. 2008. V. 100. № 21. P. 218301.
4. *Smith P.G. et al.* Electrophoretic mobility measurement by differential-phase optical coherence tomography // *The Journal of Physical Chemistry C*. 2007. V. 111. № 6. Pp. 2614–2622.
5. *Smith P.G. et al.* Effect of surface hydrophilicity on charging mechanism of colloids in low-permittivity solvents // *The Journal of Physical Chemistry C*. 2007. V. 111. № 2. Pp. 840–848.
6. *Kobayashi M. et al.* Aggregation and charging of colloidal silica particles: effect of particle size // *Langmuir*. 2005. V. 21. № 13. Pp. 5761–5769.
7. *Minea A.A.* A review on electrical conductivity of nanoparticle-enhanced fluids // *Nanomaterials*. 2019. V. 9. № 11. P. 1592.

8. *Huang Z., Wang F., Wang Q., Yao W. et al.* Significantly enhanced electrical performances of eco-friendly dielectric liquids for harsh conditions with fullerene // *Nanomaterials*. 2019. V. 9. № 7. P. 989.
9. *Рудяк В.Я., Минаков А.В., Пряжников М.И.* Электропроводность наножидкостей с металлическими частицами // *Письма в Журнал технической физики*. 2019. Т. 45. № 9. С. 36–39.
10. *Fal J., Mahian O., Żyła G.* Nanofluids in the service of high voltage transformers: breakdown properties of transformer oils with nanoparticles, a review // *Energies*. 2018. V. 11. № 11. С. 2942.
11. *Li J., Liao R., Yang L.* Investigation of natural ester based liquid dielectrics and nanofluids // 2012 International Conference on High Voltage Engineering and Application. IEEE, 2012. P. 16–21.
12. *Dong M. et al.* Insight into the dielectric response of transformer oil-based nanofluids // *AIP Advances*. 2017. V. 7. № 2.
13. *Akilu S. et al.* Viscosity, electrical and thermal conductivities of ethylene and propylene glycol-based β -SiC nanofluids // *Journal of Molecular Liquids*. 2019. V. 284. Pp. 780–792.
14. *Żyła G. et al.* Nanodiamonds–ethylene glycol nanofluids: experimental investigation of fundamental physical properties // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2018. V. 121. Pp. 1201–1213.
15. *Bagheli S. et al.* Synthesis and experimental investigation of the electrical conductivity of water based magnetite nanofluids // *Powder Technology*. 2015. V. 274. Pp. 426–430.
16. *Coelho M.F. et al.* Permittivity and electrical conductivity of copper oxide nanofluid (12 nm) in water at different temperatures // *The Journal of Chemical Thermodynamics*. 2019. V. 132. P. 164–173.
17. *Sarojini K.G.K. et al.* Electrical conductivity of ceramic and metallic nanofluids // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2013. V. 417. Pp. 39–46.
18. *Guo Y. et al.* Experimental investigation of thermal and electrical conductivity of silicon oxide nanofluids in ethylene glycol/water mixture // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2018. V. 117. Pp. 280–286.
19. *Żyła G., Fal J.* Experimental studies on viscosity, thermal and electrical conductivity of aluminum nitride–ethylene glycol (AlN–EG) nanofluids // *Thermochimica acta*. 2016. V. 637. Pp. 11–16.
20. *Ganguly S., Sikdar S., Basu S.* Experimental investigation of the effective electrical conductivity of aluminum oxide nanofluids // *Powder Technology*. 2009. V. 196. № 3. Pp. 326–330.
21. *Fal J. et al.* Electrical conductivity and dielectric properties of ethylene glycol-based nanofluids containing silicon oxide–lignin hybrid particles // *Nanomaterials*. 2019. V. 9. № 7. P. 1008.
22. *Minea A.A.* Electrical and rheological behavior of stabilized Al₂O₃ nanofluids // *Current Nanoscience*. 2013. V. 9. № 1. Pp. 81–88.
23. *Chereches E.I., Minea A.A.* Electrical conductivity of new nanoparticle enhanced fluids: An experimental study // *Nanomaterials*. 2019. V. 9. № 9. P. 1228.
24. *Islam R., Shabani B.* Prediction of electrical conductivity of TiO₂ water and ethylene glycol-based nanofluids for cooling application in low temperature PEM fuel cells // *Energy Procedia*. 2019. V. 160. Pp. 550–557.
25. *Du B. et al.* Preparation and breakdown strength of Fe₃O₄ nanofluid based on transformer oil // 2012 International Conference on High Voltage Engineering and Application. IEEE, 2012. Pp. 311–313.
26. *Bakrtheen M., Karthik R., Madavan R.* Investigation of critical parameters of insulating mineral oil using semiconductive nanoparticles // 2013 International Conference on Circuits, Power and Computing Technologies (ICCPCT). IEEE, 2013. Pp. 294–299.
27. *Rafiq M. et al.* Effect of SiO₂ nanoparticle on insulating breakdown properties of transformer oil // 2016 IEEE international conference on high voltage engineering and application (ICHVE). IEEE, 2016. Pp. 1–4.
28. *Белокуров Е.М. и др.* Исследование диэлектрических сред с повышенной диэлектрической проницаемостью // *Коллоидный журнал*. 2001. Т. 63. № 4. С. 437–444.
29. *Insulating liquids Measurement of relative permittivity, dielectric dissipation factor (tan d) and d.c. resistivity, IEC 60247, 2004.*

30. *Felici N.J., Tobazeon R.E.* Charge carrier elimination and production by electro-dialytic polymers in contact with dielectric liquids // *Journal of Electrostatics*. 1981. V. 11. № 2. Pp. 135–161.
31. *Tobazeon R., Filippini J.C., Marteau C.* On the measurement of the conductivity of highly insulating liquids // *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 1994. V. 1. № 6. Pp. 1000–1004.
32. *Zawrah M.F. et al.* Stability and electrical conductivity of water-base Al_2O_3 nanofluids for different applications // *HBRC journal*. 2016. V. 12. № 3. Pp. 227–234.

Статья поступила в редакцию 16 декабря 2023 г.

MEASUREMENT OF ELECTRICAL CONDUCTIVITY OF TRANSFORMER OIL BASED NANOFLUID

S.M. Korobeynikov, V.E. Shevchenko, A.V. Ridel, L.P. Goreva *

Novosibirsk State Technical University
20, Karl Marx Ave., Novosibirsk, 630073, Russian Federation

E-mail: korobeynikov@corp.nstu.ru, ridel@corp.nstu.ru, goreva@corp.nstu.ru

Abstract. *In this article, an attempt was made to evaluate the electrical conductivity of a nanofluid based on transformer oil. For this purpose, several nanofluid samples with different concentrations of dielectric silicon dioxide nanoparticles and conductive zinc nanoparticles were prepared. The dielectric permittivity and electrical conductivity of the obtained nanofluids were measured experimentally. After processing the experimental results, a theoretical calculation was made using the Nielsen formula. After the calculation, the results were compared with the experimental data. In the process of comparative analysis, the correspondence of the calculated and experimental values of the dielectric permittivity was noted. There was also a discrepancy between the experimental and calculated values of electrical conductivity. An explanation is proposed for the discovered discrepancy between the calculated and experimental values. Presumably, the main reason for the decrease in electrical conductivity in the experiment is the adsorption of ion particles in the dielectric.*

Keywords: *transformer oil, nanofluids, ions, adsorption, conductivity, nanoparticles.*

REFERENCES

1. *Mirza J.S., Smith C.W., Calderwood J.H.* Liquid motion and internal pressure in electrically stressed insulating liquids // *Journal of Physics D: Applied Physics.* 1970. V. 3. № 4. P. 580.
2. *Tettey K.E., Yee M.Q., Lee D.* Layer-by-layer assembly of charged particles in nonpolar media // *Langmuir.* 2010. V. 26. № 12. Pp. 9974–9980.
3. *Strubbe F., Beunis F., Neyts K.* Detection of elementary charges on colloidal particles // *Physical review letters.* 2008. V. 100. № 21. Pp. 218301.
4. *Smith P.G. et al.* Electrophoretic mobility measurement by differential-phase optical coherence tomography // *The Journal of Physical Chemistry C.* 2007. V. 111. № 6. Pp. 2614–2622.
5. *Smith P.G. et al.* Effect of surface hydrophilicity on charging mechanism of colloids in low-permittivity solvents // *The Journal of Physical Chemistry C.* 2007. V. 111. № 2. Pp. 840–848.
6. *Kobayashi M. et al.* Aggregation and charging of colloidal silica particles: effect of particle size // *Langmuir.* 2005. V. 21. № 13. Pp. 5761–5769.
7. *Minea A.A.* A review on electrical conductivity of nanoparticle-enhanced fluids // *Nanomaterials.* 2019. V. 9. № 11. P. 1592.
8. *Huang Z., Wang F., Wang Q., Yao W. et al.* Significantly enhanced electrical performances of eco-friendly dielectric liquids for harsh conditions with fullerene // *Nanomaterials.* 2019. V. 9. № 7. P. 989.
9. *Rudyak V.Y., Minakov A.V., Pryazhnikov M.I.* Elektroprovodnost' nanozhidkostej s metallicheskimi chasticami [Electrical conductivity of nanofluids with metal particles] // *Pis'ma v zhurnal tekhnicheskoy fiziki.* 2019. V. 45. № 9. Pp. 36–39. (In Russian)
10. *Fal J., Mahian O., Żyła G.* Nanofluids in the service of high voltage transformers: breakdown properties of transformer oils with nanoparticles, a review // *Energies.* 2018. V. 11. № 11. C. 2942.

* *Sergej M. Korobejnikov (Dr. (Techn.)), Professor.*

V.E. Shevchenko, Student.

Alexander V. Rydel (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.

Ludmila P. Goreva (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.

11. *Li J., Liao R., Yang L.* Investigation of natural ester based liquid dielectrics and nanofluids // 2012 International Conference on High Voltage Engineering and Application. IEEE, 2012. Pp. 16–21.
12. *Dong M. et al.* Insight into the dielectric response of transformer oil-based nanofluids // AIP Advances. 2017. V. 7. № 2.
13. *Akilu S. et al.* Viscosity, electrical and thermal conductivities of ethylene and propylene glycol-based β -SiC nanofluids // Journal of Molecular Liquids. 2019. V. 284. Pp. 780–792.
14. *Żyła G. et al.* Nanodiamonds–ethylene glycol nanofluids: experimental investigation of fundamental physical properties // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2018. V. 121. Pp. 1201–1213.
15. *Bagheli S. et al.* Synthesis and experimental investigation of the electrical conductivity of water based magnetite nanofluids // Powder Technology. 2015. V. 274. Pp. 426–430.
16. *Coelho M.F. et al.* Permittivity and electrical conductivity of copper oxide nanofluid (12 nm) in water at different temperatures // The Journal of Chemical Thermodynamics. 2019. V. 132. Pp. 164–173.
17. *Sarojini K.G.K. et al.* Electrical conductivity of ceramic and metallic nanofluids // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2013. V. 417. Pp. 39–46.
18. *Guo Y. et al.* Experimental investigation of thermal and electrical conductivity of silicon oxide nanofluids in ethylene glycol/water mixture // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2018. V. 117. Pp. 280–286.
19. *Żyła G., Fal J.* Experimental studies on viscosity, thermal and electrical conductivity of aluminum nitride–ethylene glycol (AlN–EG) nanofluids // Thermochimica acta. 2016. V. 637. Pp. 11–16.
20. *Ganguly S., Sikdar S., Basu S.* Experimental investigation of the effective electrical conductivity of aluminum oxide nanofluids // Powder Technology. 2009. V. 196. № 3. Pp. 326–330.
21. *Fal J. et al.* Electrical conductivity and dielectric properties of ethylene glycol-based nanofluids containing silicon oxide–lignin hybrid particles // Nanomaterials. 2019. V. 9. № 7. P. 1008.
22. *Minea A.A.* Electrical and rheological behavior of stabilized Al₂O₃ nanofluids // Current Nanoscience. 2013. V. 9. № 1. Pp. 81–88.
23. *Chereches E.I., Minea A.A.* Electrical conductivity of new nanoparticle enhanced fluids: An experimental study // Nanomaterials. 2019. V. 9. № 9. P. 1228.
24. *Islam R., Shabani B.* Prediction of electrical conductivity of TiO₂ water and ethylene glycol-based nanofluids for cooling application in low temperature PEM fuel cells // Energy Procedia. 2019. V. 160. Pp. 550–557.
25. *Du B. et al.* Preparation and breakdown strength of Fe₃O₄ nanofluid based on transformer oil // 2012 International Conference on High Voltage Engineering and Application. IEEE, 2012. Pp. 311–313.
26. *Bakrtheen M., Karthik R., Madavan R.* Investigation of critical parameters of insulating mineral oil using semiconductive nanoparticles // 2013 International Conference on Circuits, Power and Computing Technologies (ICCPCT). IEEE, 2013. Pp. 294–299.
27. *Rafiq M. et al.* Effect of SiO₂ nanoparticle on insulating breakdown properties of transformer oil // 2016 IEEE international conference on high voltage engineering and application (ICHVE). IEEE, 2016. Pp. 1–4.
28. *Belokurov E.M. et al.* Issledovanie dielektricheskikh sred s povyshennoj dielektricheskoy pronicaemost'yu [Investigation of dielectric media with increased dielectric permittivity] // Kolloidnyj zhurnal. 2001. V. 63. № 4. Pp. 437–444. (In Russian)
29. Insulating liquids Measurement of relative permittivity, dielectric dissipation factor (tan d) and d.c. resistivity, IEC 60247, 2004.
30. *Felici N.J., Tobazeon R.E.* Charge carrier elimination and production by electroalytic polymers in contact with dielectric liquids // Journal of Electrostatics. 1981. V. 11. № 2. Pp. 135–161.
31. *Tobazeon R., Filippini J.C., Marteau C.* On the measurement of the conductivity of highly insulating liquids // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 1994. V. 1. № 6. Pp. 1000–1004.
32. *Zawrah M.F. et al.* Stability and electrical conductivity of water-base Al₂O₃ nanofluids for different applications // HBRC journal. 2016. V. 12. № 3. Pp. 227–234.

УДК 621.313

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА ЛИНЕЙНОГО ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Ю.А. Макаричев, Я.А. Ратцев*

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

E-mail: makarichev2801@mail.ru, Ratt.Yar.Al@yandex.ru

Аннотация. *Линейные двигатели постоянного тока (ЛДПТ) с ограниченным ходом якоря находят применение в механизмах, осуществляющих возвратно-поступательное движение рабочего органа или стабилизацию его положения в следящих системах. Использование ЛДПТ вместо двигателей вращательного движения с преобразователем в виде кривошипно-шатунного механизма, винтовой пары или других подобных механических систем приводит к существенному упрощению кинематической схемы, повышению КПД и, как правило, повышению точности работы комплекса и его надежности. Существует ряд проблем при создании ЛДПТ, которые недостаточно полно отражены в научно-технической литературе. В частности, при параметрической оптимизации двигателя по массогабаритным и энергетическим критериям одним из основных лимитеров выступает перегрев обмотки, а в магнитоэлектрических машинах еще и перегрев постоянных магнитов, весьма чувствительных к величине рабочей температуры и термическим ударам. В статье изложена аналитическая методика расчета теплового состояния двигателя в установившемся режиме, основанная на методе тепловых схем замещения. Методика рассчитана для использования в программе параметрической оптимизации. Для уточнения значений априорных коэффициентов в аналитических выражениях предлагаемого алгоритма авторами численным методом конечных элементов был промоделирован ЛДПТ. По результатам моделирования была получена картина температурного поля машины и определены критические по нагреву участки. Верификация теоретических положений проведена в ходе экспериментальных исследований опытного образца двигателя. Испытания показали хорошую сходимости расчетных и экспериментальных параметров.*

Ключевые слова: *линейный двигатель, постоянные магниты, тепловой расчет, численное моделирование.*

Актуальность вопроса

Линейные двигатели постоянного тока (ЛДПТ) с ограниченным перемещением якоря служат для прямого привода исполнительных механизмов линейного движения, а также находят применение в системах стабилизации и корректировки положения элементов этих систем [1–4]. Примером использования ЛДПТ служат активные амортизаторы некоторых современных автомобилей, системы

* Юрий Александрович Макаричев, доктор технических наук, заведующий кафедрой «Электромеханика и автомобильное оборудование».

Ярослав Алексеевич Ратцев, старший преподаватель кафедры «Электромеханика и автомобильное оборудование».

виброзащиты точных приборов и механизмов, комплексы позиционирования прецизионных оптических приборов стационарного и бортового применения [4–8]. ЛДПТ находят применение в клапанных механизмах газотурбинных двигателей, где с успехом заменяют гидравлические и пневматические приводы. Прямые приводы линейных механизмов позволяют исключить, в отличие от приводов с использованием вращающихся электродвигателей, преобразователь (редуктор) вращающегося движения в линейное перемещение. Это значительно упрощает кинематическую схему, снижает массу и повышает эксплуатационные характеристики системы. Постоянно расширяющееся использование ЛДПТ объясняется преимуществами, которыми они обладают по сравнению с другими типами подобных приводов [9–14]:

- прямой привод на основе ЛДПТ исключает люфты, которые негативно сказываются на точности позиционирования;

- тяговая характеристика двигателя практически не зависит от положения якоря в пределах его рабочего хода. Это – существенное отличие от длинноходовых электромагнитов, которые обладают круто падающей силовой характеристикой в зависимости от рабочего зазора;

- линейный двигатель обладает высоким электромагнитным и электромеханическим быстродействием, что дает ему преимущества при синтезе системы управления для комплексов с повышенными требованиями по точности позиционирования в динамических режимах;

- ЛДПТ не требуют наличия пневмо- или гидросистемы для своего функционирования, что дает проектировщику свободу выбора конструктивного решения при компоновке изделия.

Однако при проектировании ЛДПТ имеется и ряд не до конца решенных проблем. Во-первых, имеется проблема снижения его массогабаритных характеристик [3]. Особенно остро эта задача стоит в системах, предназначенных для использования на борту летательных аппаратов. Во-вторых, мощность, потребляемая двигателем, должна быть минимальной. В-третьих, стоимость изделия, которая во многом определяется массой используемых постоянных магнитов, также должна быть минимизирована.

Эти задачи можно решить в рамках структурной и параметрической оптимизации.

В качестве параметров оптимизации для ЛДПТ, предназначенного для стабилизации платформы бортового оборудования летательного аппарата (ЛА), были выбраны: масса двигателя M , кг; потребляемая мощность P_1 , Вт; масса (в другом варианте объем) постоянных магнитов m_M , кг.

Критериями оптимизации, естественно, будут их минимальные значения

$$Y_1 = \min M ; Y_2 = \min P_1 , Y_3 = \min m_M \quad (1)$$

для области допустимых значений варьируемых переменных D_x , которая определяется совокупностью неравенств

$$H_i(x_1, x_2, \dots, x_i) \leq 0, \quad i = 1, 2, \dots, p, \quad (2)$$

где H_i – функция, накладывающая ограничения на некоторые варьируемые переменные, например положительность или целочисленность. Так, на один из варь-

ируемых параметров – число слоев обмотки якоря – накладывается ограничение целочисленности и четности.

Из-за нестрогости неравенств (2), допускающих возможность равенства, эти ограничения могут изображаться не только в виде поверхностей, но и в виде линий или отдельных точек на поверхности функции отклика.

Как и в любой электрической машине, в которой задача оптимизации поставлена подобным образом, в ЛДПТ одним из главных ограничителей выступает перегрев обмотки $\Delta\Theta_{об}$, град. Кроме того, в электрической машине с использованием постоянных магнитов критерием-ограничителем должен выступать и перегрев магнитов – многие магнитные материалы, особенно на основе Nd-Fe-B, чувствительны к величине рабочей температуры.

Поэтому задача оптимизации в обязательном порядке должна содержать блок расчета температурного поля машины. Ввиду того, что расчет нестационарного магнитного поля двигателя с минимальным количеством допущений – весьма трудоемкая задача, которая неоправданно «утяжелила» бы алгоритм и программу оптимизации, авторами предложено в ходе оптимизации использовать упрощенную методику и математическую модель теплового расчета, основанную на методе тепловых схем замещения [15, 17]. А на этапе выбора оптимального варианта расчет температурного поля предлагается провести по уточненной методике численного моделирования методом конечных элементов [16, 18–20].

Расчет двигателя методом тепловых схем замещения

В качестве объекта теплового расчета и моделирования выбран линейный двигатель, предназначенный для стабилизации платформы с оптическим оборудованием летательного аппарата. Основные номинальные параметры двигателя, определенные техническим заданием:

– Максимальное тяговое усилие, Н	20
– Максимальное напряжение питания, В	27±3
– Рабочий ход якоря, мм	±8
– Свободный ход якоря, мм	±18
– Электромагнитная постоянная, мс	2÷4

В ТЗ требования к массе и габаритам двигателя определены как критерии оптимальности при ограничителях в виде максимального допустимого перегрева обмотки и магнитов. В качестве ограничителя также выступает максимальное значение потребляемой мощности.

На рис. 1 представлена конструктивная схема ЛДПТ с полым немагнитным якорем и возбуждением от постоянных магнитов, расположенных на внутреннем статоре.

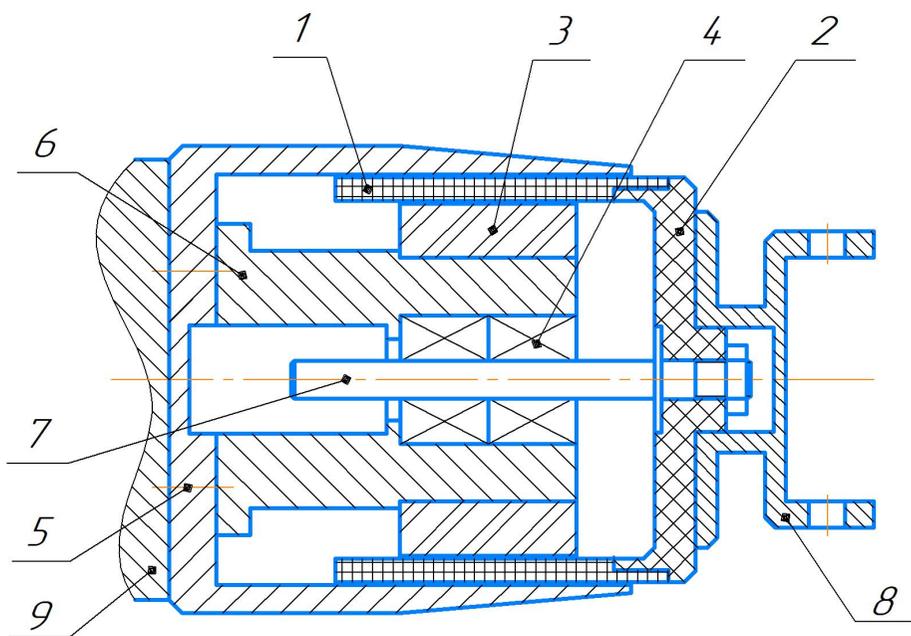


Рис. 1. Конструкция линейного двигателя постоянного тока: 1 – катушка якоря; 2 – основание якоря; 3 – магнит; 4 – линейный подшипник; 5 – наружный магнитопровод; 6 – внутренний магнитопровод; 7 – шток; 8 – крепление исполнительного механизма; 9 – основание платформы

Источником тепла в рассматриваемой задаче служат электрические потери в катушке якоря, которые легко рассчитываются или измеряются экспериментально. Другими потерями, например механическими в линейных подшипниках или добавочными магнитными в сердечниках статора, возникающими при движении якоря, вполне обоснованно можно пренебречь.

Распространение теплового потока от нагретого якоря *1* идет по двум основным путям: первый – через воздушный зазор и наружный магнитопровод статора *5* в окружающий воздух; второй – через зазор, внутренний магнитопровод *6* к корпусу платформы *9*. Есть еще третий путь – от катушки якоря через ее текстолитовое основание *2* к исполнительному механизму *8*. Из-за низкой теплопроводности текстолита доля этого потока относительно невелика.

Все элементы двигателя, кроме катушки якоря, представляют собой монолитные структуры, теплоемкости и теплопроводности которых хорошо изучены и известны. Исключением является композитная гетерогенная обмотка якоря (рис. 2), состоящая из изолированного медного обмоточного провода *1*, пропиточного эпоксидного компаунда *2*, межслойной изоляции *3*, наружного и внутреннего стеклобандажа *4*.

При решении тепловой задачи физические свойства обмотки определяются коэффициентом теплопроводности λ . Обмотки машин в тепловом отношении представляют собой гетерогенные тела со сложным распределением коэффициента теплопроводности [15, 21]. Однако при расчете поперечных перепадов температуры в обмотках эту гетерогенность, как правило, не учитывают, приписывая обмотке некоторый эквивалентный коэффициент теплопроводности $\lambda_{\text{экв}}$ в направлении теплового потока.

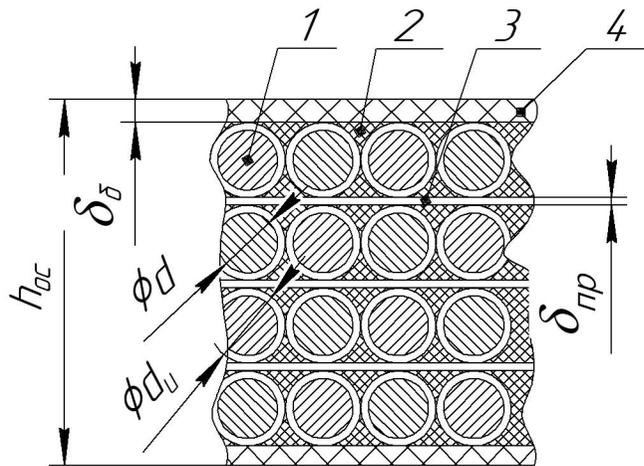


Рис. 2. Структура обмоточного слоя катушки якоря

Эквивалентный коэффициент теплопроводности обмоток зависит от типа укладки, коэффициента заполнения $k_{из}$, коэффициента пропитки k_n , коэффициента теплопроводности изоляции провода λ_u , коэффициента теплопроводности пропиточного состава λ_n , диаметра провода d_u и средней температуры обмотки T_{cp} . Эквивалентный коэффициент определяется сравнением термических сопротивлений элементарной ячейки сечения обмотки, выраженных через истинные и эквивалентные λ .

На практике коэффициент заполнения определяют «по квадратам», считая сечением провода не $\frac{\pi \cdot d_u^2}{4}$, а d_u^2 . В этом случае

$$k_{из} = \frac{w \cdot d_u^2}{S_n}.$$

Его предельное значение равно 1 для рядной укладки и 1,55 для шахматной (w – число проводников в обмотке; S_n – поперечное сечение катушки).

Технология изготовления якорной обмотки ЛДПТ предполагает рядную намотку и вакуумную пропитку эпоксидным компаундом. Такая технология обеспечивает коэффициент заполнения медью $k_{из} = 0,95$ и отсутствие воздушных промежутков в композите $\delta_{в} = 0$.

Поскольку коэффициенты теплопроводности изоляции и меди отличаются на три порядка, можно принять, что температура по сечению жилы провода не меняется. Для упорядоченной обмотки при рядной укладке проводом круглого сечения (см. рис. 2) получим [15]:

$$\lambda_{\text{экв}} = \lambda_u^t \cdot \left[\begin{array}{c} \left[\frac{0,89\left(\frac{d}{d_u}\right)\sqrt{k_{уз}} - 0,82}{0,95 - 0,77\left(\frac{d}{d_u}\right)\sqrt{k_{уз}}} + 1,57 \right] \otimes \\ \otimes \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{1 - 0,86\left(\frac{d}{d_u}\right)^2 k_{уз}}} - 0,9 \end{array} \right]. \quad (3)$$

Здесь d и d_u – диаметры голого и изолированного провода; $k_{уз}$ – коэффициент заполнения «по квадратам»; λ_u^t – эквивалентный коэффициент теплопроводности промежутков между жилами:

$$\lambda_u^t = \frac{\delta_u - \delta_e - \delta_{np}}{\frac{\delta_u}{\lambda_u} + \frac{\delta_e}{\lambda_{\text{в.экв}}} + \frac{\delta_{np}}{\lambda_{np}}}, \quad (4)$$

где δ_u – двусторонняя толщина изоляции провода; δ_e – толщина воздушных промежутков между проводами; δ_{np} – толщина изоляционной прокладки между рядами обмотки; λ_u , $\lambda_{\text{в.экв}}$, λ_{np} – коэффициенты теплопроводности соответствующих слоев.

Рассчитанные по выражениям (3) и (4) значения эквивалентных теплопроводностей промежутка между жилами и обмотки в целом для исследуемого ЛДПТ: $\lambda_u^t = 0,12$ Вт/м·К и $\lambda_{\text{экв}} = 123,1$ Вт/м·К.

С учетом вышеизложенного были приняты следующие исходные допущения:

- теплопередача через воздушные зазоры (наружный и внутренний) осуществляется только с постоянным коэффициентом $\lambda_{\text{возд}} = 0,0266$ Вт/(м·°С);

- теплопроводности катушки якоря в направлении теплового потока $\lambda_{\text{экв}}$ принимается с учетом коэффициента заполнения медью обмотки $k_{з\text{м}}$, диаметра провода $d_{\text{пр}}$ и коэффициента пропитки $k_{\text{п}}$;

- теплоотдача с наружной поверхности двигателя осуществляется путем естественной конвекции;

- теплом, отводящимся посредством излучения, пренебрегаем;

- задача решается для установившегося теплового состояния.

С учетом принятых допущений для исследуемой конструкции ЛДПТ тепловая схема замещения будет иметь вид, представленный на рис. 3.

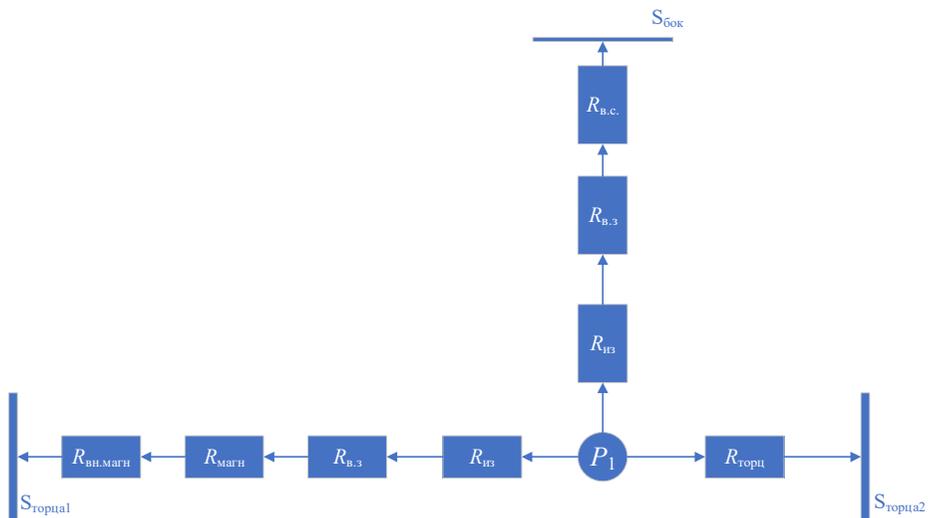


Рис. 3. Тепловая схема замещения ЛДПТ

На схеме приняты следующие обозначения: P_1 – потребляемая двигателем мощность (мощность тепловыделения), Вт; первая ветвь: $R_{из}$ – эквивалентное тепловое сопротивление изоляции обмотки; $R_{в.з}$, $R_{в.с}$ – тепловые сопротивления воздушного зазора и внешнего статора; вторая ветвь: $R_{магн}$, $R_{вн.магн}$ – тепловые сопротивления магнита и внутреннего магнитопровода; третья ветвь: $R_{торц}$ – тепловое сопротивление торца катушки.

При решении стационарной задачи расчета температурного состояния элементов двигателя необходимо задать источники тепла, пути распространения теплового потока и тепловые сопротивления на этих участках. Тепловое сопротивление участков, которые характеризуются только теплопроводностью λ , согласно [17] определяется по выражению

$$R_t = \frac{b}{\lambda \cdot S}, \text{ К/Вт},$$

где b – толщина стенки; S – площадь, м^2 .

Перепад температуры, K ,

$$\Delta\theta = Q \frac{b}{\lambda \cdot S} = R_t \cdot Q.$$

Аналогично для участков теплоотдачи с поверхности в окружающий воздух мощность теплового потока, Вт,

$$Q = \alpha \cdot \Delta\theta \cdot S_n,$$

где α – коэффициент теплоотдачи с поверхности S_n , $\text{Вт}/\text{м}^2\cdot\text{К}$.

Соответственно

$$\Delta\theta = R_n \cdot Q$$

и тепловое сопротивление поверхности нагретой стенки, К/Вт ,

$$R_n = \frac{1}{\alpha \cdot S_n}.$$

В многослойной структуре, которую представляет собой тепловая схема ЛДПТ, перепад температуры равен сумме перепадов в отдельных слоях. Следовательно, тепловое сопротивление одной ветви схемы замещения равно сумме последовательных сопротивлений всех слоев

$$R_{Bj} = \sum_{i=1}^k R_i,$$

где R_i – тепловое сопротивление i -го участка; k – число последовательных участков.

Так как в схеме три параллельные ветви, то суммарное тепловое сопротивление можно рассчитать как

$$R_{\Sigma} = \frac{R_{B1} \cdot R_{B2} \cdot R_{B3}}{R_{B1} + R_{B2} + R_{B3}}.$$

Результаты расчета температуры по описанной методике приведены в табл. 3. Там же эти результаты сравниваются с результатами численного моделирования и эксперимента.

Численное моделирование температурного поля

Для проверки результатов упрощенного теплового расчета ЛДПТ, проведенного методом тепловых схем замещения, было проведено численное моделирование температурного поля машины в программном комплексе ELCUT [16].

Задача решалась в осесимметричной постановке при допущении, что геометрическая модель имеет центральную симметрию по оси двигателя z . Физические свойства блоков постоянны для любого радиус-вектора r и не зависят от угловой координаты φ . Моделировался установившийся тепловой режим. В качестве исходных данных были приняты параметры опытного образца ЛДПТ, приведенные в табл. 1. Геометрическая модель соответствует приведенной на рис. 1.

Таблица 1

Основные номинальные параметры опытного ЛДПТ

№	Параметр	Значение
1	Номинальное усилие, Н	20
2	Рабочий ход якоря, мм	±8
3	Напряжение питания, В	27
4	Ток при номинальном усилии, А	0,81
5	Наружный диаметр, мм	69
6	Длина в среднем положении якоря, мм	90
7	Потребляемая мощность при номинальном усилии, Вт	23
8	Масса, кг	1,8

Для стационарной задачи температурного поля физические свойства блоков задавались согласно приведенным в табл. 2.

Физические свойства блоков геометрической модели

№	Блок	Физические свойства	Источник теплового поля
1	Катушка якоря	$\lambda_{\text{эКВ}} = 123 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$	$\underline{Q} = 828000 \text{ Вт/м}^3$
2	Магнит	$\lambda = 9 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$	–
3	Магнитопровод	$\lambda = 48 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$	–
4	Воздух	$\lambda = 0,0266 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$	–
5	Стеклотекстолит	$\lambda = 0,44 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$	–

Коэффициент теплоотдачи с наружной поверхности двигателя был принят для спокойного воздуха без дополнительного обдува $\alpha_{\text{в}} = 18 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$.

Граничные условия задавались для стандартного значения температуры окружающей среды $T_{\text{охл}} = 313\text{К}$ (40 °С).

Результаты моделирования температурного поля двигателя при этих условиях приведены на рис. 4 в виде изотерм равного уровня.

Максимальная температура 373,5 К (100,4 °С) отмечается в катушке якоря. Температура наружной поверхности двигателя и постоянных магнитов, соответственно, 339,3 К (66,2 °С) и 329,7 К (66,2 °С).

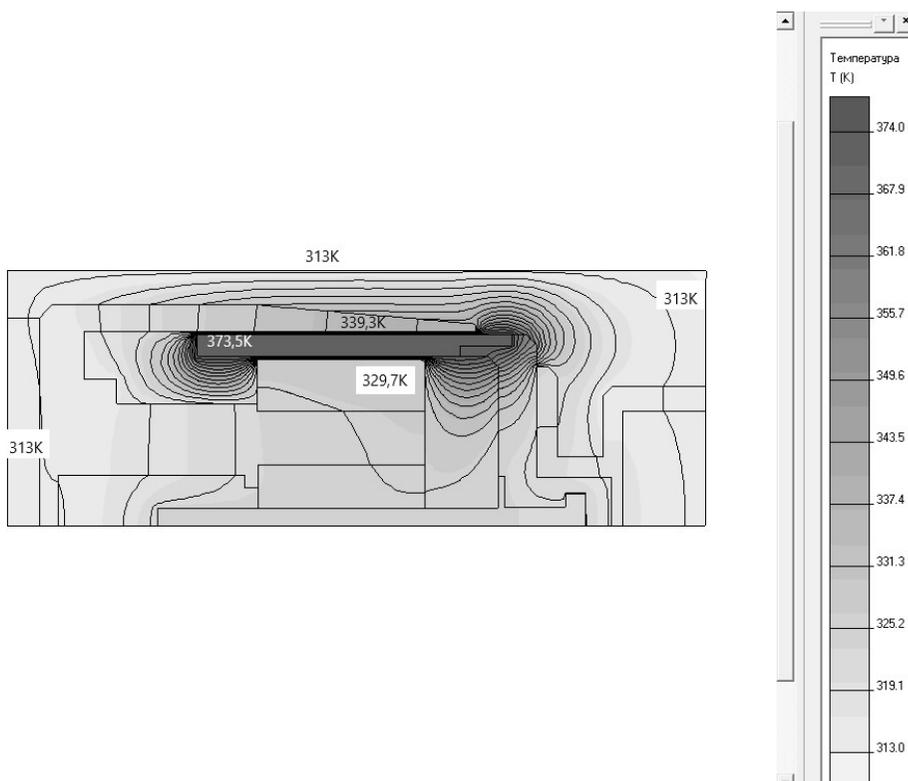


Рис. 4. Температурное поле ЛДПТ по результатам моделирования

В ходе натурных испытаний опытного образца ЛДПТ были определены графики нагрева обмотки в функции времени для различных значений тока якоря (рис. 5). Эксперимент проводился для начальной температуры двигателя и окру-

жающей среды 21 °С (294,1 К). Теплоемкость воздуха при изменении температуры от 21 до 40 °С практически не изменяется, поэтому будет корректным сравнение результатов моделирования и эксперимента по величине приращения температуры обмотки $\Delta T_{об}$.

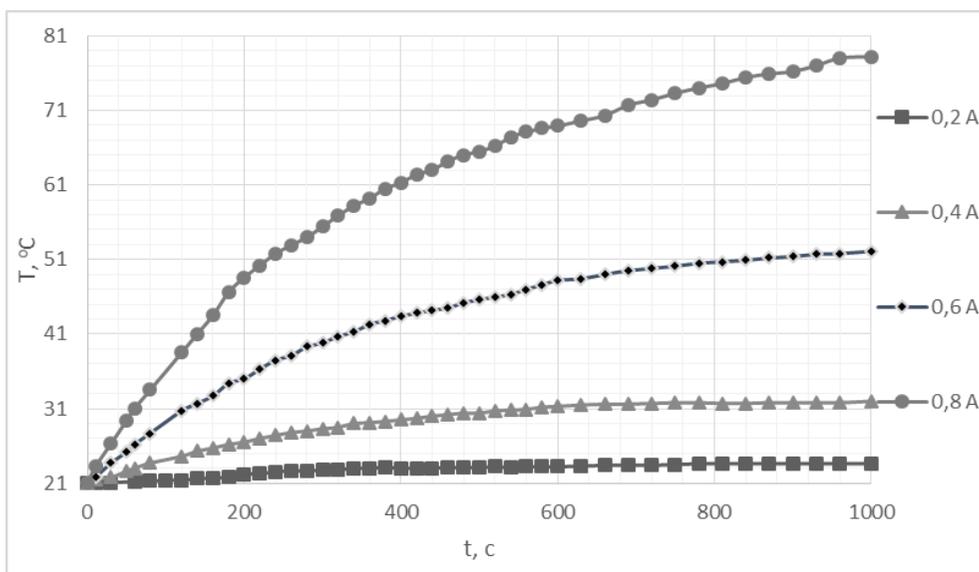


Рис. 5. Кривые нагрева обмотки якоря (эксперимент)

Сравнение результатов, полученных в эксперименте, с результатами, рассчитанными по методике тепловых схем замещения и численным моделированием методом конечных элементов, дано в табл. 3.

Таблица 3

Температура элементов двигателя

№	Элемент двигателя	Установившаяся температура, К (°С)		
		По тепловой схеме замещения	МКЭ	Эксперимент (пересчет на $T_{нач} = 313$ К)
1	Катушка якоря	364,4 (91,3)	373,5 (100,4)	371,8 (98,7)
2	Магнит	320,0 (46,9)	329,7 (56,6)	–
3	Наружная поверхность статора	331,2 (58,1)	339,3 (66,2)	337,6 (64,5)

Основные результаты и выводы

1. Метод тепловых схем замещения для расчета температур активных частей линейного двигателя постоянного тока – катушки и постоянных магнитов – дает погрешность вычисления от 5 до 10 %. Такая точность приемлема на этапе предварительного оптимизационного расчета, когда необходимо определить лимитирующее значение температуры. На этапе уточненного расчета для выбран-

ного по результатам оптимизации варианта лишь численный метод моделирования МКЭ обеспечивает требуемую точность.

2. Верификация результатов моделирования температурного поля линейного двигателя, проведенная на опытном образце экспериментально, подтвердила корректность теоретических положений и принятых допущений при моделировании МКЭ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Баль В.Б., Геча В.Я., Гончаров В.И. и др.* Линейные электрические машины возвратно-поступательного действия – области применения // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. М.: Научно производственная корпорация «Космические системы мониторинга, информационно-управляющие и электромеханические комплексы» имени А.Г. Иосифьяна. 2015. Т. 149. С. 3–17.
2. *Серебренецкий П.П.* Линейные двигатели нового поколения // «Военмех» им. Д.Ф. Устинова. 2019. DOI https://electroprivod.ru/linear_public.htm
3. *Макаричев Ю.А., Ратцев Я.А.* Линейный двигатель постоянного тока системы стабилизации прецизионных объектов // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2022. Т. 30. № 2. С. 73–84.
4. Conventional and Tfpn Linear Generators for DirectDrive Wave Energy Conversion. Polinder Henk et al. // Ieee transactions on energy conversion. 2005. Vol. 20. No. 2.
5. *Сарапулов Ф.Н., Сарапулов С.Ф., Шумчак П.* Математические модели линейных индукционных машин на основе схем замещения. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2005. 431 с.
6. *Wisuwat Plodpradistha*, Study of Tubular Linear Induction Motor for Pneumatic Capsule Pipeline system. Ph.D. Dissertation, Department of electrical Engineering, University of Missouri-Columbia, May 2002.
7. *Henry Jr., Brandhorst W., Peter Jr., Chapman A.* New 5kW free-piston Stirling space converter developments // Science Direct, Acta Astronautica 63 (2008), 342–347.
8. *Viet Nam Hoang*, Design of Single-Sided Linear Induction Motor, Bachelor of Electrical Engineering Project, School of Information Technology and electrical Engineering, University of Queensland, 2003.
9. *Балагуров В.А., Галтеев Ф.Ф., Ларионов А.Н.* Электрические машины с постоянными магнитами. М.-Л.: Энергия, 1964. 480 с.
10. *Исмагилов Ф.Р.* Электрические системы с высококоэрцитивными постоянными магнитами. М.: Машиностроение, 2014. 267 с.
11. *Кулон Ж.-Л., Сабоннадьер Ж.-К.* Метод конечных элементов и САПР: Пер. с франц. М.: Мир, 1989.
12. *Pirisi A., Gruosso G., Zich E.R.* Novel Modelling Design of 3ph Tubular PM Linear generator for Marine Applications / Politecnico di Milano.
13. *Dukhanin V.I.* Automotive reciprocating alternator. Design Analysis // International Scientific and Technical Conference of Automotive Engineer’s Association “Motor Vehicle and Tractor Industry in Russia: Development Priorities and Manpower Training” Dedicated to the 145 / Anniversary of MGTU ‘MAMI’ [Moscow State University of Mechanical Engineering]. Nov. 17, 2010.
14. *Слободзян Н.С.* Прецизионное управление линейным приводом механизма с параллельной структурой космического применения: Дисс. ... канд. техн. наук. СПб., 2021. 166 с.
15. *Борисенко А.И., Костиков О.Н., Яковлев А.И.* Охлаждение промышленных электрических машин. М.: Энергоатомиздат, 1983. 296 с.
16. ELCUT. Моделирование двумерных полей методом конечных элементов. Руководство пользователя. СПб.: ООО «Тор», 2012. 356 с.
17. *Копылов И.П., Горяинов Ф.А., Клоков Б.К. [и др.]* Проектирование электрических машин: Учеб. пособие для вузов. М.: Энергия, 1980. 496 с.
18. *Макаричев Ю.А., Иванников Ю.Н., Овсянников В.Н.* Исследование теплового состояния моментного двигателя с возбуждением от постоянных магнитов // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2019. № 4. Т. 62. С. 36–43.
19. *Макаричев Ю.А., Зубков Ю.В., Иванников Ю.Н.* Исследование тепловых процессов автономного генератора совмещенного типа методом моделирования температурных по-

- лей // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2015. № 4 (48). С. 93–100.
20. Макаричев Ю.А., Иванников Ю.Н. Моделирование температурных полей радиального электромагнитного подшипника // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2014. № 3 (43). С. 139–145.
 21. Шуйский В.П. Расчет электрических машин (пер. с немецкого). Л.: Энергия, 1968. 732 с.

Статья поступила в редакцию 9 декабря 2023 г.

INVESTIGATION OF THE THERMAL REGIME OF A LINEAR DC MOTOR

*Yu.A. Makarichev, Ya.A. Ratcev**

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

E-mail: makarichev2801@mail.ru, Ratt.Yar.Al@yandex.ru

Abstract. *Linear DC motors (LDPT) with a limited armature stroke are used in mechanisms that reciprocate the working body or stabilize its position in tracking systems. The use of LDPT instead of rotary motion motors with a converter in the form of a crank mechanism, a screw pair or other similar mechanical systems leads to a significant simplification of the kinematic scheme, increased efficiency and, as a rule, increased accuracy of the complex and its reliability. There are a number of problems in the creation of LDPT, which are not fully reflected in the scientific and technical literature. In particular, with parametric optimization of the engine according to weight, size and energy criteria, one of the main limiters is overheating of the winding, and in magnetolectric machines, also overheating of permanent magnets, which are very sensitive to the magnitude of the operating temperature and thermal shocks. The article presents an analytical method for calculating the thermal state of an engine in steady state, based on the method of thermal substitution schemes. The technique is designed for use in a parametric optimization program. To clarify the values of the a priori coefficients in the analytical expressions of the proposed algorithm, the authors modeled the LDPT using the numerical finite element method. Based on the simulation results, a picture of the temperature field of the machine was obtained and the critical heating areas were determined. Verification of the theoretical provisions was carried out during experimental studies of the prototype engine. The tests showed good convergence of the calculated and experimental parameters.*

Keywords: *linear motor, permanent magnets, thermal calculation, numerical modeling.*

REFERENCES

1. *Bal' V.B., Gecha V.Ya., Goncharov V.I. i dr. Linejnye elektricheskie mashiny vozvratno-postupatel'nogo dejstviya – oblasti primeneniya* [Linear electric machines of reciprocating action – scope] // *Voprosy elektromekhaniki. Trudy VNIIEM. M.: Nauchno proizvodstvennaya korporaciya «Kosmicheskie sistemy monitoringa, informacionno-upravlyayushchie i elektromekhanicheskie komplekсы» imeni A.G. Iosif'yana. 2015. V. 149. Pp. 3–17. (In Russian)*
2. *Serebrenickij P.P. Linejnye dvigateli novogo pokoleniya* [New generation linear motors] // «*Voenmekh*» im. D.F. Ustinova. 2019. DOI https://electroprivod.ru/linear_public.htm. (In Russian)
3. *Makarichev Yu.A., Ratcev Ya.A. Linejnyj dvigatel' postoyannogo toka sistemy stabilizacii precizionnyh ob'ektov* [Linear DC motor for stabilization systems for precision objects] // *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki. 2022. V. 30. № 2. P. 73–84. (In Russian)*
4. *Conventional and Tfpm Linear Generators for DirectDrive Wave Energy Conversion. Polinder Henk et al. // Ieee transactions on energy conversion. 2005. Vol. 20. No. 2.*
5. *Sarapulov F.N., Sarapulov S.F., Shimchak P. Matematicheskie modeli linejnyh indukcionnyh mashin na osnove skhem zameshcheniya* [Mathematical models of linear induction machines based on equivalent circuits]. Ekaterinburg: UGTU-UPI, 2005. 431 p. (In Russian)

* *Yury A. Makarichev (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Yaroslav A. Ratcev, Senior Lecturer.*

6. *Wisuwat Plodpradistha*, Study of Tubular Linear Induction Motor for Pneumatic Capsule Pipeline system. Ph.D. Dissertation, Department of electrical Engineering, University of Missouri-Columbia, May 2002.
7. *Henry Jr., Brandhorst W., Peter Jr., Chapman A.* New 5kW free-piston Stirling space convertor developments // Science Direct, Acta Astronautica 63 (2008), 342–347.
8. *Viet Nam Hoang*, Design of Single-Sided Linear Induction Motor, Bachelor of Electrical Engineering Project, School of Information Technology and electrical Engineering, University of Queensland, 2003.
9. *Balagurov V.A., Galteev F.F., Larionov A.N.* Elektricheskie mashiny s postoyannymi magnitami [Electrical machines with permanent magnets]. M.–L.: Energiya, 1964. 480 p. (In Russian)
10. *Ismagilov F.R.* Elektricheskie sistemy s vysokokoercitivnymi postoyannymi magnitami [Electrical systems with high coercivity permanent magnets]. M.: Mashinostroenie, 2014. 267 p. (In Russian)
11. *Kulon ZH.-L., Sabonnad'er ZH.-K.* Metod konechnyh elementov i SAPR [Finite element method and CAD]: Per. s franc. M.: Mir, 1989. (In Russian)
12. *Pirisi A., Gruosso G., Zich E.R.* Novel Modelling Design of 3ph Tubular PM Linear generator for Marine Applications / Politecnico di Milano.
13. *Dukhanin V.I.* Automotive reciprocating alternator. Design Analysis // International Scientific and Technical Conference of Automotive Engineer's Association "Motor Vehicle and Tractor Industry in Russia: Development Priorities and Manpower Training" Dedicated to the 145 / Anniversary of MGTU 'MAMI' [Moscow State University of Mechanical Engineering]. Nov. 17, 2010.
14. *Slobodzyan N.S.* Precizionnoe upravlenie linejnym privodom mekhanizma s paralle'noj strukturoj kosmicheskogo primeneniya [Precision control of linear actuator mechanism with parallel structure for space application]. Diss. ... kand. tekhn. nauk. SPb., 2021. 166 p. (In Russian)
15. *Borisenko A.I., Kostikov O.N., Yakovlev A.I.* Ohlazhdenie promyshlennyh elektricheskikh mashin [Cooling of industrial electrical machines]. M.: Energoatomizdat, 1983. 296 p. (In Russian)
16. ELCUT. Modelirovanie dvumernyh polej metodom konechnyh elementov [Modeling of two-dimensional fields using the finite element method]. Rukovodstvo pol'zovatelya. SPb.: OOO «Tor», 2012. 356 p. (In Russian)
17. *Kopylov I.P., Goryainov F.A., Klovov B.K.* [i dr.] Proektirovanie elektricheskikh mashin [Electrical machine design]: Ucheb. posobie dlya vuzov. M.: Energiya, 1980. 496 p. (In Russian)
18. *Makarichev Yu.A., Ivannikov Yu.N., Ovsyannikov V.N.* Issledovanie teplovogo sostoyaniya momentnogo dvigatelya s vzbuzhdeniem ot postoyannyh magnitov [Study of the thermal state of a torque motor with excitation from permanent magnets] // Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Elektromekhanika. 2019. № 4. V. 62. Pp. 36–43. (In Russian)
19. *Makarichev Yu.A., Zubkov Yu.V., Ivannikov Yu.N.* Issledovanie teplovyh processov avtonomnogo generatora sovmeshchennogo tipa metodom modelirovaniya temperaturnyh polej [Study of thermal processes of an autonomous generator of a combined type using the method of modeling temperature fields] // Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki. 2015. № 4 (48). Pp. 93–100. (In Russian)
20. *Makarichev Yu.A., Ivannikov Yu.N.* Modelirovanie temperaturnyh polej radial'nogo elektromagnitnogo podshipnika [Modeling of temperature fields of a radial electromagnetic bearing] // Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki. 2014. № 3 (43). Pp. 139–145. (In Russian)
21. *Shujskij V.P.* Raschet elektricheskikh mashin [Calculation of electrical machines]. L.: Energiya, 1968. 732 p.