ISSN 1991-8542 (Print)
ISSN 2712-8938 (Online)

САМАРСКИЙ ПОЛИТЕХ
Опорный университет

ВЕСТНИК

САМАРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Серия
«ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ»

2025. Т. 33, № 1

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» 2025. Том 33. № 1

Учредитель – ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»

Главный редактор Ю.Э. Плешивцева (д.т.н., проф.)
Отв. секретарь серии О.С. Афанасьева (к.т.н.)

Редакционная коллегия:
А.М. Абакумов (д.т.н., проф.)
В.И. Батищев (д.т.н., проф.)
С.Ю. Боровик (д.т.н., проф.)
Ю.В. Зубков (д.т.н., проф.)
Л.С. Казаринов (д.т.н., проф.)
Ю.Б. Казаков (д.т.н., проф.)
О.С. Колосов (д.т.н., проф.)
П.К. Кузнецов (д.т.н., проф.)
В.И. Лачин (д.т.н., проф.)
М.Ю. Лившиц (д.т.н., проф.)
С.П. Орлов (д.т.н., проф.)
Л.Д. Певзнер (д.т.н., проф.)
Э.Я. Рапопорт (д.т.н., проф.)
А.В. Стариков (д.т.н., проф.)
E. Baake (проф., Германия)
S. Lupi (проф., Италия)
B. Nacke (проф., Германия)
M. Forzan (проф., Италия)

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

Вестник Самарского государственного технического университета
Серия «Технические науки» (2025. Том 33. № 1)

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

Редактор Г.В. З а г р е б и н а
Компьютерная верстка О.С. А ф а н а с ь е в а

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 06.06.25
Выход в свет 20.06.25

Формат 70 × 108 $^{1}/_{16}$.
Усл. печ. л. 22,56 п.л.
Уч.-изд. л. 21,86 п.л.
Тираж 500 экз. Рег. № 99/25
Заказ № 151

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, 2025
© Самарский государственный
технический университет, 2025

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 2025. Vol. 33. Issue 1

Founder – Samara State Technical University

Editor-in-Chief Y.E. Pleshivtseva (Dr. Techn. Sci., Prof.)
Execute Secretary O.S. Afanaseva (PhD Techn.)

Editorial board

A.M. Abakumov (Dr. Techn. Sci., Prof.)
E. Baake (Prof. Leibniz University of Hannover, Germany)
V.I. Batishchev (Dr. Techn. Sci., Prof.)
S.Y. Borovik (Dr. Techn. Sci., Prof.)
M. Forzan (Prof., University of Padua, Italy)
L.S. Kazarinov (Dr. Techn. Sci.)
Yu.B. Kazakov (Dr. Techn. Sci., Prof.)
O.S. Kolosov (Dr. Techn. Sci., Prof.)
P.K. Kuznetsov P. K. (Dr. Techn. Sci., Prof.)
V.I. Lachin (Dr. Techn. Sci., Prof.))
M.Y. Livshits (Dr. Techn. Sci., Prof.)
S. Lupi (Prof., University of Padua, Italy)
B. Nacke (Prof., Leibniz University of Hannover, Germany)
S.P. Orlov (Dr. Techn. Sci., Prof.)
L.D. Pevzner (Dr. Techn. Sci., Prof.)
E.Y. Rapoport (Dr. Techn. Sci., Prof.)
A.V. Starikov (Dr. Techn. Sci., Prof.)
Yu.V. Zubkov (Dr. Techn. Sci., Prof.)

Edited by G. V. Zagrebina

Compiled and typeset by O. S. Afanaseva

The Editorial Board Address:

Samara State Technical University

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

Phone: +7(846) 337 04 43

E-mail: vest_teh@samgtu.ru

Printed at the Samara State Technical University Press

The journal is included in the Russian Science Citation Index.

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

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

The subscription index in Ural-Press catalogue 18106

ISSN 1991-8542

СОДЕРЖАНИЕ

Информационные технологии и коммуникации

Баданис К.Е. Автоматизированный мониторинг дорожного покрытия с учетом коррекции тропосферных задержек спутниковых навигационных сигналов..... 7

Говорков А.С., Подрез Н.В. Основные принципы организации работ с информационной моделью объекта при проектировании и производстве продукции авиастроительной отрасли 21

Плешивцева Ю.Э., Попов А.В., Дадабаева Д.А. Оптимальное по критерию образования минимума окалины управление процессом индукционного нагрева стальных заготовок …… 35

Назаров М.А., Заварзин А.А. Математическое описание статического режима работы зоны охлаждения керамического кирпича в туннельной печи с распределенной подачей охлаждающего агента …… 48

Энергетика и электротехника

Базаров А.А., Белый О.В. Анализ электромагнитных и тепловых процессов в заземлителе на напряжение 10 кВ …..……. 62

Макаричев Ю.А., Носиков Н.А. Оптимизация энергосбережения режима перекачки магистрального нефтепровода …… 76

Осика Л.К. Возможности организации непрерывного инструментально-расчетного определения потерь электроэнергии в распределительных сетях 20–0,4 кВ на основе концепции тепловых импульсов тока и напряжения ……. 89

Строкин Л.П., Данилушкин И.А. Метод моделирования водогрейных котельных малой мощности и их тепловой нагрузки…… 104

CONTENTS

Information Technologies and Communications

Badanis K.E. Automated Monitoring of Road Surfaces Taking into Account the Correction of Tropospheric Delays of Satellite Navigation Signals..... 7

Govorkov A.S., Podrez N.V. Basic Principles of Organizing Work with an Information Model of an Object in the Design and Production of Products in the Aircraft Industry..... 21

Pleshivtseva Yu. E., Popov A.V., Dadabaeva D.A. Optimal Control of Induction Heating of Steel Workpieces with Respect to Minimal Scale Formation Criteria…… 35

Nazarov M.A., Zavarzin A.A. Mathematical Description of the Static Operational Mode of the Ceramic Brick Cooling Zone in a Tunnel Kiln with Distributed Supply of Cooling Agent …… 48

Power Engineering and Electrical Engineering

Bazarov A.A., Belyi O.V. Analysis of Electromagnetic and Thermal Processes in a Grounding Device at a Voltage of 10 kV ……..…… 62

Nosikov N.A., Makarichev Yu.A. Optimization of Energy Saving Mode Pumping of the Main Oil Pipeline ……. 76

Osika L.K. The Possibilities of Organizing Continuous Instrumental and Computational Determination of Electricity Losses in Distribution Networks of 20 – 0.4 kV Based on the Concept of Thermal Current and Voltage Pulses …….. 89

Strokin L.P., Danilushkin I.A. Modeling Method for Low-Capacity Hot Water Boiler Plants and Their Thermal Loads…… 104

doi: 10.14498/tech.2025.1.1
EDN: ZCLHMQ

Информационные технологии и коммуникации

УДК 621.396.98

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ МОНИТОРИНГ ДОРОЖНОГО ПОКРЫТИЯ С УЧЕТОМ КОРРЕКЦИИ ТРОПОСФЕРНЫХ ЗАДЕРЖЕК СПУТНИКОВЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ

К.Е. Баданис[1]

Белгородский государственный национальный исследовательский университет
Россия, 308015, Белгородская область, г. Белгород, ул. Победы, 85

E-mail: badanis@bsuedu.ru

Аннотация. *Рассматривается разработка автоматизированной подсистемы мониторинга состояния дорожного покрытия (АП МС ДП) с учетом коррекции тропосферных задержек спутниковых навигационных сигналов. Представлены глобальные и региональные модели тропосферы, рекомендованные ICAO SARPS, и их применение для повышения точности навигационных измерений. Описана структурная схема аппаратной части подсистемы, включающая микроконтроллер MSP432P401R, датчики ускорения и GPS-модуль, а также детализирован процесс разработки опытного образца. Результаты работы демонстрируют возможность интеграции сложных моделей тропосферных задержек в подсистему мониторинга для повышения точности данных и эффективности оценки состояния дорожного покрытия (ДП). Предложенный подход к коррекции тропосферных задержек позволяет повысить стабильность и достоверность координатных определений в условиях изменяющейся окружающей среды. Разработанная аппаратная платформа обеспечивает надежный сбор и обработку данных в реальном времени, что делает ее пригодной для применения в системах дорожного мониторинга в различных климатических условиях, а также для интеграции в систему умного города. Особое внимание уделено адаптации моделей тропосферных задержек к конкретным региональным условиям, что позволяет повысить надежность и точность получаемых данных.*

Ключевые слова: *мониторинг, дорожное покрытие, тропосфера, тропосферные задержки, спутниковые системы, автоматизированная подсистема, GPS-модуль, акселерометр.*

Введение

В группу факторов, в наибольшей мере влияющих на результаты координатных определений, входит тропосфера, неучет которой приводит к погрешностям в измерениях псевдодальностей от 2,5 (в зените) до 25 м (при углах возвышения спутника порядка 5°) [1, с. 8].

© Автор(ы), 2025

[1]*Кирилл Евгеньевич Баданис, аспирант кафедры информационных и робототехнических систем.*

В широкозонных подсистемах, таких как WAAS и EGNOS, учет тропосферных задержек осуществляется с использованием стандартной модели, представленной в MOPS [2]. Данная модель основана на использовании пяти метеорологических параметров: атмосферного давления, температуры и парциального давления водяных паров на уровне моря и их вертикальных градиентах. Она устанавливает зависимость параметров тропосферы от местоположения приемника навигационных сигналов (широты и высоты над уровнем моря) и текущего дня года. Параметры модели, устанавливающие связь оценок метеопараметров с положением пользовательского приемника и датой, получены эмпирически. Первоначально эта модель была создана для обеспечения задач навигации авиационных потребителей в США, а затем предложена для использования в системе EGNOS.

Глобальные и региональные модели тропосферы, применяемые в спутниковой навигации

Согласно ICAOSARPS модели [3, с. 203–231] вычисление зенитных тропосферных задержек производится по формуле

$$\delta_{\text{троп}} = \left(\delta_h + \delta_w\right) \cdot m\left(\beta\right), \tag{1}$$

где δ_h – зенитная гидростатическая составляющая задержки; δ_w – зенитная «влажная» составляющая задержки; $m\left(\beta\right)$ – функция преобразования зенитной задержки в задержку для угла возвышения β.

Зенитные гидростатическая и «влажная» компоненты тропосферной задержки вычисляются по формулам:

$$\delta_h = z_h \cdot \left(1 - \frac{k \cdot H}{T}\right)^{\frac{g}{R_d \cdot k}},\ \delta_w = z_w \cdot \left(1 - \frac{k \cdot H}{T}\right)^{\frac{(\lambda+1)g}{R_d \cdot k} - 1}, \tag{2}$$

где $g = 9{,}80665$ м/с^2; H – высота приемника над средним уровнем моря (м); T – температура на среднем уровне моря (К); k – вертикальный градиент температуры (К/м); $R_d = 287{,}054$ (Дж/кг/К); λ – вертикальный градиент плотности водяных паров (безразмерный); z_h – зенитная гидростатическая составляющая задержки на среднем уровне моря; z_w – зенитная «влажная» составляющая задержки на среднем уровне моря.

Зенитные гидростатическая и «влажная» составляющие тропосферной задержки на среднем уровне моря вычисляются по формулам:

$$z_h = \frac{10^{-6} \cdot k_1 \cdot R_d \cdot P}{g_m},\ z_w = \frac{10^{-6} \cdot k_2 \cdot R_d}{g_m \cdot \left(\lambda + 1\right) - k \cdot R_d} \cdot \frac{e}{T}, \tag{3}$$

где $k_1 = 77{,}604$ К/мбар; $k_2 = 382000$ К^2/мбар; P – давление на среднем уровне моря (мбар); $g_m = 9{,}784$ м/с^2; e – давление водяных паров на среднем уровне моря (мбар).

Используемые в модели метеорологические параметры (атмосферное давление, температура и парциальное давление водяных паров на уровне моря и их вертикальные градиенты) определяются на основании данных, приведенных в табл. 1, по формуле

$$\xi\left(\varphi, D\right) = \xi_0\left(\varphi\right) - \Delta\xi\left(\varphi\right) \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot \left(D - D_{\min}\right)}{365{,}25}\right), \tag{4}$$

где φ – широта приемника; D – день года (начиная с 1 января); $D_{\min} = 28$ для северных широт; $D_{\min} = 211$ для южных широт; ξ_0 и $\Delta\xi$ – средние значения и сезонные вариации метеопараметров соответственно.

Функция преобразования $m(\beta)$ задается выражением (для углов возвышения, больших 5°)

$$m(\beta) = \frac{1{,}001}{\sqrt{0{,}002001 + sin^2\,\beta}}. \qquad (5)$$

Таблица 1

Метеорологические параметры

Широта φ (°)	P_0 (мбар)	T_0 (К)	e_0 (мбар)	k_0 (К/м)	λ_0
Средние значения					
≤ 15	1013,25	299,65	26,31	$6{,}03\times10^{-3}$	2,77
30	1017,25	294,15	21,79	$6{,}05\times10^{-3}$	3,15
45	1015,75	283,15	11,66	$5{,}58\times10^{-3}$	2,57
60	1011,75	272,15	6,78	$5{,}39\times10^{-3}$	1,81
≥ 75	1013,00	263,65	4,11	$4{,}53\times10^{-3}$	1,55
Сезонные вариации					
≤ 15	0,00	0,00	0,00	$0{,}00\times10^{-3}$	0,00
30	–3,75	7,00	8,85	$0{,}25\times10^{-3}$	0,33
45	–2,25	11,00	7,24	$0{,}32\times10^{-3}$	0,46
60	–1,75	15,00	5,56	0,81×10-3	0,74
≥ 75	–0,50	14,50	3,39	0,62×10-3	0,30

Решение об использовании тропосферной MOPS-модели в EGNOS сопровождалось проведением ряда исследовательских работ, направленных на ее аттестацию в условиях Европы и оценку точностных характеристик. Более того, проведение такого рода исследований рекомендуется для каждого региона [4]. Работы по аттестации тропосферной модели проводились практически на всей территории Европы (Германия [5], Англия [6] и др.). Отчет по результатам аттестации SBASMOPS модели тропосферы для использования в EGNOS подготовлен National Aerospace Laboratory (Нидерланды) по заказу Европейского космического агентства в 2004 году [7].

Как показывают результаты исследований [5–7], максимальные погрешности оценивания зенитной тропосферной задержки лежат в диапазоне 14–18 см при значениях RMS (Root Mean Squared) от 3,9 до 5,1 см.

Возможно также использование подходов к компенсации влияния тропосферы на измеряемые навигационные параметры. Все они в том или ином виде предусматривают интерполяцию тропосферных задержек, оцененных для станций сети, на место расположения пользовательского навигационного приемника. Основные различия между подходами заключаются в выборе аппроксимирующих функций.

Так, в Германии предложена интерполяция метеопараметров, заданных в узлах сети с ячейками 1°×1° [5, 8], на точку расположения пользовательского навигационного приемника. Причем интерполяция осуществляется для каждого метеопараметра по отдельности. Согласно [8] это обеспечивает точность компенсации зенитных тропосферных задержек с погрешностью порядка 40 мм (RMS).

В Швейцарии аппроксимация зенитных тропосферных задержек осуществляется с использованием их разложения в ряд по широте, долготе и высоте приемника потребителя [9]:

$$q = \frac{\Delta\rho_{trop}}{\Delta\rho_{trop,0}(h)} = c_0 + c_\varphi \cdot \Delta\varphi + c_\lambda \cdot \Delta\lambda + c_h \cdot \Delta h + c_{h^2} \cdot \Delta h^2, \quad (6)$$

где $\Delta\rho_{trop}$ – зенитная тропосферная задержка в точке с координатами $(\varphi \quad \lambda \quad h)$ – широта, долгота и высота соответственно; $\Delta\rho_{trop,0}(h)$ – априорная величина зенитной задержки как функция высоты, вычисляемая с использованием модели высотного профиля тропосферы.

Такое представление обеспечивает компенсацию зенитных тропосферных задержек для территории Швейцарии (RMS) с точностью порядка 3 см.

Основой для достижения такой точности аппроксимации зенитных тропосферных задержек являются фазовые наблюдения сети GPS-станций. Причем обработка фазовых наблюдений и оценивание параметров тропосферы в настоящее время осуществляются только для сетей, в которых станции удалены друг от друга на расстояния порядка 50–70 км. Это ограничение обусловлено рядом факторов, наиболее весомыми из которых являются усложнение процедуры раскрытия неоднозначности фазовых наблюдений по мере удаления станций друг от друга (разрежения сети) и ограниченная территориальная пригодность используемых региональных моделей тропосферы.

Структурная схема первичного узла сбора информации автоматизированной подсистемы мониторинга состояния дорожного покрытия

На основе требований к функциональности и гибкости аппаратного обеспечения была разработана структурная схема, которая идентифицирует основные компоненты аппаратного обеспечения АП МС ДП.

Основным устройством аппаратной части является микроконтроллер MSP432P401R, играющий роль локального сервера. Все датчики подключены к микроконтроллеру через различные интерфейсы. Объединение всех устройств в одну автоматизированную подсистему создает узел, отвечающий за сбор и базовую обработку данных. На основе данных предыдущих исследований [10] была разработана аппаратная конфигурация, включающая следующие ключевые компоненты:

– сменный модуль на базе микроконтроллера MSP432P401R (обеспечивает обработку и исполнение машинных команд);

– GPS-приемник (определяет координаты транспортного средства в реальном времени) [11];

– трехосевой акселерометр (фиксирует ускорения ТС по осям X, Y, Z);

– интегрированный прототип подсистемы (объединяет все аппаратные модули в единую платформу);

– центр обработки данных (серверная инфраструктура для мониторинга ДП, куда поступает информация для анализа дорожными службами).

На рис. 1 представлена структурная схема аппаратной части АП МС ДП.

На рис. 2 представлена структурная схема платы MSP432P401R. Данная плата совместима с операционной системой реального времени TI-RTOS, разработанной компанией Texas Instruments[10]. К особенностям TI-RTOS можно отнести следующее: представляет собой не только ОС, но и набор сервисных библио-

тек; позволяет подключать дополнительные модули для расширения функционала; обеспечивает управление памятью и выполнение задач в режиме реального времени.

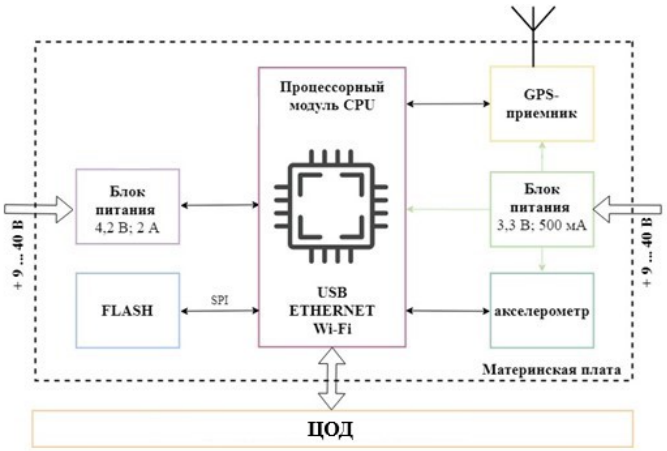


Рис. 1. Структурная схема аппаратной части АП МС ДП

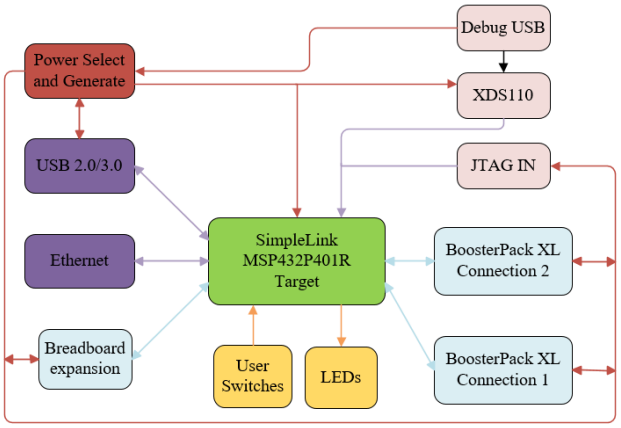


Рис. 2. Структурная схема платы MSP432P401R

На рис. 3 представлена структурная схема АП МС ДП.

Данная интеграция позволит планировать потоки, а также организовывать синхронизацию между ними, конкретнее – передачу данных из одного потока в другой.

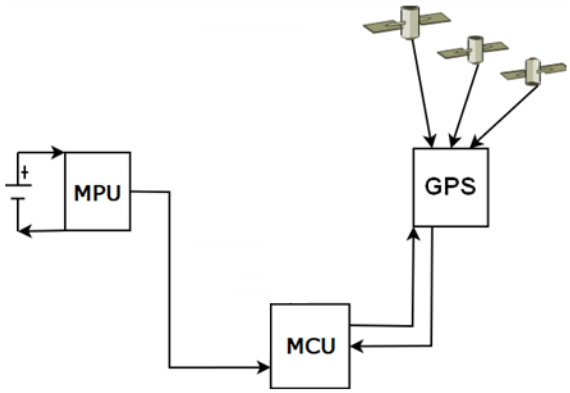


Рис. 3. Структурная схема АП МС ДП

Разработка опытного образца АП МС ДП

Главное требование к разрабатываемой аппаратной части АП МС ДП – полная изоляция от центрального сервера и требуемое расположение непосредственно на общественном транспорте. Разрабатываемое решение должно быть легко расширяемым и отказоустойчивым по отношению к внешним факторам [12].

В рамках данной разработки была выбрана аппаратная платформа MSP432P401R компании Texas Instruments (рис. 4). Согласно ранее проведенному анализу [13] платформа поддерживает интерфейсы SPI, UART и еще множество коммуникационных интерфейсов для подключения цифровых периферийных устройств, включая датчики и различные модули для обработки данных.

Рис. 4. Микроконтроллер MSP432P401R

Микроконтроллеры MSP432 представляют собой высокопроизводительные устройства с расширенной периферийной поддержкой. Одной из ключевых особенностей данной серии является продвинутая аналоговая подсистема, включающая 14-битный аналого-цифровой преобразователь (АЦП) с частотой дискретизации до 1 Мвыб/с и два аналоговых компаратора. Многие периферийные мо-

дули были заимствованы из энергоэффективной линейки MSP430 [14], что обеспечило оптимальное сочетание производительности и экономии энергии.

Основные технические характеристики семейства: процессорное ядро ARM Cortex-M4F с тактовой частотой 48 МГц, энергопотребление 95 мкА/МГц в активном режиме, диапазон питающих напряжений от 1.62 до 3.7 В, объем памяти – до 256 Кб Flash и 64 Кб RAM, 24-канальный 14-битный АЦП, до 16 каналов аналоговых компараторов, 4 блока eUSCI_A (UART/IrDA/SPI), 4 блока eUSCI_B (I2C/SPI), аппаратное шифрование AES256 и CRC32, встроенный DC/DC преобразователь и до 84 программируемых вводов/выводов.

Как показали исследования [10, 13], система питания микроконтроллера реализована по гибридной схеме:

– LDO-стабилизатор, который обеспечивает быстрое включение при выходе из режима энергосбережения;

– DC/DC-преобразователь, который активируется после готовности, снижая потребление на 35 % по сравнению с LDO.

Texas Instruments предлагает специализированные средства отладки, такие как EnergyTrace+ для анализа энергопотребления в различных режимах и ULP Advisor для автоматической оптимизации кода, а также для снижения энергозатрат.

В АП МС ДП микроконтроллер выполняет обработку данных с датчиков (включая MPU-9250 через SPI), коммуникацию с GPS-приемником по UART и запись информации на SD-карту через SPI-интерфейс. В свою очередь, поддержка операционной системы TI RTOS обеспечивает высокую эффективность обработки сенсорных данных при минимальном энергопотреблении.

Помимо микроконтроллера MSP432P401R в рабочей станции присутствует датчик MPU-9250. Данный модуль подключается через последовательный интерфейс SPI. Этот датчик используется для определения ускорения ТС по осям X, Y, Z.

Рабочая станция в целом содержит следующие комплектующие:

– микроконтроллер MSP432P401R;
– GPS-модуль U-Blox NEO-M8L;
– датчик MPU серии 9250;
– SD-карта;
– блок питания (5В, 500 мА).

В табл. 2 показаны контакты, используемые для подключения датчика MPU-9250 и микроконтроллера MSP432P401R.

В табл. 3 показаны контакты, используемые для подключения SD-карты и микроконтроллера MSP432P401R.

Согласно изученным данным из [15, 16] составлена табл. 4, в которой отображены контакты сопряжения GPS-модуля с платой MSP-EXP432P401R.

Далее на рис. 5 представлена спроектированная схема GPS-модуля.

Современные системы автоматической трассировки демонстрируют высокую эффективность при работе с платами различной сложности – от простых двухслойных до многослойных плат с разнотипными компонентами. Особого внимания заслуживает сеточный трассировщик, который оптимально подходит для проектирования однослойных плат с перемычками и не имеет ограничений по габаритным размерам.

Таблица 2

Контакты, используемые для подключения датчика MPU-9250

Цепь	MPU-9250	Плата MSP432P401R
Напряжение питания +2.4…3.6 В	3V3	3V3 разъем J5 пин 1 3V3 разъем J1 пин 1
Общий провод	GND	GND разъем J6 пин 20 GND разъем J7 пин 20
Сигнал синхронизации	SCL/SCLK	разъем J5 пин 7 –> SPI SCK (CLK PQ0)
Вывод данных	SDA	разъем J6 пин 15 –> MOSI (TX PQ2)
Выборка кристалла MPU9250	CS	разъем J6 пин 12 –> SPI CS (PQ1)
Выборка кристалла BMP280	CSB	разъем J6 пин 13 –> SPI CS Display (PP3)

Таблица 3

Контакты, используемые для подключения SD-карты

Цепь	SD-карта	Плата MSP432P401R
Напряжение питания +2.4…3.6 В	3V3	3V3 разъем J5 пин 1 3V3 разъем J1 пин 1
Общий провод	GND	GND разъем J6 пин 20 GND разъем J7 пин 20
Сигнал синхронизации	SCK	разъем J1 пин 7 –> SPI SCK (CLK PD3)
Вывод данных	MISO	разъем J2 пин 14 –> MISO (RX PD0)
Выборка кристалла SD-карты	CS	разъем J2 пин 12 –> SPI CS Other (PN3)

Таблица 4

Контакты, используемые для подключенияGPS-модуля

Цепь	GPS-модуль NEO-M8N	Плата MSP432P401R
Напряжение питания +3.3…5 В	VCC	3V3 разъем J1 пин 1 3V3 разъем J3 пин 1
Общий провод	GND	GND разъем J2 пин 20 GND разъем J3 пин 22
Выход передатчика	TXD	разъем P3.3 –> вход приемника RX (–>MCU)
Вход приемника	RXD	разъем P3.2 –> выход передатчика TX (–>MCU)

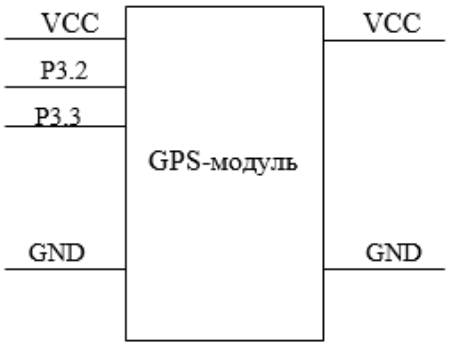


Рис. 5. Схема GPS-модуля

Перед непосредственной разработкой прототипа использована функция 3D-предпросмотра прототипа, которая позволяет создавать точные визуальные модели разрабатываемого устройства и выявлять потенциальные ошибки компоновки на ранних этапах. Также функция 3D-предпросмотра позволяет в реальном времени изменять масштаб и угол обзора модели благодаря поддержке аппаратного ускорения графики.

В процессе создания опытного образца были использованы следующие компоненты:

– оборудование для монтажа (паяльная станция);

– электронные компоненты (основная плата и плата подсистемы позиционирования, микроконтроллер MSP432P401R, акселерометр MPU-9250, GPS-модуль U-Blox NEO-M8L);

– система питания и хранения данных (блок питания 5В/500 мА и карта памяти SD-формата).

Для разработки печатных плат и принципиальных схем применялась параметрическая САПР FreeCAD, обладающая рядом преимуществ, например: открытый исходный код, возможность создания 3D-моделей плат, отсутствие ограничений на размеры проектируемых объектов, гибкий параметрический функционал, упрощающий внесение изменений в проект [12].

На рис. 6 представлена разводка контактных площадок для монтажа GPS-модуля, выполненная в среде проектирования FreeCAD.

Подключение GPS-модуля к процессору АП МС ДП выполняется через выход передатчика модуля (TXD) ко входу приемника процессора (P3.3/RX) и вход приемника модуля (RXD) к выходу передатчика процессора (P3.2/TX). Рабочее напряжение должно находиться в диапазоне 3.3–5 В, подключается питание через разъемы J1 и J3 (первый пин). Общий провод (заземление) подключается к разъемам J2 (20 пин) и J3 (22 пин) соответственно. Для передачи данных используется выход передатчика TXD, который подключается к разъему P3.3 на вход приемника (процессора) RX. Вход приемника RXD подключается к разъему P3.2 на выход передатчика TX. На рис. 7 показан опытный образец с GPS-модулем, подключенным к общей плате, демонстрирующий физическую реализацию всех соединений, корректное расположение компонентов на общей плате, а также практическую реализацию описанной схемы подключения.

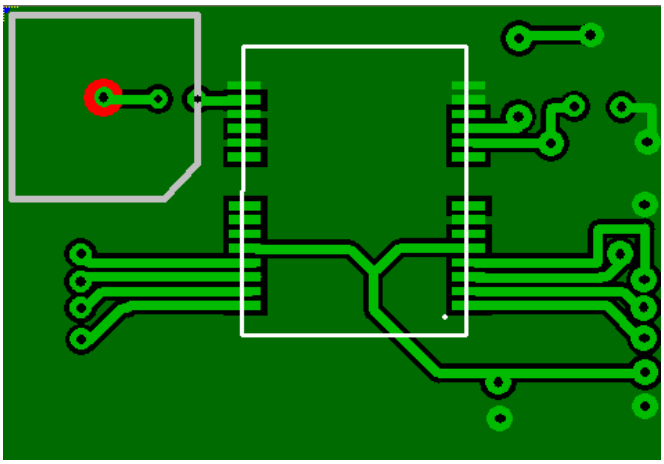


Рис. 6. Плата для GPS-модуля

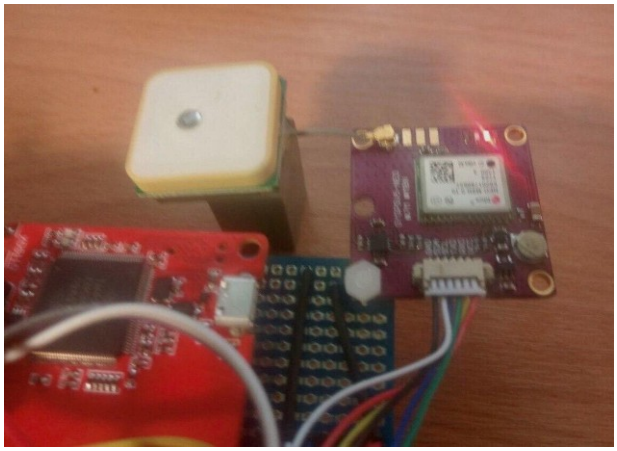


Рис. 7. Подключенный GPS-модуль

Подключение датчика MPU-9250 к процессору АП МС ДП осуществляется при напряжении питания от 2.4 до 3.6 В. Подключение питания производится через разъемы J1 и J3 (первый пин). Общий провод (заземление) подключается к разъемам J6 и J7 (20 пин). Сигнал синхронизации передается через разъем J5 7-го пина с использованием интерфейса SPI (CLK PQ0). Данные (SDA) выводятся через разъем J6 15-го пина к передатчику TX PQ2. Выборка кристалла MPU-9250 (CS) осуществляется через разъем J6 12-го пина, интерфейс SPI (PQ1). Для выборки кристалла BMP280 (CSB) используется разъем J6 13-го пина, интерфейс SPI (PP3). На рис. 8 показана плата с подключенными датчиками и SD-картой.

Подключение SD-карты требует напряжения питания в диапазоне от 2.4 до 3.6 В. Соединение осуществляется через разъемы J5 и J1 первого пина. Общий провод (заземление) подключается через разъемы J6 и J7 20-го пина. Сигнал синхронизации поступает через разъем J1 7-го пина с использованием интерфейса SPI (CLK PD3). Данные выводятся через разъем J2 14-го пина, который является приемником RX (PD0) для интерфейса MISO. Выборка кристалла SD-карты производится через разъем J2 12-го пина с использованием интерфейса SPI (PN3). На рис. 9 показан опытный образец АП МС ДП с подключенной SD-картой.

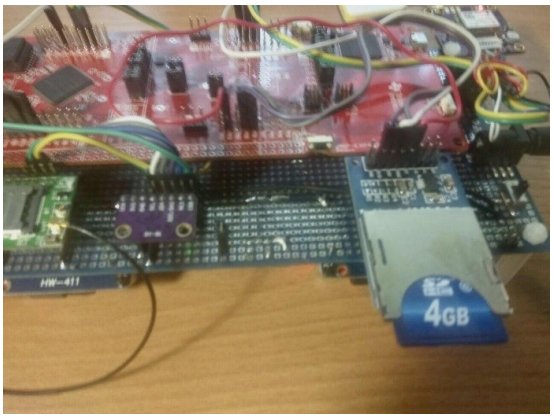


Рис. 8. Подключенные датчики и SD-карта

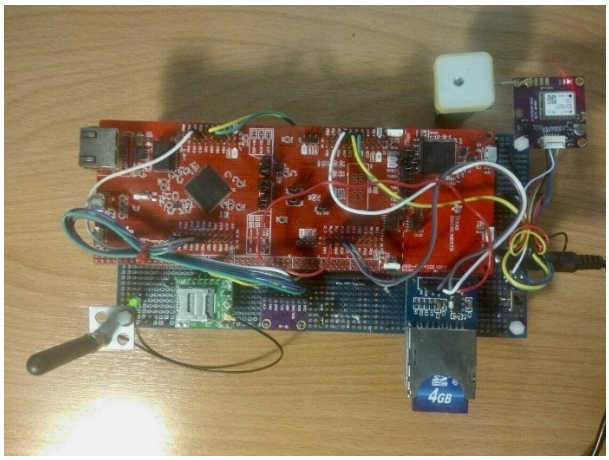


Рис. 9. Опытный образец АП МС ДП

Разработанная АП МС ДП позволяет проводить автоматизированный мониторинг состояния ДП в реальном времени.

Заключение

Использование глобальных и региональных моделей тропосферы, таких как MOPS, обеспечивает коррекцию тропосферных задержек навигационных сигналов, что значительно повышает точность определения координат. Структурная схема первичного узла сборки информации и опытный образец подтверждают техническую реализуемость и эффективность предлагаемого решения. На основе результатов программно реализованных моделей предобработки сигналов акселерометра, классификации состояния ДП и траекторной кластеризации маршрутов объезда выбоин становится возможной объективная оценка необходимости проведения ремонтных работ.

Таким образом, предложенный подход демонстрирует эффективность сочетания современных навигационных технологий и аппаратных решений для автоматизированного мониторинга ДП. Дальнейшие исследования направлены на оптимизацию моделей тропосферных задержек для Белгородской области и расширение функциональности подсистемы за счет алгоритмов машинного обучения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙСПИСОК

1. *Schueler T., Hein G.W., Eissfeller B.* A new tropospheric correction model for GNSS navigation // Proceedings of GNSS. 2001. Pp. 8–11.
2. Minimum Operational Performance Standards for Global Positioning System // Wide Area Augmentation System Airborne Equipment. RTCA/DO-229C. November 28, 2001.
3. *Sipos A.* ICAO Standards and Recommended Practices (SARPs) // International Aviation Law: Regulations in Three Dimensions. Cham: Springer International Publishing, 2024. Pp. 203–231. DOI: 10.1007/978-3-031-39066-1_4
4. Manual for the validation of GNSS in civil aviation. European Commission DG VII, 2000.
5. *Schueler T., Hein G.W., Eissfeller B.* A New Tropospheric Correction Model for GNSS Navigation // Proceedings of GNSS 2001. V GNSS International Symposium. Seville, Spain: Spanish Institute of Navigation, May 8–11, 2001.

6. *Penna N., Dodson A., Chen W.* Assessment of EGNOS tropospheric correction model // Journal of Navigation. 2001. Vol. 54, No. 1. Pp. 37–55. DOI: 10.1017/S0373463300001107 EDN: FOLLWL
7. *Storm van Leeuwen S.*, *van der Marel H.*, *Tossaint M.*, *Martelluci A.* Validation of SBAS MOPS Troposphere Model over the EGNOS Service Area // European Navigation Conference GNSS-2004. Rotterdam, the Netherlands, May 17–19, 2004.
8. *Schueler T.* On Ground-Based GPS Tropospheric Delay Estimation: Dissertation. München: Universität der Bundeswehr München, 2001. 73 p. URL: http://137.193.32.1/Forschung/TropAC/docs/phd/index.html (дата обращения: 19.05.2025).
9. *Schaer S. et al.* The impact of the atmosphere and other systematic errors on permanent GPS networks // Geodesy Beyond 2000: The Challenges of the First Decade IAG General Assembly Birmingham, July 19–30, 1999. Springer Berlin Heidelberg, 2000. Pp. 373–380.
10. *Баданис К.Е., Шамраев А.А.* Многоуровневая система мониторинга и управления агропромышленным предприятием. Подсистема позиционирования // Вестник студенческого научного сообщества НИУ БелГУ: сб. статей. Белгород, 2022. С. 401–403. ISBN: 978-5-6048482-7-2
11. *Лазурин С. В. и др.* Телеметрический GPS/GSM-модуль для системы мониторинга автотранспорта. 2011. EDN: SXZXGD
12. *Волкогонов В.Н., Гельфанд А.М., Деревянко В.С.* Актуальность автоматизированных систем управления // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2019). 2019. С. 262–266. EDN: YDHDIC
13. *Bai Y.* Microcontroller engineering with MSP432: fundamentals and applications. CRC Press, 2016. DOI: 10.1201/9781315367101
14. *Dang D., Pack D.J., Barrett S.F.* Embedded systems design with the Texas Instruments MSP432 32-bit processor. Springer Nature, 2022.
15. *Kacmarik M., Fojtik D.* Positioning performance of low-cost U-BLOX NEO-M8U module in urban environment // MM Science Journal. 2023. DOI: 10.17973/mmsj.2023_10_2023080 EDN: YTUAOG
16. Датчик NEOM8 [Электронный ресурс] // Официальный сайт компании U-Blox. URL: https://www.u-blox.com/en/product/neo-m8-series (дата обращения: 19.05.2025).

Статья поступила в редакцию 16.04.2025

doi: 10.14498/tech.2025.1.1

AUTOMATED MONITORING OF ROAD SURFACES TAKING INTO ACCOUNT THE CORRECTION OF TROPOSPHERIC DELAYS OF SATELLITE NAVIGATION SIGNALS

***K.E. Badanis*[1]**

Belgorod State National Research University
85, Pobedy St., Belgorod, 308015, Russian Federation

E-mail: badanis@bsuedu.ru

Abstract. *The article considers the development of an automated road surface monitoring subsystem taking into account the correction of tropospheric delays of satellite navigation signals. Global and regional tropospheric models recommended by ICAO SARPS and their application to improve the accuracy of navigation measurements are presented. The block diagram of the hardware of the subsystem, including the MSP432P401R microcontroller, acceleration sensors and a GPS module, is described, and the process of developing a prototype is detailed. The results of the work demonstrate the possibility of integrating complex tropospheric delay models into the monitoring subsystem to improve the accuracy of data and the efficiency of road surface assessment. The proposed approach to tropospheric delay correction allows to increase the stability and reliability of coordinate determinations in a changing environment. The developed hardware platform ensures reliable data collection and processing in real time, which makes it suitable for use in road monitoring systems in various climatic conditions, as well as for integration into a smart city system. Particular attention is paid to the adaptation of tropospheric delay models to specific regional conditions, which allows for increasing the reliability and accuracy of the data obtained.*

Keywords: *monitoring, road surface, troposphere, tropospheric delays, satellite systems, automated subsystem, GPS module, accelerometer.*

REFERENCES

1. *Schueler T., Hein G.W., Eissfeller B.* A new tropospheric correction model for GNSS navigation // Proceedings of GNSS. 2001. Pp. 8–11.
2. Minimum Operational Performance Standards for Global Positioning System // Wide Area Augmentation System Airborne Equipment. RTCA/DO-229C. November 28, 2001.
3. *Sipos A.* ICAO Standards and Recommended Practices (SARPs) // International Aviation Law: Regulations in Three Dimensions. Cham: Springer International Publishing, 2024. Pp. 203–231. DOI: 10.1007/978-3-031-39066-1_4
4. Manual for the validation of GNSS in civil aviation. European Commission DG VII, 2000.
5. *Schueler T., Hein G.W., Eissfeller B.* A New Tropospheric Correction Model for GNSS Navigation // Proceedings of GNSS 2001. V GNSS International Symposium. Seville, Spain: Spanish Institute of Navigation, May 8–11, 2001.
6. *Penna N., Dodson A., Chen W.* Assessment of EGNOS tropospheric correction model // Journal of Navigation. 2001. Vol. 54, No. 1. Pp. 37–55. DOI: 10.1017/S0373463300001107 EDN: FOLLWL
7. *Storm van Leeuwen S.*, *van der Marel H.*, *Tossaint M.*, *Martelluci A.* Validation of SBAS MOPS Troposphere Model over the EGNOS Service Area // European Navigation Conference GNSS-2004. Rotterdam, the Netherlands, May 17–19, 2004.

© The Author(s), 2025.

[1] *Kirill Y. Badanis, Postgraduate Student, Dept. of Information and Robotic Systems.*

8. *Schueler T.* On Ground-Based GPS Tropospheric Delay Estimation: Dissertation. München: Universität der Bundeswehr München, 2001. 73 p. URL: http://137.193.32.1/Forschung/TropAC/docs/phd/index.html (дата обращения: 19.05.2025).
9. *Schaer S. et al.* The impact of the atmosphere and other systematic errors on permanent GPS networks // Geodesy Beyond 2000: The Challenges of the First Decade IAG General Assembly Birmingham, July 19–30, 1999. Springer Berlin Heidelberg, 2000. Pp. 373–380.
10. *Badanis K.E., Shamraev A.A.* Mnogourovnevaya sistema monitoringa i upravleniya agropromyshlennym predpriyatiem. Podsistema pozicionirovaniya [Multilevel system for monitoring and managing an agro-industrial enterprise. Positioning subsystem] // Vestnik studencheskogo nauchnogo soobshchestva NIU BelGU: sb. statej. Belgorod, 2022. Pp. 401–403. (In Russian)
11. *Lazurin S.V. i dr.* Telemetricheskij GPS/GSM-modul dlya sistemy monitoringa av-totransporta [Telemetry GPS/GSM module for vehicle monitoring system]. 2011. (In Russian)
12. *Volkogonov V.N., Gel'fand A.M., Derevyanko V.S.* Aktualnost avtomatizirovannyh sistem upravleniya [Relevance of automated control systems] // Aktualnye problemy infotelekommunikacij v nauke i obrazovanii (APINO 2019). 2019. Pp. 262–266. (In Russian)
13. *Bai Y.* Microcontroller engineering with MSP432: fundamentals and applications. CRC Press, 2016. DOI: 10.1201/9781315367101
14. *Dang D., Pack D.J., Barrett S.F.* Embedded systems design with the Texas Instruments MSP432 32-bit processor. Springer Nature, 2022.
15. *Kacmarik M., Fojtik D.* Positioning performance of low-cost U-BLOX NEO-M8U module in urban environment // MM Science Journal. 2023. DOI: 10.17973/mmsj.2023_10_2023080 EDN: YTUAOG
16. Datchik NEOM8 [Elektronnyj resurs] // Oficialnyj sajt kompanii U-Blox. URL: https://www.u-blox.com/en/product/neo-m8-series (data obrashcheniya: 19.05.2025)

Original article submitted 16.04.2025

doi: 10.14498/tech.2025.1.2
EDN: WERMFQ

УДК65.01.005

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ОРГАНИЗАЦИИ РАБОТ С ИНФОРМАЦИОННОЙ МОДЕЛЬЮ ОБЪЕКТА ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ И ПРОИЗВОДСТВЕ ПРОДУКЦИИ АВИАСТРОИТЕЛЬНОЙ ОТРАСЛИ

***А.С. Говорков, Н.В. Подрез*[1]**

Иркутский национальный исследовательский технический университет
Россия, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83

E-mail: govorkov_as@istu.edu, podreznv@ex.istu.edu

Аннотация. *В последнее десятилетие многие крупные российские компании, занятые в области проектирования в различных отраслях (нефтегазовой, авиакосмической, строительной, энергетической и других), самостоятельно разрабатывают концепции работы в области информационного моделирования. Этот процесс тесно связан с созданием цифровых моделей объектов, которые в большинстве случаев представляют собой здания, сооружения, транспортные средства, протяженные коммуникации, подземные объекты.*

В каждой из этих отраслей цифровая модель объекта обладает специфическими свойствами, которые оказывают влияние на процесс работы с ней, а также на процесс ее создания. От этого процесса зависят график производства проектных работ, количество занятных сотрудников, ее качественные характеристики, а также качество готового продукта.

Основной проблемой работы с цифровой моделью в авиастроительной отрасли является отсутствие структурированности этого процесса, недостаточно эффективный подход к организации процесса взаимодействия отдельных подразделений предприятий, которые создают и модифицируют ее.

Для решения этой проблемы разработаны специфические подходы к процессу проектирования, учитывающие особенности цифровых моделей объектов авиастроительной отрасли, обеспечивающие высокий уровень качества готового продукта и позволяющие обращаться к модели в течение всего периода эксплуатации готового изделия.

Разработана методология работы с моделью, учитывающая все ее специфические особенности.

Ключевые слова: *методология, информационная модель объекта, система менеджмента качества, авиастроительная отрасль, информационное пространство объекта.*

Введение

В настоящее время в крупных проектных организациях нашей страны стала широко применяться система менеджмента качества (СМК) [1].

© Автор(ы), 2025

[1] *Алексей Сергеевич Говорков, кандидат технических наук, доцент, директор института информационных технологий и анализа данных.*

Никодим Владимирович Подрез, кандидат технических наук, доцент кафедры самолетостроения и эксплуатации авиационной техники.

СМК используется для поддержания устойчивости всех бизнес-процессов, происходящих на предприятии, а также для контроля качества не только выпускаемой продукции, но и всех технологических процессов, предназначенных для ее выпуска.

СМК позволяет повысить конкурентоспособность предприятия в условиях высоких требований рынка и конечного потребителя. Особенно актуальными являются эти требования для предприятий авиационного и аэрокосмического комплекса, на которых обеспечение высокого качества выпускаемой продукции является одной из главных целей производства.

На любом производстве существует несколько основных причин, обуславливающих необходимость использования функциональной СМК. К таким причинам относятся: увеличение производительности, рост доверия со стороны потребителей продукции, выход на мировые рынки за счет роста сферы влияния компании [2].

Внедрение СМК на предприятии происходит, как правило, в несколько этапов, к которым относятся: анализ ситуации на предприятии и проведение обучения персонала, разработка документации, касающейся повышения качества выпускаемой продукции и роста производительности труда, разработка графика работы и условий труда, разработка документации по внедрению и проведению внутреннего аудита СМК [3, 4].

Важность использования СМК на предприятии требует разработки новых моделей управления и обработки информации, которые описаны ниже.

С целью предупреждения большого количества ошибок при работе с цифровой моделью объекта, а также с учетом значительного объема информации, которая содержится в такой модели, необходимо разработать комплекс правил и мероприятий, позволяющих снизить затраты времени и ресурсов как на разработку модели, так на ее корректировку, проверку и сборку [5].

Кроме того, следует разработать структуру этого процесса для эффективной интеграции цифровой модели в производственную систему предприятия. Интеграция позволит выбрать для создания модели наиболее эффективное программное обеспечение (ПО), объединить базу данных (БД) цифровой модели с общей БД предприятия. Для этого предложено применение специфических подходов, позволяющих учесть все особенности готового объекта [6].

Основные положения методологии предусматривают для всех исполнителей, осуществляющих работу с моделью, свод правил, согласно которым производятся необходимые операции с моделью [7]. Отступление от этих правил недопустимо. Также в составе команды, участвующей в проектировании, выделяют специалистов, которые на разных этапах разработки цифровой модели объекта производят проверку вносимых данных и осуществляют анализ модели на коллизии [10].

Таким образом, весьма важным направлением совершенствования цифровой модели является методология ее разработки и развития с течением всего времени развития объекта, включая его проектирование, производство и эксплуатацию [14].

Содержательная часть

Работа с информационной моделью (ИМ) имеет ряд особенностей, которые необходимо учитывать до начала работ.

Эти особенности рекомендуется оформить в специальный регламент работ, выполнение которого обеспечит [8–10]:

– эффективную работу с ИМ;
– корректность при обращении к информационной модели;
– обеспечение информационной безопасности;
– эффективное использование различного ПО;
– формирование группы специалистов, ответственных за работу с ИМ;
– адаптацию модели под требования заказчика;
– осуществление процесса проверки информационной модели на установленные критерии;
– проведение сборки 3D-модели по различным критериям (по системам, маркам проекта, отдельным узлам и агрегатам);
– обучение сотрудников работе с 3D-моделью и ее базой данных.

Ниже представлена разработанная методология процесса проектирования самолета с использованием информационной модели (ИМ), которая предусматривает учет всех особенностей, характеризующих 3D-модель и связанные с ней объекты проектирования [9].

Основные положения методологии учитывают порядок производства работ при создании информационной модели объекта, разделение работ между участниками, а также порядок проверки модели [10].

Разработанная методология предусматривает следующие основные этапы работы с информационной моделью:

1) разработка БД информационной модели и интеграция ее в БД предприятия;
2) формирование графика работ с информационной моделью;
3) разработка отдельных элементов 3D-модели;
4) объединение отдельных элементов в сводную 3D-модель;
5) проведение нескольких этапов проверки 3D-модели;
6) передача данных из 3D-модели в специализированные ПО для генерации документации (ВОР, смет, чертежей, графиков, спецификаций);
7) передача 3D-модели заказчику;
8) корректировка модели на всех этапах жизненного цикла объекта.

Визуализация основных этапов разработанной методологии приведена на рис. 1.

Каждый из этапов представляет собой комплекс действий нескольких исполнителей, которые четко разделены во времени, имеют определенный порядок. Этапы характеризуются заранее разработанной структурой и описываются регламентом, который принят руководством предприятия и обязателен для выполнения всеми членами команды, осуществляющей работу с информационной моделью [14].

Порядок следования этапов – последовательный. Замена одного этапа другим либо изменение очередности этапов не допускается.

Каждый этап предусматривает комплекс работ, выполняемых несколькими исполнителями. В середине процесса предусмотрен этап № 5, который является контрольным. Он позволяет оценить качество ИМ, выявить наличие ошибок, идентифицировать элементы модели, которые не отвечают заданным требованиям и критериям [15].

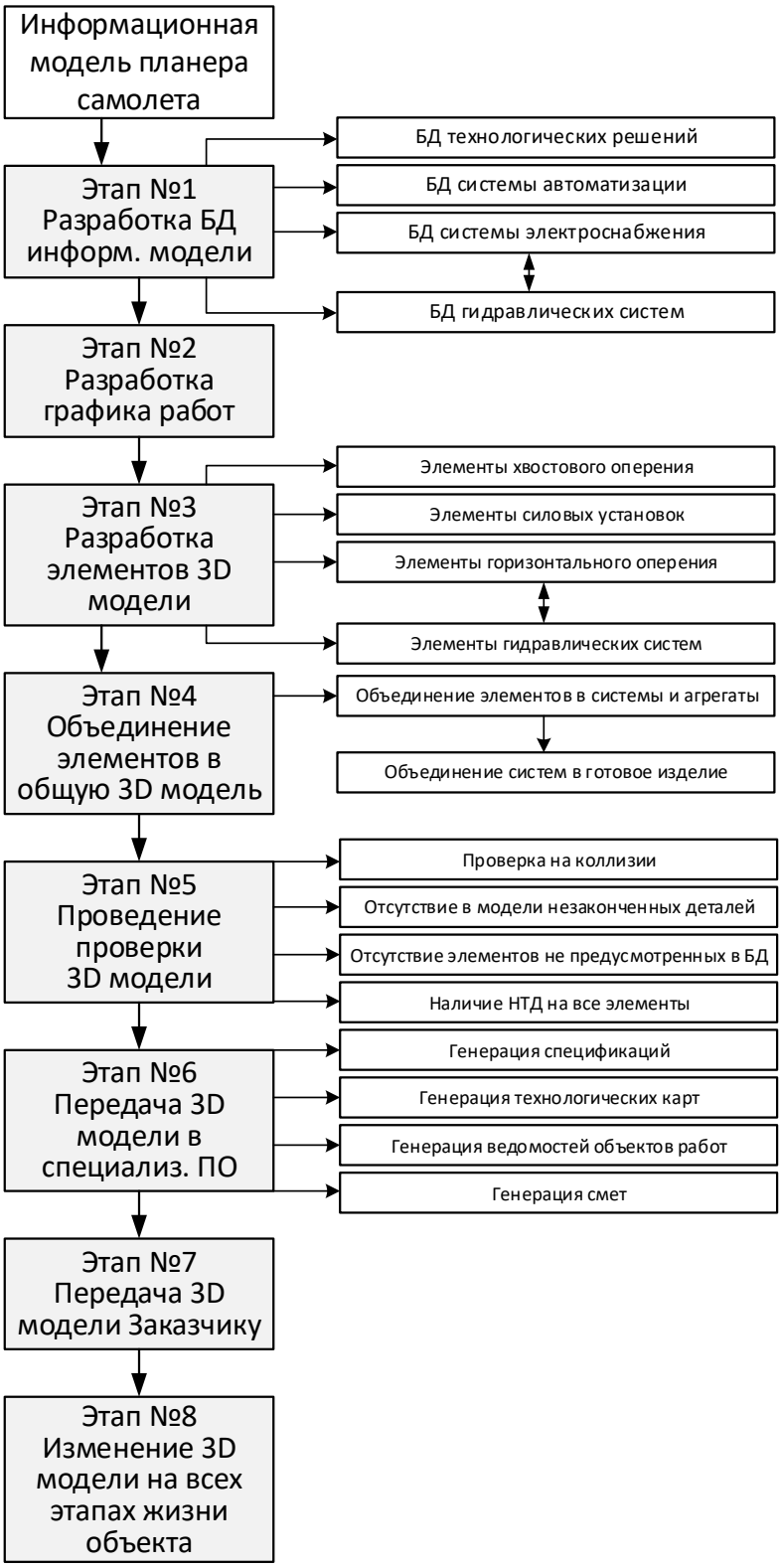


Рис. 1. Методологические этапы работы с информационной моделью изделия

Каждый этап предусматривает назначение специалиста, ответственного за проведение всего комплекса работ, входящих в состав данного этапа. Так, например, при формировании БД изделия ее наполнение производится всеми специалистами, занятыми при разработке модели. Но лишь один специалист – координатор БД осуществляет контроль за внесением информации в БД проекта, оценку правильности каждой из записей элементов, проверку процесса взаимодействия БД проекта с БД предприятия [16].

В общем виде схема этапа № 1 представлена на рис. 2.

На **этапе № 1** производится контроль действий отдельных специалистов, которые направляют сведения об отдельных элементах информационной модели в общую БД проекта.

Специалист, который осуществляет контроль за корректностью записей каждого элемента, с использованием специализированного ПО осуществляет проверку на достаточную информативность записи об элементе, на соответствие БД предприятия, а также нормативной документации. Например, при наведении курсора на отдельный элемент должно появляться всплывающее окно, в котором отображаются характеристики элемента, а также нормативный документ (ТУ, ГОСТ, ОСТ и т. д.), по которому он производится.

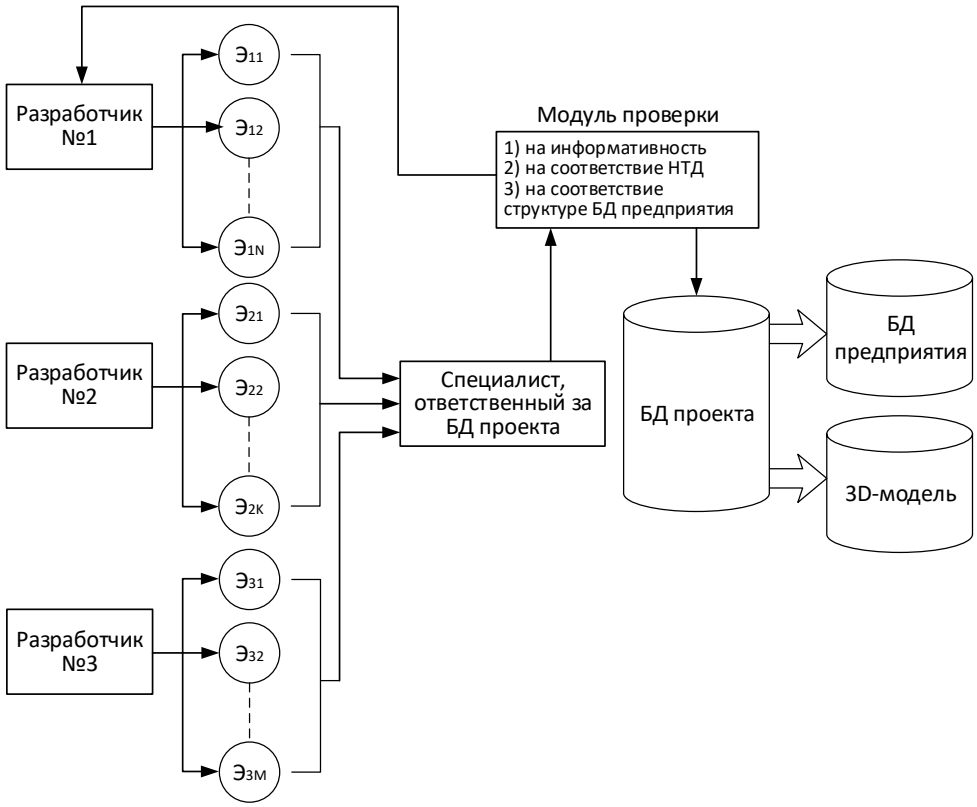


Рис. 2. Схема этапа № 1 работы над цифровой моделью

В рамках развития СМК на предприятии предложено организовать единое информационное пространство отдельного проекта.

Цифровая среда, в которой разрабатывается информационно модель изделия, производится передача всех видов информации, представляет собой вложенные друг в друга информационные пространства, доступ в которые организован строго в зависимости от того, какое место участник проекта занимает в организационной структуре проекта.

Между всеми участниками проекта образуется единое информационное пространство, доступное всем (рис. 3). В нем обращается, изменяется, хранится и обрабатывается информация обо всех характеристиках изделия.

При этом следует учитывать, что структуру информационного пространства организует заказчик. Только он решает, какой объем информации может быть доступен всем или отдельному участнику проекта.

В это пространство интегрируется информационная модель авиационной техники, в состав которой входят все изделия. Однако доступной она в общем случае только для заказчика, подрядчика по проектированию и подрядчика по производству. Остальные участники проекта не могут видеть ее и вносить в нее какие-либо изменения.

Единое информационное пространство предприятия включает следующие основные элементы:

– базу данных оборудования, изделий и материалов;

– базу данных нормативной и технической документации;

– исходные данные для проектирования воздушного судна (техническое задание заказчика);

– сведения обо всех элементах производственной системы предприятия.

Рис. 3. Информационное пространство проекта

На авиационном предприятии, как правило, организована собственная цифровая среда, основной целью которой является полная автоматизация всех бизнес-процессов предприятия.

Цифровая среда предприятия должна отвечать следующим основным принципам [9–11]:

- высокий уровень корпоративной безопасности;
- постоянное развитие;
- управление всеми бизнес-процессами предприятия;

- отечественное производство основных компонентов цифровой среды;
- адаптация под цифровую среду программных продуктов зарубежного производства, не имеющих аналогов в нашей стране;
- организация единого информационного пространства на предприятии, доступного для любого из пользователей;
- обеспечение возможности обучения персонала работе с цифровыми технологиями за счет разработанных стандартов предприятия, руководящих документов и инструкций.

Организация цифровой среды производится с учетом пожеланий и требований пользователей, которые составляют техническое задание на разработку и отладку ее отдельных элементов, интегрируемых затем в общую информационную систему предприятия [13].

Цифровая среда обслуживается ИТ-специалистами предприятия и в любой момент может стать полностью автономной, независимой от внешней информационной среды.

В условиях современных вызовов и проблем автономность цифровой среды имеет ключевое значение, так как позволяет обеспечить наивысший уровень ее безопасности и полную независимость как от зарубежных партнеров, так и от сторонних предприятий и организаций, которые могут прямо или косвенно нанести ущерб информационным ресурсам предприятия авиационной промышленности.

Этап № 2 предусматривает разработку графика работ с моделью. Разработка графика осуществляется с использованием метода Arima с учетом его модификации, которая позволяет адаптировать график под конкретные условия предприятия (фактическую загрузку сотрудников, наличие материальных и временных ресурсов).

Этап № 3 включает процесс разработки отдельных элементов модели. На данном этапе происходит отрисовка каждого элемента модели либо включение его в состав узла (агрегата или системы) из БД проекта.

Этап № 4 предусматривает объединение отдельных элементов (либо агрегатов и узлов) в единую информационную модель. Причем объединение происходит под контролем специалиста, который обеспечивает последовательную работу нескольких специалистов, разрабатывающих проект одной системы либо одного узла.

Объединение элементов происходит по посадочным поверхностям, которые специализированное ПО проверяет сразу для двух (или нескольких) элементов, объединяющихся в один объект. Проверка происходит по следующим критериям:

- посадочные размеры;
- допуски;
- шероховатость.

Этап № 5 представляет собой несколько видов проверки информационной модели самолета. Вид проверки «Внутренний» предусматривает проверку модели внутри проектного подразделения. Проверка осуществляется в автоматизированном режиме на следующие несоответствия:

1) использование деталей, изготавливаемых без нормативной документации (ТУ, ОСТ, ГОСТ и т. д.);

2) несоответствие расположения деталей принятой системе координат;

3) отсутствие в БД соответствующего описания детали;

4) наличие в информационной модели деталей и изделий с неоконченным моделированием;

5) наличие в модели посторонних предметов, объектов, деталей, изделий;

6) незаполненность характеристик технологических линий (систем самолета);

7) распределение изделий по слоям вне соответствия с принятой на предприятии цифровой кодировкой.

Вид проверки «Внешний» предусматривает следующие проверки информационной модели:

1) проверка на коллизии (пересечения деталей внутри одного узла, агрегата, системы);

2) проверка на коллизии (взаимные пересечения между собой трубопроводов, узлов, агрегатов в составе всего самолета);

3) выборочная проверка отрисовки характеристик изделий, которые вносятся в БД вместе с информацией об изделии, детали, элементе;

4) выборочная проверка формирования вспомогательной документации из собранной 3D-модели (видов, разрезов, узлов, сечений, спецификаций, ведомостей объемов работ).

Этап № 6 предназначен для передачи данных из информационной модели в специализированные программные продукты, которые позволяют автоматически формировать:

- технологические карты на производство изделия;
- ведомости объемов работ;
- сметную документацию;
- спецификации.

Эффективность работ на данном этапе зависит от технических возможностей предприятия, на котором разрабатываются специализированные программные комплексы, предназначенные для передачи данных из графических программных комплексов зарубежного производства в отечественное ПО для разработки текстовых документов («Гранд-Смета», «Адепт» и другие).

Любые изменения, которые происходят в информационной модели изделия, позволяют автоматически изменять указанные выше документы, входящие в комплект направляемой заказчику проектной документации.

В основе СМК авиастроительного предприятия лежит принцип последовательной коммуникации между отдельными подразделениями предприятия, которые получают задания от ведущего технологического подразделения, осуществляющего проектирование изделия.

На рис. 4 приведена предлагаемая последовательная коммуникация между отдельными подразделениями предприятия.

Производственные подразделения осуществляют полный комплекс обработки поверхности детали, выполняя все технические требования, которые указаны на рабочих чертежах изделия.

По окончании обработки изделия оно направляется в испытательную лабораторию вместе с сопроводительными документами. Направление изделия также формируется в виде задания от одного подразделения к другому.

В задании содержится вся необходимая информация о том, что необходимо выполнить другому подразделению. Кроме того, в задании указывается автор задания, дата выдачи, необходимые комментарии и согласующие его специали-

сты. Также к заданию прикрепляются все необходимые файлы, содержащие исчерпывающую информацию об объекте, на который выдается задание.

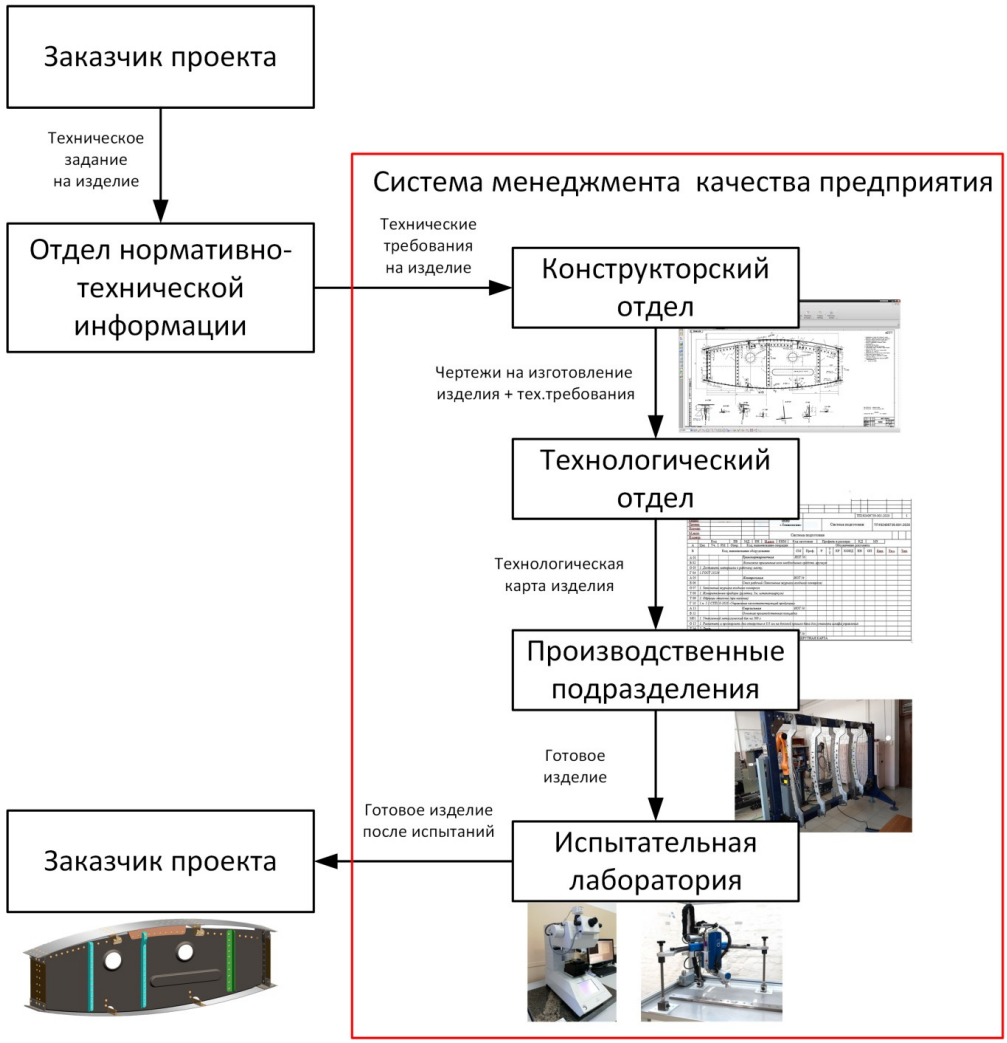


Рис. 4. Схема последовательной коммуникации между подразделениями предприятия с интеграцией в схему СМК

На каждом из этапов производится контроль качества проводимых работ со стороны специалистов СМК, которые отслеживают следующие параметры технологического процесса:

1) соответствие графику выполняемых работ;
2) соответствие изделия техническому заданию заказчика;
3) соответствие изделия требованиям нормативных документов, согласно которым оно производится;
4) соответствие приборов контроля и испытательного оборудования методикам измерений.

При несоответствии работ подразделений при изготовлении изделия указанным выше требованиям специалисты СМК выдают предупреждение и отслеживают устранение обнаруженных недостатков.

Внедрение СМК в производственную деятельность предприятия предусматривает проведение комплекса организационных и технических мероприятий, в которых принимают участие все работники предприятия.

Основными этапами интеграции СМК в систему проектирования являются:

1) подтверждение международных сертификатов соответствия требованиям международных стандартов (ISO 9001:2015, ISO 14001:2015, ISO 45001:2018);

2) создание структуры управления СМК на предприятии;

3) обучение персонала основным положениям СМК;

4) разработка структуры документации СМК;

5) организация производственного контроля за соблюдением требований промышленной и пожарной безопасности на производстве;

6) организация производственного контроля за качеством выпускаемой продукции;

7) организация производственного экологического контроля;

8) организация инструментов системы для увеличения производительности предприятия и повышения качества продукции.

Этап № 7 представляет собой процесс передачи информационной модели заказчику. На данном этапе специалистами профильных служб заказчика производится проверка ИМ, а также всей сопроводительной документации. При наличии замечаний информационная модель отправляется в проектную организацию на доработку.

Этап № 8 является по времени самым длительным, так как представляет собой процесс внесения всех изменений, модернизаций, модификаций изделия в процессе его строительства и последующей эксплуатации. С использованием информационной модели появляется уникальная возможность следить за всеми ее изменениями при изменении только одного элемента. То есть заказчик получает возможность моделировать различные варианты модификаций изделия, не выполняя их. Сравнение нескольких вариантов модификаций и модернизаций можно производить, сразу получая сводный сметный расчет для экономического сравнения вариантов.

Выводы

Таким образом, разработанная методология работы с информационной моделью обуславливает сокращение трудозатрат предприятия на проектирование и производство изделий авиационной техники за счет:

1) организации формы и структуры информационного пространства предприятия, обеспечивающих эффективное и безопасное взаимодействие между участниками;

2) построения иерархической структуры процесса проектирования и производства продукции с учетом адаптации этих процессов к изменению внешних условий;

3) последовательной автоматизированной коммуникации между отдельными проектными и производственными подразделениями;

4) интеграции СМК в систему проектирования;

5) оценки экологической безопасности проектных решений;

6) введения экологического контроля за процессом производства продукции;

7) организации информационной модели изделия, которая характеризуется интегрированным доступом к ней всех участников проекта в любой момент времени;

8) обеспечения многоуровневого контроля за качеством проектных решений и произведенной продукцией на каждом из этапов.

Такая методология позволяет структурировать процесс разработки модели, адаптировать ее к специфическим особенностям производственной системы предприятия, сформировать и упорядочить работу сотрудников, разрабатывающих модель и осуществляющих ее проверку.

Все этапы, которые включает методология, автоматизированы. Из каждого этапа информация может быть передана главному инженеру проекта, который является координатором всех видов работ над созданием объекта.

Методологические основы предусматривают максимально возможный объем информации о каждом элементе объекта и ее хранение в специализированной базе данных, привязанной к объекту.

Основными преимуществами предлагаемой к реализации методологии являются сокращение времени на разработку ИМ, снижение загрузки сотрудников, рациональное распределение объемов работ внутри коллектива, занятого разработкой модели объекта.

Таким образом, предлагаемые к реализации мероприятия по внедрению единого информационного пространства проекта на предприятии авиастроения позволяют повысить производительность труда за счет эффективного взаимодействия между собой отдельных подразделений. Для этого организуется единое информационное пространство проекта, в котором осуществляются все взаимодействия между заказчиком проекта, проектной организацией и другими участниками. Вся информация, которая обращается в информационном пространстве, может быть доступна всем участникам проекта, если доступ специально не ограничивается. Подобная организация обмена информацией эффективна, так как позволяет специалистам СМК проводить постоянный либо периодический контроль за полнотой, качеством передачи информации и ее графиком. Кроме того, единое информационное пространство обеспечивает возможность проведения внутренних аудитов всех процессов, происходящих внутри конкретного проекта.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Магкиева З.И.* Разработка и внедрение системы менеджмента качества в соответствии со стандартом ИСО 9001-2015 // Научно-методический электронный журнал «Концепт». 2016. Т. 2. С. 376–380. EDN: VSDMFF
2. *Мингалеев Г.Ф.* Современные методы организации, управления и технологии бережливого производства: учеб. пособие. Казань: Абак-Сервис, 2010. 304 с.
3. *Мельникова Д.И.* Система менеджмента качества в условиях цифровизации: проблемы и перспективы развития // Молодой ученый. 2021. № 47 (389). С. 109–111. EDN: VSCRCQ
4. *Майкова П.Н., Майкова Е.Н., Захарова Ю.О. и др.* Сущность и значение системы менеджмента качества // Форум молодых ученых. 2020. № 10 (50). С. 344–350. EDN: BQFXYI
5. *Елохов А.М., Арбузова Т.А.* Управление качеством. Часть II. Система менеджмента качества: учеб. пособие: в 2 ч. 3-е изд., перераб. и доп. Пермь: Перм. гос. нац. исслед. ун-т, 2020. 188 с. URL: http://www.psu.ru/files/docs/science/books/uchebnie-posobiya/eloxov-arbuzova-upravlenie-kachestvom-ch2.pdf.
6. *Тихомирова О.Г., Галицкий С.В.* Проектирование производственных систем на основе системно-холистического подхода // Фундаментальные исследования. 2018. № 4. С. 120–124. EDN: XOSEZN

7. *Павлов Е.О., Монахов В.А.* Производственные системы: теоретические аспекты функционального анализа и перспективы инновационного развития // Российское предпринимательство. 2018. Т. 19, № 10. С. 3029–3040. DOI: 10.18334/rp.19.10.39506. EDN: COZSZP
8. *Радыгин А.Б., Сердюк А.И., Сергеев А.И.* Метод нормирования надежности оборудования при проектировании гибких производственных систем // Современные наукоемкие технологии. 2018. № 10. С. 103–108. EDN: YNHQXJ
9. *Калева Д.Е.* Особенности проектной деятельности в гражданской авиации // Молодой ученый. 2022. № 45 (440). С. 292–294. EDN: EPQFEH
10. *Черноусов Е.А.* Системы автоматизированного проектирования в реализации задач авиастроения // Шаг в науку. 2022. № 4. С. 81–86. EDN: EPXYCO
11. *Гришина В.А.* Мотивация персонала в рамках системы менеджмента качества промышленного предприятия // Социально-экономические явления и процессы. 2012. № 1. С. 53–56. EDN: PCDNDX
12. *Усик Н.И., Белокуров А.Э., Василенок А.В*. Важность системы менеджмента качества на предприятиях // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Экономика и экологический менеджмент». 2016. № 4. С. 70–77. DOI: 10.17586/2310-1172-2016-9-4-70-77. EDN: XDZSHN
13. Основы менеджмента: учебник / под ред. Д.В. Вачугова. М.: Высшая школа, 2002. 145 с.
14. Производственный менеджмент: учебник / под ред. С.Д. Ильенковой. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2002. 185 с.
15. Производственный менеджмент: учебник / под ред. В.А. Козловского. М.: ИНФРА-М, 2003. 574 с.
16. *Райзберг Б.А.* Курс управления экономикой: учеб. пособие. М.: Юпитер, 2003. 199 с. ISBN: 5-94723-439-4. EDN: QQBMNL
17. *Ревуцкий Л.Д.* Потенциал и стоимость предприятия. М.: Финансы и статистика, 2002. 208 с.

Статья поступила в редакцию 15.02.2025

doi: 10.14498/tech.2025.1.2

BASIC PRINCIPLES OF ORGANIZING WORK WITH AN INFORMATION MODEL OF AN OBJECT IN THE DESIGN AND PRODUCTION OF PRODUCTS IN THE AIRCRAFT INDUSTRY

***A.S. Govorkov, N.V. Podrez*[1]**

Irkutsk National Research Technical University
83, Lermontov str., Irkutsk, 664074, Russian Federation

E-mail: govorkov_as@istu.edu, podreznv@ex.istu.edu

Abstract. *Over the past decade, many large Russian companies engaged in the field of design in various industries (oil and gas, aerospace, construction, energy, and others) have independently developed concepts for working in the field of information modeling. This process is closely related to the creation of digital models of objects, which in most cases are buildings, structures, vehicles, extended communications, and underground facilities. In each of these industries, the digital model of an object has specific properties that affect the process of working with it, as well as the process of its creation. The schedule of project work, the number of interesting employees, its quality characteristics, as well as the quality of the finished product depend on this process. The main problem of working with the digital model in the aircraft industry is the lack of structuring of this process, an insufficiently effective approach to organizing the process of interaction between individual departments of enterprises that create and modify it. To solve this problem, it is necessary to develop specific approaches to the design process that would take into account the features of digital models of aircraft industry facilities, ensure a high level of quality of the finished product and allow access to the model throughout the entire period of operation of the finished product. To unify the design process using a digital model within a single enterprise, it is necessary to develop a methodology for working with the model that would take into account all its specific features.*

Keywords*: methodology, information model of the facility, quality management system, aircraft industry, information space of the facility*.

REFERENCES

1. *Magkieva Z.I.* Razrabotka i vnedrenie sistemy menedzhmenta kachestva v sootvetstvii so standartom ISO 9001-2015 [Development and implementation of a quality management system in accordance with the ISO 9001-2015 standard] // Nauchno-metodicheskij elektronnyj zhurnal «Koncept». 2016. V. 2. Pp. 376–380. (In Russian)
2. *Mingaleev G.F.* Sovremennye metody organizacii, upravleniya i tekhnologii berezhlivogo proizvodstva [Modern methods of organization, management and technologies of lean production]: uchebnoe posobie. Kazan: Abak-Servis, 2010. 304 p.

© The Author(s), 2025

[1] *Alexey S. Govorkov (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor, Director of the Institute of Information Technologies and Data Analysis.*
Nikodim V. Podrez (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor, Dept. of Aircraft Engineering and Aviation Technology Operation.

3. *Melnikova D.I.* Sistema menedzhmenta kachestva v usloviyah cifrovizacii: problemy i perspektivy razvitiya [Quality management system in the context of digitalization: problems and prospects of development] // Molodoj uchenyj. 2021. No. 47 (389). Pp. 109–111. (In Russian)
4. *Majkova P.N., Majkova E.N., Zaharova YU.O. i dr.* Sushchnost i znachenie sistemy menedzhmenta kachestva [The essence and significance of the quality management system] // Forum molodyh uchenyh. 2020. No. 10 (50). Pp. 344–350. (In Russian)
5. *Elohov A.M., Arbuzova T.A.* Upravlenie kachestvom. Chast II. Sistema menedzhmenta kachestva [Quality management system]: ucheb. posobie: v 2 ch. 3-e izd., pererab. i dop. Perm: Perm. gos. nac. issled. un-t, 2020. 188 p. URL: http://www.psu.ru/files/docs/science/books/uchebnie-posobiya/eloxov-arbuzova-upravlenie-kachestvom-ch2.pdf. (In Russian)
6. *Tihomirova O.G., Galickij S.V.* Proektirovanie proizvodstvennyh sistem na osnove sistemno-holisticheskogo podhoda [Designing production systems based on a system-holistic approach] // Fundamentalnye issledovaniya. 2018. No. 4. Pp. 120–124. (In Russian)
7. *Pavlov E.O., Monahov V.A.* Proizvodstvennye sistemy: teoreticheskie aspekty funkcional'nogo analiza i perspektivy innovacionnogo razvitiya [Production systems: theoretical aspects of functional analysis and prospects for innovative development] // Rossijskoe predprinimatel'stvo. 2018. V. 19, No. 10. Pp. 3029–3040. DOI: 10.18334/rp.19.10.39506. (In Russian)
8. *Radygin A.B., Serdyuk A.I., Sergeev A.I.* Metod normirovaniya nadezhnosti oborudovaniya pri proektirovanii gibkih proizvodstvennyh sistem [Method of rationing equipment reliability in the design of flexible production systems] // Sovremennye naukoemkie tekhnologii. 2018. No. 10. Pp. 103–108. (In Russian)
9. *Kaleva D.E.* Osobennosti proektnoj deyatel'nosti v grazhdanskoj aviacii [Features of project activity in civil aviation] // Molodoj uchenyj. 2022. No. 45 (440). Pp. 292–294. (In Russian)
10. *Chernousov E.A.* Sistemy avtomatizirovannogo proektirovaniya v realizacii zadach aviastroeniya [Computer–aided design systems in the implementation of aircraft engineering tasks] // Shag v nauku. 2022. No. 4. Pp. 81–86. (In Russian)
11. *Grishina V.A.* Motivaciya personala v ramkah sistemy menedzhmenta kachestva promyshlennogo predpriyatiya [Motivation of personnel within the framework of the quality management system of an industrial enterprise] // Socialno-ekonomicheskie yavleniya i processy. 2012. No. 1. Pp. 53–56. (In Russian)
12. *Usik N.I., Belokurov A.E., Vasilenok A.V.* Vazhnost sistemy menedzhmenta kachestva na predpriyatiyah [The importance of a quality management system at enterprises] // Nauchnyj zhurnal NIU ITMO. Seriya «Ekonomika i ekologicheskij menedzhment». 2016. No. 4. Pp. 70–77. DOI: 10.17586/2310-1172-2016-9-4-70-77. (In Russian)
13. Osnovy menedzhmenta [Fundamentals of management]: uchebnik / pod red. D.V. Vachugova. M.: Vysshaya shkola, 2002. 145 p. (In Russian)
14. Proizvodstvennyj menedzhment [Production Management]: uchebnik / pod red. S.D. Ilenkovoj. M.: YUNITI-DANA, 2002. 185 p. (In Russian)
15. Proizvodstvennyj menedzhment [Production Management]: uchebnik / pod red. V.A. Kozlovskogo. M.: INFRA-M, 2003. 574 p. (In Russian)
16. *Rajzberg B.A.* Kurs upravleniya ekonomikoj [Economics management course]: ucheb. posobie. M.: Yupiter, 2003. 199 p. (In Russian)
17. *Revuckij L.D.* Potencial i stoimost predpriyatiya [The potential and value of the enterprise]. M.: Finansy i statistika, 2002. 208 p. (In Russian)

Original article submitted 15.02.2025

doi: 10.14498/tech.2025.1.3
EDN: XSFTRP

УДК 517.977.56, 519.6, 621.785

ОПТИМАЛЬНОЕ ПО КРИТЕРИЮ ОБРАЗОВАНИЯ МИНИМУМА ОКАЛИНЫ УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА СТАЛЬНЫХ ЗАГОТОВОК

Ю.Э. Плешивцева, А.В. Попов, Д.А. Дадабаева[1]

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

E-mail: yulia_pl@mail.ru, antonsam93@mail.ru, vertyankinad02@gmail.com

Аннотация. *Эффективность производственных процессов термической обработки металлических полуфабрикатов оценивается с помощью различных показателей, к которым преимущественно относятся производительность, энергопотребление, качество готовых изделий. Повышение каждого из них возможно с помощью оптимизации процесса по соответствующему интегральному критерию. Конечное качество изделия, изготовленного из сплавов с высоким содержанием железа, после завершения термообработки во многом зависит от потерь металла в окалину, которая неизбежно образуется при высокоинтенсивном нагреве в индукционной установке. В связи с этим для снижения процента выбракованных изделий необходимо найти оптимальный режим работы индуктора, минимизирующий указанные потери. Статья посвящена оптимизации процесса сквозного индукционного нагрева стальных цилиндрических заготовок перед последующими операциями пластической деформации. В качестве объекта управления с распределенными параметрами рассматривается двумерная численная модель процесса индукционного нагрева, построенная в программном пакете Altair FLUX. Сформулированы задачи управления, оптимального по критериям быстродействия, минимального энергопотребления и минимума потерь металла в окалину. Решение сформулированных задач оптимального управления после их параметризации и редукции к задачам полубесконечной оптимизации может быть получено с помощью альтернансного метода параметрической оптимизации объектов с распределенными параметрами. В качестве примера для задачи на минимум образования окалины на основе альтернансного метода записана система трансцендентных уравнений, замкнутая относительно всех неизвестных параметров процесса нагрева, решение которой производится с помощью автоматизированной процедуры, разработанной в программном пакете MATLAB. Анализ полученных численных результатов показал, что решение данной однокритериальной задачи позволяет существенно сократить количество образующейся окалины при существенном увеличении времени процесса по сравнению*

© Автор(ы), 2025

[1] *Юлия Эдгаровна Плешивцева, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры управления и системного анализа теплоэнергетических и социотехнических комплексов.*
Антон Валерьевич Попов, кандидат технических наук, доцент кафедры управления и системного анализа теплоэнергетических и социотехнических комплексов.
Дарья Александровна Дадабаева, студент кафедры управления и системного анализа теплоэнергетических и социотехнических комплексов.

с задачами быстродействия и минимального энергопотребления, поэтому для одновременного учета нескольких типовых показателей качества на следующих этапах исследования планируется перейти к решению многокритериальной задачи.

Ключевые слова: *индукционный нагрев, оптимальное управление, альтернансный метод, минимум окалинообразования, численная модель, Altair FLUX, MATLAB.*

Введение

В настоящее время технология индукционного нагрева (ИН) активно развивается и находит применение в различных областях промышленности и энергетики. В частности, в машиностроении эта технология используется для поверхностного упрочнения и плавки деталей, а также для предварительного нагрева перед последующими операциями пластической деформации. Кроме того, ИН может заменить традиционный электронагрев при паровом риформинге в процессах производства водорода, переработки отходов и в различных других промышленных технологиях. Популярность технологии ИН обусловлена ее важными преимуществами перед другими традиционными методами термической обработки, к которым прежде всего относятся энергоэффективность, скорость, точность регулирования конечной температуры при термообработке деталей, возможность автоматизации процесса, экологичность, безопасность и многие другие существенные факторы, облегчающие использование ИН.

В условиях высокой конкуренции и постоянно повышающихся требований к эффективности производственных процессов актуальными задачами в промышленности на сегодняшний день становятся повышение качества изделий, увеличение производительности и снижение издержек. Решение этих задач применительно к процессам индукционного нагрева связано с оптимизацией конструкции применяемых установок или режимов их работы по соответствующим критериям качества. Типовыми критериями, влияющими на производительность процессов термообработки металла, являются быстродействие и минимум энергопотребления. Кроме этого, в [1, 2] показано, что при высокотемпературной обработке стальных заготовок одним из параметров, существенно влияющим на качество готового изделия, является количество образующейся в процессе нагрева окалины. Поэтому для общего повышения эффективности термической обработки стальных полуфабрикатов перед операциями пластической деформации необходимо применять режимы работы индукционного нагревателя, которые являются оптимальными по критериям максимального быстродействия, минимального потребления энергии и минимального образования окалины.

В статье формулируются задачи оптимизации процесса ИН стальных заготовок по указанным критериям качества. Показывается, как задача минимизации количества образования окалины решается с помощью альтернансного метода параметрической оптимизации систем с распределенными параметрами [3]. Этот метод позволяет после редукции исходной задачи оптимального управления к задаче математического программирования свести ее к решению системы трансцендентных уравнений, замкнутой относительно всех искомых параметров процесса ИН. Данная система уравнений решается с помощью специализированной процедуры, построенной в программном пакете MATLAB [4]. Температурные распределения для решения системы уравнений рассчитываются с помощью численной двумерной модели процесса ИН, разработанной в конечно-элементном пакете Altair FLUX.

Постановка задачи оптимального управления

Процесс ИН стальных цилиндрических заготовок, рассматриваемый в работе в качестве объекта управления с распределенными параметрами (ОРП), описывается взаимосвязанной системой нелинейных уравнений Максвелла и Фурье для электромагнитных и температурных полей [5]:

$$\operatorname{rot}\bar{H} = \sigma(T)\bar{E}, \tag{1}$$

$$\operatorname{rot}\bar{E} = -\frac{\partial \bar{B}}{\partial t}, \tag{2}$$

$$\operatorname{div}\bar{B} = 0, \tag{3}$$

$$\operatorname{div}\bar{E} = 0, \tag{4}$$

$$c(T)\gamma(T)\frac{\partial T(r,l,t)}{\partial t} = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(\lambda(T) r \frac{\partial T(r,l,t)}{\partial r}\right) + \frac{\partial}{\partial l}\left(\lambda(T)\frac{\partial T(r,l,t)}{\partial l}\right) + \frac{1}{\sigma(T)}\left(\frac{\partial H(r,l,t)}{\partial r}\right)^2, \tag{5}$$

с начальными и граничными условиями:

$$T(r,l,t) = T(r,l,0) = T_0(r,l) = T_0 = \text{const},\ l \in [0;L],\ r \in [0;R], \tag{6}$$

$$\frac{\partial H(0,l,t)}{\partial r} = 0;\ H(R,l,t) = H_L;\ H(r,0,t) = H_{R1};\ H(r,L,t) = H_{R2}; \tag{7}$$

$$\frac{\partial T(0,l,t)}{\partial r} = 0;\ \lambda(T)\frac{\partial T(R,l,t)}{\partial r} = \alpha(T)\left(T(R,l,t) - T_a\right); \tag{8}$$

$$\lambda(T)\frac{\partial T(r,0,t)}{\partial l} = \alpha(T)\left(T(r,0,t) - T_a\right);\ \lambda(T)\frac{\partial T(r,L,t)}{\partial l} = \alpha(T)\left(T(r,L,t) - T_a\right). \tag{9}$$

Здесь $\bar{H}$ – вектор напряженности магнитного поля; $\bar{B}$ – вектор магнитной индукции; $\bar{E}$ – вектор напряженности электрического поля; $\sigma(T)$ – электрическая проводимость; T – температура; $c(T)$, $\gamma(T)$, $\lambda(T)$ – удельная теплоемкость, плотность и коэффициент теплопроводности нагреваемого металла соответственно; t – время; $r \in [0;R]$, $l \in [0;L]$ – соответственно радиальная и продольная пространственная координаты; T_a – температура окружающей среды; $\alpha(T)$ – коэффициент теплоотдачи в окружающую среду; R – радиус и L – длина заготовки.

Состояние объекта управления с распределенными параметрами, описываемого уравнениями (1) – (5) с краевыми условиями (6) – (9), характеризуется пространственно-временным распределением температуры $T(r,l,t)$ по объему нагреваемой детали. В качестве управляющего воздействия выбирается напряжение источника питания индукционной нагревательной установки $u(t)$, на которое накладывается ограничение:

$$0 \le u(t) \le u_{max};\ t \in \left[0; t^0\right]. \tag{10}$$

Требования к конечному состоянию объекта управления формулируются с помощью задания максимальной абсолютной величины ε_0 отклонения температуры $T\left(r,l,t^0\right)$ в конце процесса нагрева при $t=t^0$ от требуемого значения T^*:

$$\max_{\substack{r\in[0,R]\\ l\in[0,L]}}\left|T\left(r,l,t^0\right)-T^*\right|\le\varepsilon_0. \tag{11}$$

В качестве критериев оптимальности рассматриваются интегральные функционалы:

$$I_1=\int_0^{t^0}dt=t^0\to\textbf{min}, \tag{12}$$

$$I_2=\int_0^{t^0}u(t)dt\to\textbf{min}. \tag{13}$$

Выражения (12) и (13) соответствует критериям максимального быстродействия и минимального потребления энергии соответственно.

Как показано в [1, 2, 6], интенсивность процесса окисления металла при высокотемпературном нагреве существенно зависит от температуры поверхности нагреваемой детали. При этом наибольшая активность образования окалины при обработке стальных заготовок наблюдается при превышении некоторой характерной температуры T_q, которая зависит от марки стали и приводится в справочной литературе. Таким образом, критерий минимума образования окалины может быть записан следующим образом:

$$I_1=\int_0^{\varphi^0}f\left(\theta_{пов}\right)d\varphi\to\textbf{min}, \tag{14}$$

где кусочно-непрерывная функция $f\left(\theta_{пов}\right)$ имеет следующий вид:

$$f\left(\theta_{пов}\right)=\begin{cases}0,\text{ если }\theta_{\text{пов}}<\theta_q\\ \left(\theta_{пов}-\theta_q\right)^{s+1},\text{ если }\theta_{\text{пов}}\ge\theta_q.\end{cases} \tag{15}$$

Следует отметить, что выражения (14) и (15) записаны для безразмерных значений температуры поверхности $\theta_{\text{пов}}$, температуры начала процесса интенсивного окалинообразования θ_q, а также времени процесса φ, переход к которым от абсолютных значений осуществляется с помощью следующих соотношений:

$$\theta\left(x,y,\varphi\right)=\frac{T\left(r,l,t\right)-T_0}{P_{max}R^2}\lambda, \tag{16}$$

$$\varphi=\frac{at}{R^2}, \tag{17}$$

где a – коэффициент температуропроводности нагреваемого металла; P_{max} – максимальная удельная мощность внутреннего тепловыделения на единицу объема нагреваемой детали.

Таким образом, в общем случае задача оптимального управления процессом ИН сводится к поиску такого закона изменения сосредоточенного управляющего воздействия $u^*(t)$, стесненного ограничением (10), который переводит ОРП, описываемый уравнениями (1) – (5) с краевыми условиями (6) – (9), из заданного

начального (6) в требуемое конечное состояние (11) с минимальным значением критерия оптимальности (12) в случае решения задачи оптимального быстродействия, (13) – для задачи минимального энергопотребления и (14) – для задачи на минимум потерь металла в окалину.

Сформулированные задачи могут быть решены с помощью альтернансного метода параметрической оптимизации систем с распределенными параметрами.

Решение задачи оптимального по критерию минимума образования окалины управления на основе альтернансного метода

Поскольку в [5, 7, 8] подробно описана методика решения задач оптимального управления по критериям быстродействия и минимума энергопотребления на базе альтернансного метода, далее будет подробно рассмотрено решение задачи оптимального по критерию минимума окалинообразования управления. Ограничимся заданием требуемых температурных кондиций (11) только для поперечного сечения заготовки при $l = \frac{L}{2}$, считая неравномерность температурного распределения по длине заготовки несущественной.

Согласно теории оптимального управления системами с распределенными параметрами [9], общее время процесса нагрева t^0 в задаче минимизации окалины считается заранее известным. Отсюда очевидно, что для достижения минимально возможного количества окалины температура поверхности заготовки $\theta_{\text{пов}}$ должна, с одной стороны, как можно меньше отклоняться от температуры начала интенсивного окалинообразования θ_q, а с другой – обеспечивать достижение требуемых температурных кондиций (11) в конечный момент времени. Интервалы нагрева детали с максимально допустимым значением напряжения $u(t) = u_{\max}$, применяемые в оптимальных по быстродействию и энергопотреблению режимах, не удовлетворяют указанным условиям, поэтому закон изменения управляющего воздействия должен иметь отличный от типового релейного характера вид.

В [2, 5] показано, что в случае, когда требуемая температура в конце процесса индукционного нагрева θ^* превышает θ_q, минимальные потери металла в окалину достигаются при изменении температуры поверхности по экспоненциальному закону:

$$\theta_{пов}(\varphi) = Ae^{B\varphi} + \theta_q, \tag{18}$$

где A – определяемая начальной температурой константа ($A > 0$); B – определяемая известными параметрами модели константа ($B > 0$).

Согласно теории оптимального управления системами с распределенными параметрами, оптимальное по критерию быстродействия (12) и минимума энергопотребления (13) управление $u^*(t)$ процессом индукционного нагрева представляет собой релейную функцию, то есть кусочно-постоянную функцию времени, попеременно принимающую свои предельно допустимые, согласно ограничению (10), значения.

Ввиду ряда условий, подробно описанных в [5], обеспечить изменение температуры поверхности по закону (18) в течение всего процесса нагрева, используя типовые релейные алгоритмы управления, невозможно. Однако достаточно

изменить управляющее воздействие не на всем интервале $t \in \left[0; t^0\right]$, а лишь на так называемом особом участке, на котором температура поверхности превышает температуру интенсивного окалинообразования. При этом нагрев детали до $\theta_{пов} = A + \theta_q$ на первом интервале управления осуществляется при максимально допустимом значении управляющего воздействия, как и в случае задачи оптимального быстродействия. Таким образом, алгоритм управления в рассматриваемой задаче при заранее известном времени t^0 представляет собой кусочно-непрерывную функцию следующего вида:

$$u^*(t) = \begin{cases} u_{\max}, 0 \le t < t_н; \\ u_{ос}(t), t_н \le t \le t_к; \\ 0, \ t_к \le t \le t^0, \end{cases} \tag{19}$$

где $u_{ос}(t)$ – управление на особом участке $\left[t_н; t_к\right]$.

Наличие в программе управления особого участка значительно усложняет задачу поиска оптимального по окалинообразованию управления. В [5] показано, что выражение для функции $u_{ос}(t)$, которое выводится на основе закона (18), зависит от ряда коэффициентов, рассчитываемых на базе аналитической модели процесса. При этом анализ результатов решения задачи с использованием аналитической модели показывает, что экспонента на особом участке управляющего воздействия возрастает медленно и может быть аппроксимирована прямой без существенной потери точности. Поэтому с целью упрощения оптимизационной процедуры целесообразно рассмотреть алгоритм управления с заданным постоянным напряжением на особом участке $u_{ос} = \text{const}$, $u_{ос} < u_{\max}$. Таким образом, при известных значениях $u_{\max}$, $u_{ос}$, t^0 управляющее воздействие $u^*(t)$ оказывается параметризованным, т. е. заданным с точностью до значения параметров $t_н$, $t_к$, и тем самым исходная задача оптимального управления редуцируется к задаче математического программирования (ЗМП). Полученная ЗМП на минимум функционала качества (14) в условиях ограничений вида (11) принимает вид:

$$\begin{cases} I = \int\limits_0^{\varphi^0} f\left(\theta_{пов}\left(t_н, t_к\right)\right) d\varphi \to \underset{t_н, t_к}{\mathbf{min}}, \\ \underset{\substack{r \in [0, R] \\ l = L/2}}{\mathbf{max}} \left| T\left(r, l, t_н, t_к\right) - T^* \right| \le \varepsilon^{(2)}_{min}. \end{cases} \tag{20}$$

Согласно альтернансному методу, число N оптимизируемых параметров алгоритма управления в ЗМП (20) однозначным образом связано с предельно достижимым значением точности нагрева $\varepsilon^{(N)}_{\mathbf{min}}$ в классе рассматриваемых управляющих воздействий. Согласно (19), оптимизируемыми параметрами являются $t_н$, $t_к$, т. е. $N = 2$, а точность нагрева $\varepsilon^{(2)}_{\mathbf{min}}$ представляет минимально возможное, достижимое в классе двухпараметрических управлений отклонение температуры от требуемого значения, оцениваемое в равномерной метрике.

Согласно теории альтернансного метода, результирующее температурное распределение по центральному сечению заготовки в конце оптимального процесса имеет $N+1=3$ точки с максимальным отклонением температуры от требуемого значения, равным $\varepsilon^{(2)}_{\mathbf{min}}$ (рис. 1). Очевидно, что второй экстремум по

температуре достигается в некоторой внутренней точке радиального сечения, координата которой является дополнительной неизвестной, для отыскания которой можно использовать необходимые условия существования экстремума. Таким образом, зная форму температурной кривой (см. рис. 1), можно сформировать систему уравнений, которая оказывается замкнутой относительно всех неизвестных процесса, к которым относятся $t_{\text{н}}$, $t_{\text{к}}$, r_1^0, $\varepsilon_{\min}^{(2)}$:

$$\begin{cases} T\left(0,t_н,t_к\right)-T^*=-\varepsilon_{\min}^{(2)}; \\ T\left(r_1^0,t_н,t_к\right)-T^*=\varepsilon_{\min}^{(2)}; \\ T\left(R,t_н,t_к\right)-T^*=-\varepsilon_{\min}^{(2)}; \\ \dfrac{\partial\left(T\left(r_1^0,t_н,t_к\right)-T^*\right)}{\partial r}=0. \end{cases} \qquad (21)$$

При решении полученной системы уравнений (21) значения температуры $T\left(r,t\right)$ рассчитываются с помощью численной модели, разработанной в программном пакете Altair FLUX. Решение подобной сложной нелинейной системы возможно только численными методами с помощью специализированных программных пакетов. В работе для этих целей используется подробно описанная в [10–12] процедура оптимизации, разработанная в пакете MATLAB.

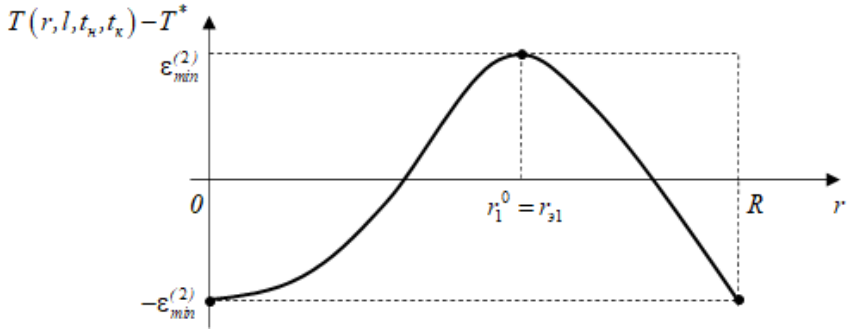


Рис. 1. Форма конечного температурного распределения по центральному сечению для предельно достижимой точности $\varepsilon_{\min}^{(2)}$

Результаты решения задачи оптимального по критерию минимума потерь металла в окалину управления

В качестве модели объекта управления в работе рассматривается численная двумерная модель индукционного нагрева, построенная в пакете Altair FLUX [13], верифицированная на основе экспериментальных данных, полученных на лабораторной нагревательной индукционной установке. Исходные данные для построения модели приведены в табл. 1.

Вид модели со сгенерированной конечно-элементной сеткой показан на рис. 2. Валидация разработанной модели путем сравнения результатов моделирования с экспериментальными данными приведена в [10].

Как было показано ранее, напряжение особого участка управляющего воздействия считается постоянным и принимается равным $u_{\text{ос}}=260\,\text{В}$ из условия изменения температуры поверхности по закону вида (18) при $u_{\max}=300\,\text{В}$,

$t^0 = 451$ с. Разработанная модель электромагнитного и температурного полей в процессе ИН была интегрирована в автоматизированную процедуру оптимизации в пакете MATLAB, реализующую решение системы (21).

Таблица 1

Исходные данные для построения модели

Параметр	Значение
Частота питающего тока, Гц	125 000
Требуемая температура заготовки, °С	1 200
Температура окружающей среды, °С	25
Начальная температура заготовки, °С	25
Количество витков индуктора	5
Радиус заготовки, м	0.05
Длина заготовки, м	0.095
Расстояние между индуктором и заготовкой, м	0.005
Расстояние между витками индуктора, м	0.005
Геометрические размеры витка индуктора, м	0.006×0.012
Конвективный коэффициент теплоотдачи, Вт/м^2×гр	2
Коэффициент теплообмена излучением, Вт/м^2×гр	0,85
Максимальное напряжение источника питания, В	300
Материал заготовки	Сталь (С40) [14]

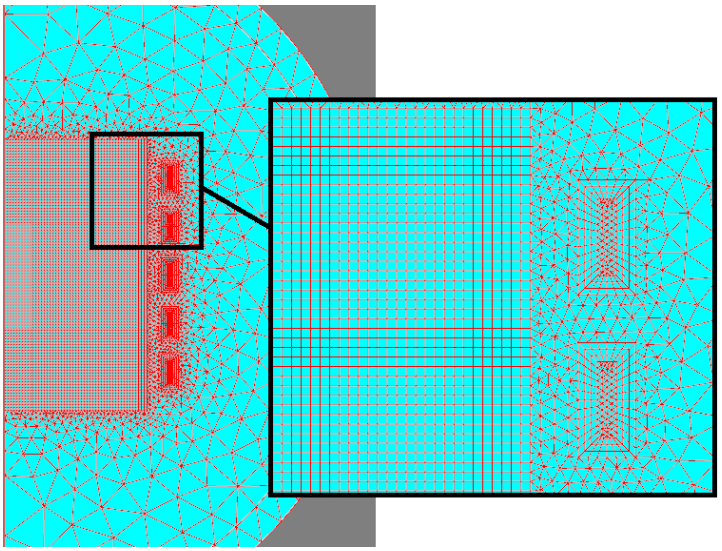


Рис. 2. Геометрия FLUX-модели со сгенерированной сеткой

В результате расчетов получены значения оптимальных параметров процесса, представленные в табл. 2. Оптимальный алгоритм управления, а также результирующее температурное распределение по радиальному сечению заготовки показаны на рис. 3.

Для анализа полученных результатов с помощью автоматизированной процедуры оптимизации были решены задачи оптимального по критериям быстродействия и минимума энергопотребления управления. Из теории альтернансного метода известно, что для предельной точности нагрева в классе задач с двумя

оптимизируемыми параметрами алгоритмы управления оптимальные по быстродействию и энергопотреблению совпадают и формируют универсально-оптимальный алгоритм.

Таблица 2

Результаты решения задачи на минимум потерь металла в окалину

Параметр	$t_н$, с	$t_к$, с	$\varepsilon_{\min}^{(2)}$, °С	I
Значение	70	432	26	$8.3 \cdot 10^{-6}$

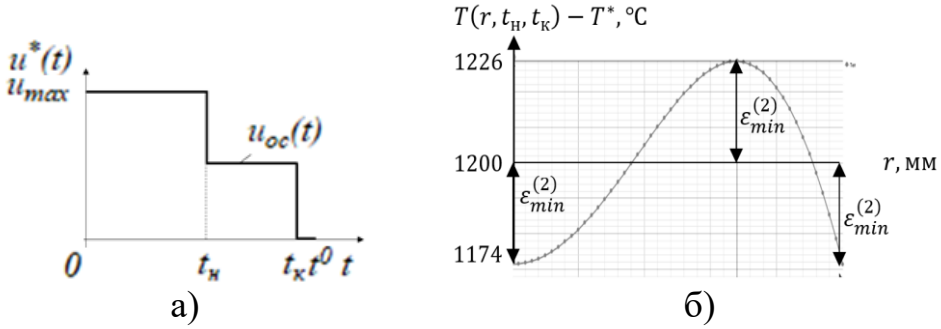


Рис. 3. Результаты решения задачи минимизации окалинообразования:
а – алгоритм управления; *б* – радиальное температурное распределение

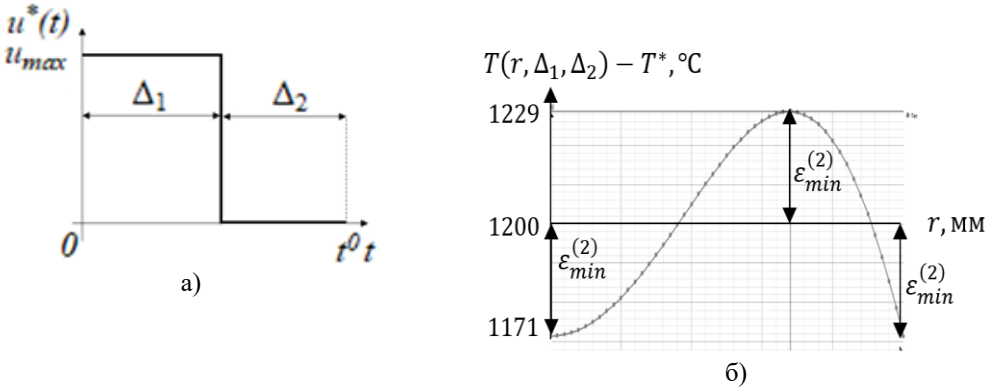
В табл. 3 представлены результаты решения задачи оптимального управления по критериям быстродействия и минимального потребления энергии при $u_{\max} = 300$ В. В данном случае, как показано в [5], оптимизируемыми параметрами являются длительности интервала нагрева и выравнивания температуры Δ_1 и Δ_2. Оптимальный алгоритм управления, а также результирующее температурное распределение по радиальному сечению заготовки показаны на рис. 4.

Таблица 3

Результаты решения задач оптимального быстродействия и энергопотребления

Параметр	Δ_1, с	Δ_2, с	$\varepsilon_{\min}^{(2)}$, °С	I
Значение	316	26	29	$9.1*10^{-6}$

Анализ полученных результатов однозначно показывает, что использование алгоритма управления, оптимального по критерию минимума образования окалины, позволяет сократить на 10 % количество окисленного металла по сравнению с типовым универсально-оптимальным по критериям быстродействия и энергопотребления алгоритмом. При этом очевидно, что общее время, затраченное на нагрев, существенно выше, чем в задачах оптимального быстродействия и минимального энергопотребления. Максимальное отклонение от требуемого значения температуры по радиальному сечению заготовки в обоих случаях оказывается меньше 30 °С, что удовлетворяет требованиям производственных процессов термической обработки стали.



а) б)

Рис. 4. Результаты решения задачи оптимального быстродействия и минимума энергопотребления: *а* – алгоритм управления; *б* – радиальное температурное распределение

Заключение

В работе сформулирована задача оптимального управления процессом периодического индукционного нагрева стальных цилиндрических заготовок перед последующими операциями пластической деформации по критериям быстродействия, минимального энергопотребления и минимума потерь металла в окалину. Подробно рассмотрена методика решения задачи минимизации окалины на базе альтернансного метода. Сформулированные задачи были решены с помощью специализированной оптимизационной процедуры, построенной в пакете MATLAB с интегрированной численной моделью процесса, разработанной в Altair FLUX. Проведено сравнение результатов решения задачи оптимального управления по критерию минимума окалинообразования с результатами решения задач быстродействия и энергопотребления. Применение алгоритма управления, оптимального по критерию минимального окисления, позволяет сократить на 10 % потери металла в окалину по сравнению с алгоритмом оптимальным по критериям быстродействия и энергопотребления. На следующем этапе исследований планируется сформулировать и решить многокритериальную задачу оптимального управления процессом ИН относительно всех рассмотренных в работе типовых критериев.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Ващенко А.И., Зеньковский А.Г., Лифшиц А.Е. и др.* Окисление и обезуглероживание стали. М.: Металлургия, 1972. 336 с.
2. *Малый С.А.* Экономичный нагрев металла. М.: Металлургия, 1967. 191 с.
3. *Рапопорт Э.Я.* Альтернансный метод в прикладных задачах оптимизации. М.: Наука, 2000. 336 с. ISBN: 5-02-013069-9. EDN: TTRVMB
4. MATLAB Documentation [Электронный ресурс]. URL: https://www.mathworks.com/help/matlab/ (дата обращения: 01.04.2025).
5. *Рапопорт Э.Я., Плешивцева Ю.Э.* Оптимальное управление температурными режимами индукционного нагрева. М.: Наука, 2012. 309 с. ISBN: 978-5-02-037501-7. EDN: QNDGWJ
6. *Северденко В.П., Макушок Е.М., Раввин А.Н.* Окалина при горячей обработке металлов давлением. М.: Металлургия, 1977. 208 с.
7. *Рапопорт Э.Я.* Оптимизация процессов индукционного нагрева металла. М.: Металлургия, 1993. 279 с.
8. *Плешивцева Ю.Э., Попов А.В., Дьяконов А.И.* Двумерная задача оптимального по типовым критериям качества управления процессом сквозного индукционного нагрева // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. 2014. № 2 (42). С. 148–163. EDN: TFLHDT

9. *Рапопорт Э.Я.* Оптимальное управление системами с распределенными параметрами. М.: Высшая школа, 2009. 678 с. ISBN: 978-5-06-006054-6. EDN: QMTFRZ
10. *Попов А.В.* Оптимальное проектирование и управление режимами индукционного нагрева в процессе поверхностной закалки: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Самара, 2020. 24 с. EDN: WNMWOX
11. *Попов А.В., Плешивцева Ю.Э.* Программный комплекс для оптимизации процесса поверхностной закалки стальных заготовок // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. 2021. Т. 29. № 2. С. 129–144. DOI: 10.14498/tech.2021.9. EDN: BLOVES
12. *Pleshivtseva Yu., Rogachev G., Popov A.* MATLAB-FLUX Coupling for numerical modeling in education // SHS Web of Conferences. 2016. Vol. 29. P. 02033. DOI: 10.1051/shsconf/20162902033. EDN: WHEUKL
13. Flux [Электронный ресурс]. URL: www.altair.com/flux/ (дата обращения: 01.04.2025).
14. Ковка и штамповка: Справочник. В 4-х т. Т. 1. Материалы и нагрев. Оборудование. Ковка. Под ред. Е.И. Семенова. М.: Машиностроение, 1985. 568 с.

Статья поступила в редакцию 05.05.2025

doi: 10.14498/tech.2025.1.3

OPTIMAL CONTROL OF INDUCTION HEATING OF STEEL WORKPIECES WITH RESPECT TO MINIMAL SCALE FORMATION CRITERIA

***Yu.E. Pleshivtseva, A.V. Popov, D.A. Dadabaeva*[1]**

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

E-mail: yulia_pl@mail.ru, antonsam93@mail.ru, vertyankinad02@gmail.com

Abstract. *Efficiency of heat treatment production processes of metals is measured by different characteristics, including productivity, energy consumption and quality of end product. Increasing each of them is possible through optimization with respect to corresponding integral criteria. The quality of end product, which is made of high iron alloys, after heat treatment operations depends on metal loss to scale, that is inevitably formed during high-intensity heating in induction installation. Thus, to reduce the amount of defective details it is necessary to obtain the optimal operating mode of inductor, which will minimize the mentioned losses. The paper is devoted to optimization of static induction heating of steel cylindrical billets before the subsequent plastic deformation operations. The 2D numerical mathematical model of induction heating process, developed in Altair FLUX, is considered as a control object with distributed parameters. The optimal control problems with respect to time-optimal, minimal energy consumption and minimal scale formation criteria are formulated. The solution of formulated problems after their parametrization and reduction to semi-infinite optimization problems can be carried out using alternance method of parametric optimization of objects with distributed parameters. As an example for minimal scale formation problem, the system of transcendental equations closed with respect to all unknowns of the heating process is written based on alternance method. Solving of the system is provided by automatized procedure, which is developed in program package MATLAB. The analysis of numerical results shows that solving this one-criteria optimal control problem allows to reduce the amount of scale with significant increasing of heating time in comparison with time-optimal and minimal energy consumption problems. That is why on the next stages of the investigation it is planned to solve a multi-criteria optimization problem in order to take onto account several typical goal functions simultaneously.*

Keywords: *induction heating, optimal control, alternance method, minimum scale formation, numerical model, Altair FLUX, MATLAB.*

© The Author(s), 2025

[1] *Yuliya E. Pleshivtseva (Dr. Sci. (Techn.)), Professor, Dept. of Management and System Analysis of Thermal Power and Sociotechnical Complexes.*
Anton V. Popov (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor, Dept. of Management and System Analysis of Thermal Power and Sociotechnical Complexes.
Darya A. Dadabaeva, Student, Dept. of Management and System Analysis of Thermal Power and Sociotechnical Complexes.

REFERENCES

1. *Vashchenko A.I., Zenkovskij A.G., Lifshic A.E. i dr.* Okislenie i obezuglerozhivanie stali [Oxidation and decarbonization of steel]. M.: Metallurgiya, 1972. 336 p. (In Russian)
2. *Malyj S.A.* Ekonomichnyj nagrev metalla [Economical metal heating]. M.: Metallurgiya, 1967. 191 p. (In Russian)
3. *Rapoport E.Ya*. Alternansnyj metod v prikladnyh zadachah optimizacii [Alternance method in applied optimization problems]. M.: Nauka, 2000. 336 p. (In Russian)
4. MATLAB Documentation [electronic source]. URL: https://www.mathworks.com/help/matlab/ (data obrashcheniya: 01.04.2025).
5. *Rapoport E.Ya., Pleshivceva Yu.E.* Optimalnoe upravlenie temperaturnymi rezhimami indukcionnogo nagreva [Optimal control of induction heating processes]. M.: Nauka, 2012. 309 p. (In Russian)
6. *Severdenko V.P., Makushok E.M., Ravvin A.N.* Okalina pri goryachej obrabotke metallov davleniem [Scale during hot metal pressure treatment]. M.: Metallurgiya, 1977. 208 p. (In Russian)
7. *Rapoport E.Ya.* Optimizaciya processov indukcionnogo nagreva metalla [Optimization of induction heating processes]. M.: Metallurgiya, 1993. 279 p. (In Russian)
8. *Pleshivceva Yu.E., Popov A.V., Dyakonov A.I.* Dvumernaya zadacha optimal'nogo po ti-povym kriteriyam kachestva upravleniya processom skvoznogo indukcionnogo nagreva [Two-dimensional problem of optimal with respect to typical quality criteria control of through induction heating processes] // Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Ser. Tekhnicheskie nauki. 2014. No. 2 (42). Pp. 148–163. (In Russian)
9. *Rapoport E.Ya.* Optimalnoe upravlenie sistemami s raspredelennymi parametrami [Optimal control of systems with distributed parameters]. M.: Vysshaya shkola, 2009. 678 p. (In Russian)
10. *Popov A.V.* Optimal'noe proektirovanie i upravlenie rezhimami indukcionnogo nagreva v processe poverhnostnoj zakalki [Optimal design and control of induction heating modes during surface quenching]: Avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk. Samara, 2020. 24 p. (In Russian)
11. *Popov A.V., Pleshivceva Yu.E.* Programmnyj kompleks dlya optimizacii processa poverhnostnoj zakalki stal'nyh zagotovok [Software package for optimizing the process of surface hardening of steel billets] // Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Ser. Tekhnicheskie nauki. 2021. V. 29. No. 2. Pp. 129–144. (In Russian)
12. *Pleshivtseva Yu., Rogachev G., Popov A.* MATLAB-FLUX Coupling for numerical modeling in education // SHS Web of Conferences. 2016. Vol. 29. Pp. 02033. DOI: 10.1051/shsconf/20162902033. EDN: WHEUKL
13. Flux [electronic source]. URL: www.altair.com/flux/ (дата обращения: 01.04.2025).
14. Kovka i shtampovka [Forging and stamping]: Spravochnik. V 4-h t. V. 1. Materialy i nagrev. Oborudovanie. Kovka. Pod red. *E.I. Semenova.* M.: Mashinostroenie, 1985. 568 p. (In Russian)

Original article submitted 05.05.2025

doi: 10.14498/tech.2025.1.4
EDN: GSYVRT

УДК 62-52

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТИЧЕСКОГО РЕЖИМА РАБОТЫ ЗОНЫ ОХЛАЖДЕНИЯ КЕРАМИЧЕСКОГО КИРПИЧА В ТУННЕЛЬНОЙ ПЕЧИ С РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ПОДАЧЕЙ ОХЛАЖДАЮЩЕГО АГЕНТА

***М.А. Назаров, А.А. Заварзин*[1]**

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

E-mail: nazarovm86@yandex.ru, andrew163ru@mail.ru

Аннотация. *Выполнен анализ технологического процесса охлаждения керамического кирпича в туннельной печи как объекта управления с распределенными по продольной координате параметрами. Выявлено, что рассматриваемый процесс оказывает существенное влияние на прочность готового кирпича, при этом исследования в области разработки эффективных методов и средств управления этим этапом практически отсутствуют. В ходе работы были определены: вектор выходных координат, включающий температуры кирпича и охлаждающего воздуха и их градиенты по продольной координате печи; вектор управляющих воздействий, состоящий из расходов подаваемого охлаждающего воздуха и отбираемого воздуха; вектор возмущающих воздействий – температуры кирпича на входе в зону охлаждения, воздуха, подаваемого в зону охлаждения, и окружающей среды. Разработана расчетная схема процесса снижения температуры керамического кирпича с учетом произвольного количества точек подачи и отбора воздуха в зону охлаждения, что определяет количество и размеры ее участков. С учетом принятых допущений и упрощений выполнено математическое описание статического режима работы зоны охлаждения с распределенными подачей и отбором охлаждающего агента в виде системы неоднородных дифференциальных уравнений с соответствующими граничными условиями, которое проблемно ориентировано на синтез систем автоматического управления. Решение этой системы позволило определить математические операторы, связывающие выходные координаты с управляющими и основными возмущающими воздействиями. В дальнейшем результаты работы могут быть использованы для создания эффективных систем управления процессом охлаждения кирпича, которые позволят повысить качество продукции и снизить энергетические затраты на производство.*

Ключевые слова: *керамический кирпич, туннельная печь, зона охлаждения, математическая модель, объект управления с распределенными параметрами.*

Введение

Керамический кирпич благодаря своим свойствам является одним из самых распространенных конструкционных строительных материалов. Его показатели

© Автор(ы), 2025

[1] *Максим Александрович Назаров, кандидат технических наук, доцент кафедры механизации, автоматизации и энергоснабжения строительства.*
Андрей Александрович Заварзин, инженер кафедры механизации, автоматизации и энергоснабжения строительства.

качества в значительной степени закладываются на последнем из основных этапов технологического процесса, а именно при обжиге, который чаще всего осуществляется в туннельной печи. При этом туннельная печь делится на три зоны: предварительного нагрева, собственно обжига и охлаждения [1–3].

В зоне охлаждения крайне важно придерживаться установленного технологическим регламентом температурного режима, так как его нарушение может вызвать образование трещин, а вследствие появления остаточного напряжения в теле кирпича происходит уменьшение прочности конечного продукта [4–7]. Тепловой режим обычно задается в виде температурной кривой, показывающей желаемый характер изменения температуры кирпича по продольной координате печи [1]. Очевидно, что основной задачей управления рассматриваемым процессом является получение кривой охлаждения, которая будет находиться в пределах допустимого диапазона отклонений температур. Вид этой характеристики зависит от множества технологических факторов. Создание математической модели, связывающей управляющие и возмущающие воздействия процесса охлаждения кирпича с температурами, определяющими кривую охлаждения, является важным вопросом [8–10]. Ее решение позволит не только адекватно подобрать оборудование для обеспечения требуемых режимов работы, но и при решении обратной задачи по заданной температурной кривой сформировать вектор управляющих воздействий в каналах системы автоматизации туннельной печи. Однако в настоящее время исследования по данной тематике практически отсутствуют. Поэтому математическое описание процесса охлаждения керамического кирпича в туннельной печи как объекта управления является актуальной задачей, чему и посвящена настоящая статья.

Постановка задачи

Проведем анализ технологического процесса охлаждения керамического кирпича в туннельной печи как объекта управления. Туннельная печь представляет собой длинный канал 1, по которому движутся вагонетки 2 с кирпичом 3 (рис. 1). Изделия на вагонетке проходят от одного до другого конца канала, последовательно подвергаясь предварительному подогреву, обжигу и охлаждению в соответствующих зонах. В зону охлаждения кирпич попадает после зоны обжига, при этом охлаждающий агент (воздух) движется ему навстречу со стороны выхода изделий из печи, то есть рассматриваемая зона работает по принципу противотока. В дальнейшем будем считать, что в общем случае охлаждающий воздух подается в n точках, распределенных по длине зоны охлаждения, что делит ее на n участков. При этом в конце каждого участка присутствует также отбор воздуха, нагретого в процессе охлаждения кирпича. Такая распределенная подача и отбор охлаждающего агента открывают дополнительные возможности с точки зрения повышения гибкости и показателей качества управления процессом.

На основании анализа технологии выделим объект управления, под которым будем понимать процесс охлаждения керамического кирпича в туннельной печи с распределенными по длине подачей и отбором охлаждающего агента.

Температурная кривая на этапе охлаждения определяется температурами $\partial T_{ki}(x_i,t)$ кирпича и характеризуется градиентами $\dfrac{\partial T_{ki}(x_i,t)}{\partial x_i}$ в произвольном сечении i-го участка зоны охлаждения ($i \in 0, 1 \ldots n$). Однако техническая возможность отслеживания данных параметров в печи отсутствует, поэтому контроль

осуществляется косвенным методом, а именно по температурам $\partial T_{вi}(x_i,t)$ воздуха, а также градиентам $\dfrac{\partial T_{вi}(x_i,t)}{\partial x_i}$. Тогда можем считать, что рассматриваемый этап в необходимой для контроля соблюдения технологических требований степени характеризуется вектором выходных координат

$$\mathbf{Y}(x_1,x_2,...,x_{n-1},x_n,t)=\left[\mathbf{Y}_1(x_1,t)\quad \mathbf{Y}_2(x_2,t)\quad ...\quad \mathbf{Y}_{n-1}(x_{n-1},t)\quad \mathbf{Y}_n(x_n,t)\right]^T,$$

где

$$\mathbf{Y}_i(x_i,t)=\left[T_{кi}(x_i,t)\quad T_{вi}(x_i,t)\quad \frac{\partial T_{кi}(x_i,t)}{\partial x_i}\quad \frac{\partial T_{вi}(x_i,t)}{\partial x_i}\right]^T;$$

T – знак транспонирования.

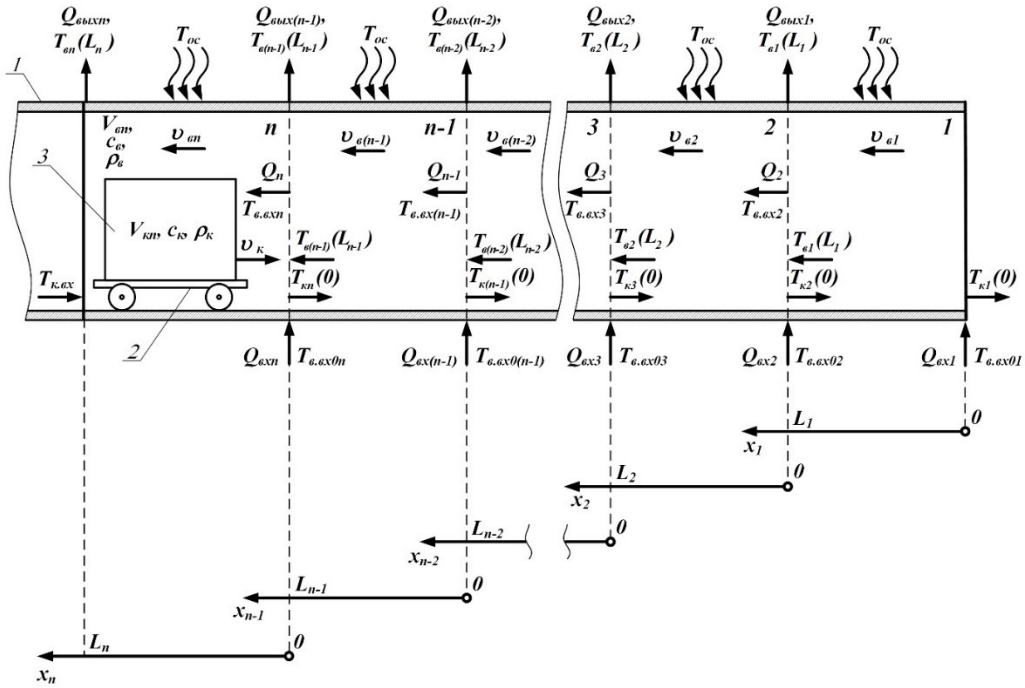


Рис. 1. Расчетная схема зоны охлаждения с распределенными подачей и отборами воздуха как объекта управления

Считаем, что зона охлаждения оборудована n исполнительными устройствами, позволяющими регулировать расходы $Q_{вхi}(t)$ подаваемого охлаждающего воздуха, и n исполнительными устройствами, определяющими расходы $Q_{выхi}(t)$ отбираемого воздуха. Эти параметры формируют вектор управляющих воздействий

$$\mathbf{U}(t)=\left[Q_{вх1}(t)\,Q_{вх2}(t)\,...\,Q_{вх(n-1)}(t)\,Q_{вхn}(t)\,Q_{вых1}(t)\,Q_{вых2}(t)\,...\,Q_{вых(n-1)}(t)\,Q_{выхn}(t)\right]^T.$$

Стоит отметить, что в качестве исполнительных устройств могут использоваться дутьевые вентиляторы или регулируемые клапаны.

Очевидно, что условия реального производства подразумевают наличие внешних факторов, которые нежелательным образом воздействуют на объект управления и приводят к отклонению выходных координат от требуемых значе-

ний. Известно, что при осуществлении обжига керамических стеновых материалов наблюдается вариация температуры $T_{к.вх}(t)$ кирпича на входе в зону охлаждения, температуры $T_{в.вх0i}(t)$ воздуха, подаваемого в зону охлаждения, и температуры $T_{ос}(t)$ окружающей среды, что существенно влияет на протекание технологического процесса, чем нельзя пренебречь. Поэтому перечисленные факторы составляют вектор возмущающих воздействий

$$\mathbf{H}(t)=\left[T_{к.вх}(t)\ \ T_{в.вх0i}(t)\ \ T_{ос}(t)\right]^T .$$

В данной работе ограничимся рассмотрением только лишь установившегося режима работы установки (то есть при $t \to \infty$), чего достаточно для построения участка температурной кривой, соответствующего этапу охлаждения. Найдем операторы, связывающие выходные координаты с управляющими и возмущающими воздействиями.

Решение поставленной задачи

При разработке математического описания статического режима работы объекта управления необходимо учесть ряд допущений, которые позволят упростить анализ без существенного снижения точности моделирования. Рассмотрим следующие предположения:

1) считаем, что конструкция рассматриваемой печи обеспечивает сосредоточенную в пространстве подачу охлаждающего воздуха в начале каждого участка зоны охлаждения (то есть в точках $x_i = 0$) и сосредоточенный отбор в конце каждого участка (при $x_i = L_i$);

2) допускаем, что температуры кирпича и охлаждающего воздуха имеют одинаковые значения во всех точках поперечного сечения при фиксированном значении координаты x_i, т. е. достаточно наблюдать изменение параметров только вдоль осей x_i;

3) считаем, что плотности $\rho_к$ и $\rho_в$ и удельные теплоемкости $c_к$ и $c_в$ кирпича и воздуха, находящихся в зоне охлаждения, не изменяются и остаются постоянными в течение всего времени протекания процесса;

4) принимаем, что скорость $\upsilon_к$ движения вагонеток с кирпичом постоянна по всей длине туннельной печи;

5) пренебрегаем способностью вагонеток аккумулировать тепло.

Для упрощения понимания протекающих процессов и дальнейшей формализации описания статического режима работы рассматриваемой зоны туннельной печи исходя из анализа технологии производства керамического кирпича, конструкции и принципа работы установки изобразим расчетную схему процесса охлаждения (см. рис. 1). Из представленной схемы видно, что для удобства моделирования зона охлаждения разбита на *n* участков, поведение которых очевидно может быть описано собственной совокупностью математических зависимостей. При этом сформированные в *n*-м элементе переменные воздействуют на соседние участки, тем самым обусловливая единство математической модели зоны охлаждения в целом.

На основании расчетной схемы и с учетом принятых допущений статический режим процесса охлаждения керамического кирпича в туннельной печи с распределенной подачей и отбором охлаждающего агента опишем системой дифференциальных уравнений для каждого из обозначенных участков:

$$\left.\begin{aligned}
&\upsilon_к \cdot \frac{dT_{кi}(x_i)}{dx_i} - \frac{\alpha_i \cdot F_i}{V_{кi} \cdot \rho_к \cdot c_к} \cdot \left(T_{кi}(x_i) - T_{вi}(x_i)\right) = 0; \\
&-\upsilon_{вi} \cdot \frac{dT_{вi}(x_i)}{dx_i} + \frac{\alpha_i \cdot F_i}{V_{вi} \cdot \rho_в \cdot c_в} \cdot \left(T_{кi}(x_i) - T_{вi}(x_i)\right) - \frac{k_{вi} \cdot F_{вi}}{V_{вi} \cdot \rho_в \cdot c_в} \cdot \left(T_{вi}(x_i) - T_{ос}\right) = 0,
\end{aligned}\right\} \quad (1)$$

где $V_{кi}$ – объем кирпича, находящегося на i-м участке зоны охлаждения,

$$V_{кi} = V_к \cdot \frac{L_i}{\sum_{i=1}^{n} L_i};$$

$V_к$ – общий объем кирпича, находящегося в зоне охлаждения; L_i – длина i-го участка; $V_{вi}$ – объем воздуха, находящегося на i-м участке зоны охлаждения,

$$V_{вi} = F_n \cdot L_i - V_{кi};$$

$\upsilon_{вi}$ – скорость охлаждающего воздуха на i-м участке,

$$\upsilon_{вi} = \frac{\sum_{i=1}^{n} Q_i}{F_{св}};$$

$Q_{i\,i}$ – расход воздуха через i-й участок,

$$Q_i = Q_{вхi} + Q_{i-1} - Q_{вых(i-1)};$$

$F_{св}$ – площадь поперечного сечения пространства печного туннеля, свободного от кирпича; α_i – коэффициент теплоотдачи кирпича охлаждающему воздуху на i-м участке,

$$\alpha_i \approx k_{\varepsilon i} \cdot (5.3 + 3.6 \cdot k_{Ti} \cdot \upsilon_{вi});$$

$k_{\varepsilon i}$ – коэффициент, учитывающий сложную конфигурацию воздушного канала, образованного печным каналом и садкой кирпича; k_{Ti} – поправочный коэффициент, учитывающий температуру воздуха на i-м участке; F_i – эффективная площадь поверхности теплообмена между кирпичом и потоком охлаждающего воздуха на i-м участке; $k_{вi}$ – коэффициент теплопередачи между воздухом и окружающей средой через ограждающие конструкции туннельной печи,

$$k_{вi} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{вi}} + \sum_{j=1}^{r} \frac{\delta_j}{\lambda_j} + \frac{1}{\alpha_н}};$$

δ_j и λ_j – толщина и коэффициент теплопроводности материала j-го слоя ограждающей конструкции зоны охлаждения $\left(j \in 0,1,...,r\right)$; $\alpha_{вi}$ – коэффициент теплоотдачи от охлаждающего воздуха к внутреннему слою ограждающей конструкции на i-м участке [1],

$$\alpha_{вi} \approx 5.3 + 3.6 \cdot k_{Ti} \cdot \upsilon_{вi};$$

$\alpha_н$ – коэффициент теплоотдачи от внешнего слоя ограждающей конструкции к окружающей среде; $F_{вi}$ – площадь теплообмена между воздухом и окружающей средой через стены туннельной печи на i-м участке,

$$F_{вi} = F_в \cdot \frac{L_i}{\sum_{i=1}^{n} L_i};$$

$F_в$ – полная площадь теплообмена между воздухом и окружающей средой через стены туннельной печи.

Для нахождения частного решения дополним уравнения (1) системой граничных условий:

$$\left.\begin{aligned}
&T_{к1}(x_1)\big|_{x_1=L_1} = T_{к2}(x_2)\big|_{x_2=0};\\
&T_{к2}(x_2)\big|_{x_2=L_2} = T_{к3}(x_3)\big|_{x_3=0};\\
&\ldots\\
&T_{к(n-1)}(x_{n-1})\big|_{x_{n-1}=L_{n-1}} = T_{кn}(x_n)\big|_{x_n=0};\\
&T_{кn}(x_n)\big|_{x_n=L_n} = T_{к.вх};\\
&T_{в1}(x_1)\big|_{x_1=0} = T_{в.вх1};\\
&T_{в2}(x_2)\big|_{x_2=0} = T_{в.вх2};\\
&\ldots\\
&T_{в(n-1)}(x_{n-1})\big|_{x_{n-1}=0} = T_{в.вх(n-1)};\\
&T_{вn}(x_n)\big|_{x_n=0} = T_{в.вхn}.
\end{aligned}\right\} \qquad (2)$$

При этом температуры охлаждающего агента на входе в i-й участок

$$\left.\begin{aligned}
&T_{в.вх1} = T_{в.вх01};\\
&T_{в.вх2} = \gamma_{в12} \cdot T_{в1}(x_1)\big|_{x_1=L_1} + \gamma_{в22} \cdot T_{в.вх02};\\
&\ldots\\
&T_{в.вх(n-1)} = \gamma_{в1(n-1)} \cdot T_{в(n-2)}(x_{n-2})\big|_{x_{n-2}=L_{n-2}} + \gamma_{в2(n-1)} \cdot T_{в.вх0(n-1)};\\
&T_{в.вхn} = \gamma_{в1n} \cdot T_{в(n-1)}(x_{n-1})\big|_{x_{n-1}=L_{n-1}} + \gamma_{в2n} \cdot T_{в.вх0n},
\end{aligned}\right\} \qquad (3)$$

где $T_{в.вх0i}$ – температуры потоков воздуха, подаваемых исполнительными устройствами в зону охлаждения.

При этом коэффициенты, учитывающие влияние расходов подаваемого и отбираемого из зоны охлаждения воздуха, на основании уравнений энергетического баланса для каждого участка запишем в виде

$$\left.\begin{aligned}
&\gamma_{в12} = \frac{Q_1}{Q_2}, \quad \ldots, \quad \gamma_{в1(n-1)} = \frac{Q_{n-2}}{Q_{n-1}}, \quad \gamma_{в1n} = \frac{Q_{n-1}}{Q_n};\\
&\gamma_{в22} = \frac{Q_{вх2}}{Q_2}, \quad \ldots, \quad \gamma_{в2(n-1)} = \frac{Q_{вх(n-1)}}{Q_{n-1}}, \quad \gamma_{в2n} = \frac{Q_{вхn}}{Q_n}.
\end{aligned}\right\} \qquad (4)$$

Решая систему уравнений (1) относительно $T_{\kappa i}(x_i)$ и $T_{\text{в}i}(x_i)$ с учетом граничных условий, получим семейство функциональных зависимостей, отражающих пространственное распределение по координатам x_i температур кирпича и охлаждающего воздуха на каждом участке зоны охлаждения туннельной печи:

$$\left.\begin{aligned}
&T_{\kappa 1}(x_1)=\Psi_{\kappa 11}(x_1)\cdot T_{\text{в.вх}1}+\Psi_{\kappa 21}(x_1)\cdot T_{\kappa 2}(x_2)\big|_{x_2=0}+\Psi_{\kappa 31}(x_1)\cdot T_{oc};\\
&T_{\kappa 2}(x_2)=\Psi_{\kappa 12}(x_2)\cdot T_{\text{в.вх}2}+\Psi_{\kappa 22}(x_2)\cdot T_{\kappa 3}(x_3)\big|_{x_3=0}+\Psi_{\kappa 32}(x_2)\cdot T_{oc};\\
&\ldots\\
&T_{\kappa(n-1)}(x_{n-1})=\Psi_{\kappa 1(n-1)}(x_{n-1})\cdot T_{\text{в.вх}(n-1)}+\Psi_{\kappa 2(n-1)}(x_{n-1})\cdot T_{\kappa n}(x_n)\big|_{x_n=0}+\Psi_{\kappa 3(n-1)}(x_{n-1})\cdot T_{oc};\\
&T_{\kappa n}(x_n)=\Psi_{\kappa 1n}(x_n)\cdot T_{\text{в.вх}n}+\Psi_{\kappa 2n}(x_n)\cdot T_{\text{к.вх}}+\Psi_{\kappa 3n}(x_n)\cdot T_{oc};\\
&T_{\text{в}1}(x_1)=\Psi_{\text{в}11}(x_1)\cdot T_{\text{в.вх}1}+\Psi_{\text{в}21}(x_1)\cdot T_{\kappa 2}(x_2)\big|_{x_2=0}+\Psi_{\text{в}31}(x_1)\cdot T_{oc};\\
&T_{\text{в}2}(x_2)=\Psi_{\text{в}12}(x_2)\cdot T_{\text{в.вх}2}+\Psi_{\text{в}22}(x_2)\cdot T_{\kappa 3}(x_3)\big|_{x_3=0}+\Psi_{\text{в}32}(x_2)\cdot T_{oc};\\
&\ldots\\
&T_{\text{в}(n-1)}(x_{n-1})=\Psi_{\text{в}1(n-1)}(x_{n-1})\cdot T_{\text{в.вх}(n-1)}+\Psi_{\text{в}2(n-1)}(x_{n-1})\cdot T_{\kappa n}(x_n)\big|_{x_n=0}+\Psi_{\text{в}3(n-1)}(x_{n-1})\cdot T_{oc};\\
&T_{\text{в}n}(x_n)=\Psi_{\text{в}1n}(x_n)\cdot T_{\text{в.вх}n}+\Psi_{\text{в}2n}(x_n)\cdot T_{\text{к.вх}}+\Psi_{\text{в}3n}(x_n)\cdot T_{oc},
\end{aligned}\right\} \quad (5)$$

где коэффициенты, связывающие выходные координаты с управляющими воздействиями и основными возмущениями:

$$\Psi_{\kappa 1i}(x_i)=\frac{T_{\kappa i}(x_i)}{T_{\text{в.вх}i}}=$$
$$=\frac{B_{1i}\cdot\left(e^{\sigma_{\kappa 1i}\cdot L_i+\sigma_{\kappa 2i}\cdot x_i}-e^{\sigma_{\kappa 2i}\cdot L_i+\sigma_{\kappa 1i}\cdot x_i}\right)}{\left(\sigma_{\kappa 1i}-D_{1i}\right)\cdot e^{\sigma_{\kappa 2i}\cdot L_i}-\left(\sigma_{\kappa 2i}-D_{1i}\right)\cdot e^{\sigma_{\kappa 1i}\cdot L_i}}; \quad (6)$$

$$\Psi_{\kappa 2i}(x_i)=\frac{T_{\kappa i}(x_i)}{T_{\text{к.вх}i}}=\frac{e^{\sigma_{\kappa 1i}\cdot x_i}\cdot\left(D_{1i}-\sigma_{\kappa 2i}\right)-e^{\sigma_{\kappa 2i}\cdot x_i}\cdot\left(D_{1i}-\sigma_{\kappa 1i}\right)}{\left(\sigma_{\kappa 1i}-D_{1i}\right)\cdot e^{\sigma_{\kappa 2i}\cdot L_i}-\left(\sigma_{\kappa 2i}-D_{1i}\right)\cdot e^{\sigma_{\kappa 1i}\cdot L_i}}; \quad (7)$$

$$\Psi_{\kappa 3i}(x_i)=\frac{T_{\kappa 3i}(x_i)}{T_{oc}}=\Psi_{\kappa 31i}\cdot\left(1-\Psi_{\kappa 32i}\right) \quad (8)$$

$$\Psi_{\kappa 31i}=\frac{E_{\kappa 3i}}{E_{2i}}; \quad (9)$$

$$\Psi_{\kappa 32i}(x_i)=\frac{e^{\sigma_{\kappa 2i}\cdot x_i}\cdot\left(\sigma_{\kappa 1i}-D_{1i}+D_{1i}\cdot e^{\sigma_{\kappa 1i}\cdot L_i}\right)-e^{\sigma_{\kappa 1i}\cdot x_i}\cdot\left(\sigma_{\kappa 2i}-D_{1i}+D_{1i}\cdot e^{\sigma_{\kappa 2i}\cdot L_i}\right)}{\left(\sigma_{\kappa 1i}-D_{1i}\right)\cdot e^{\sigma_{\kappa 2i}\cdot L_i}-\left(\sigma_{\kappa 2i}-D_{1i}\right)\cdot e^{\sigma_{\kappa 1i}\cdot L_i}}; \quad (10)$$

$$\Psi_{в1i}(x_i)=\frac{T_{вi}(x_i)}{T_{в.вхi}}=$$

$$=\frac{e^{\sigma_{в1i}\cdot L_i+\sigma_{в2i}\cdot x_i}\cdot(D_{2i}+\sigma_{в1i})-e^{\sigma_{в2i}\cdot L_i+\sigma_{в1i}\cdot x_i}\cdot(D_{2i}+\sigma_{в2i})}{e^{\sigma_{в1i}\cdot L_i}\cdot(D_{2i}+\sigma_{в1i})-e^{\sigma_{в2i}\cdot L_i}\cdot(D_{2i}+\sigma_{в2i})};\qquad(11)$$

$$\Psi_{в2i}(x_i)=\frac{T_{вi}(x_i)}{T_{к.вхi}}=\frac{B_{2i}\cdot\left(e^{\sigma_{в1i}\cdot x_i}-e^{\sigma_{в2i}\cdot x_i}\right)}{e^{\sigma_{в1i}\cdot L_i}\cdot(D_{2i}+\sigma_{в1i})-e^{\sigma_{в2i}\cdot L_i}\cdot(D_{2i}+\sigma_{в2i})};\qquad(12)$$

$$\Psi_{в3i}(x_i)=\frac{T_{вi}(x_i)}{T_{ос}}=\Psi_{в31i}\cdot\left(1-\Psi_{в32i}(x_i)\right),\qquad(13)$$

$$\Psi_{в31i}=\frac{E_{в3i}}{E_{2i}};\qquad(14)$$

$$\Psi_{в32i}(x_i)=\frac{e^{\sigma_{в2i}\cdot x_i}\cdot\left(C_{2i}\cdot\frac{E_{2i}}{E_{в3i}}-D_{2i}+(D_{2i}+\sigma_{в1i})\cdot e^{\sigma_{в1i}\cdot L_i}\right)}{e^{\sigma_{в1i}\cdot L_i}\cdot(D_{2i}+\sigma_{в1i})-e^{\sigma_{в2i}\cdot L_i}\cdot(D_{2i}+\sigma_{в2i})}-$$

$$-\frac{e^{\sigma_{в1i}\cdot x_i}\cdot\left(C_{2i}\cdot\frac{E_{в3i}}{E_{2i}}-D_{2i}+(D_{2i}+\sigma_{в2i})\cdot e^{\sigma_{в2i}\cdot L_i}\right)}{e^{\sigma_{в1i}\cdot L_i}\cdot(D_{2i}+\sigma_{в1i})-e^{\sigma_{в2i}\cdot L_i}\cdot(D_{2i}+\sigma_{в2i})}.\qquad(15)$$

В свою очередь, постоянные в выражениях (6) – (15) представляют собой сложные функции характерных параметров:

$$\left.\begin{gathered}B_{1i}=\frac{1}{\upsilon_к}\cdot\frac{\alpha_i\cdot F_i}{V_{кi}\cdot\rho_к\cdot c_к};\ B_{2i}=\frac{1}{\upsilon_{вi}}\cdot\frac{\alpha_i\cdot F_i}{V_{вi}\cdot\rho_в\cdot c_в};\ C_{2i}=\frac{k_{вi}\cdot F_{вi}}{V_{вi}\cdot\rho_в\cdot c_в};\\ D_{1i}=A_{1i}+B_{1i};\ D_{2i}=A_{2i}+B_{2i}+C_{2i};\\ E_{к1i}=D_{1i}-D_{2i};\ E_{к3i}=C_{2i}\cdot B_{1i};\\ E_{2i}=D_{1i}\cdot D_{2i}-B_{1i}\cdot B_{2i};\\ \sigma_{1,2кi}=\frac{E_{к1i}\pm\sqrt{E_{к1i}{}^2+4\cdot E_{2i}}}{2},\\ E_{в1i}=D_{2i}-D_{1i};\ E_{в3i}=C_{2i}\cdot D_{1i};\\ \sigma_{1,2вi}=\frac{-E_{в1i}\pm\sqrt{E_{в1i}{}^2+4\cdot E_{2i}}}{2}.\end{gathered}\right\}$$

В связи с тем, что моделируемая часть тепловой установки работает по принципу противотока, имеет место взаимовлияние участков зоны охлаждения, а значит, граничные условия зависят от состояния параметров на соседних участках, которые заранее неизвестны. Тогда, рассматривая систему (3) на границах участков и принимая во внимание выражения (2) – (4), численные значе-

ния граничных условий можем определить из решения следующей системы уравнений:

$$
\begin{cases}
T_{к1}(x_1)\big|_{x_1=0}=\Psi_{к11}(x_1)\big|_{x_1=0}\cdot T_{в.вх01}+\Psi_{к21}(x_1)\big|_{x_1=0}\cdot T_{к2}(x_2)\big|_{x_2=0}+\Psi_{к31}(x_1)\big|_{x_1=0}\cdot T_{ос};\\
T_{к2}(x_2)\big|_{x_2=0}=\Psi_{к12}(x_2)\big|_{x_2=0}\cdot\gamma_{в12}\cdot T_{в1}(x_1)\big|_{x_1=L_1}+\Psi_{к12}(x_2)\cdot\gamma_{в22}\cdot T_{в.вх02}+\\
+\Psi_{к22}(x_2)\big|_{x_2=0}\cdot T_{к3}(x_3)\big|_{x_3=0}+\Psi_{к32}(x_2)\big|_{x_2=0}\cdot T_{ос};\\
\ldots\\
T_{к(n-1)}(x_{n-1})\big|_{x_{n-1}=0}=\Psi_{к1(n-1)}(x_{n-1})\big|_{x_{n-1}=0}\cdot\gamma_{в1(n-1)}\cdot T_{в(n-2)}(x_{n-2})\big|_{x_{n-2}=L_{n-2}}+\\
+\Psi_{к1(n-1)}(x_{n-1})\big|_{x_{n-1}=0}\cdot\gamma_{в2(n-1)}\cdot T_{в.вх0(n-1)}+\Psi_{к2(n-1)}(x_{n-1})\big|_{x_{n-1}=0}\cdot T_{кп}(x_n)\big|_{x_n=0}+\Psi_{к3(n-1)}(x_{n-1})\big|_{x_{n-1}=0}\cdot T_{ос};\\
T_{кп}(x_n)\big|_{x_n=0}=\Psi_{к1n}(x_n)\big|_{x_n=0}\cdot\gamma_{в1n}\cdot T_{в(n-1)}(x_{n-1})\big|_{x_{n-1}=L_{n-1}}+\Psi_{к1n}(x_n)\big|_{x_n=0}\cdot\gamma_{в2n}\cdot T_{в.вх0n}+\\
+\Psi_{к2n}(x_n)\big|_{x_n=0}\cdot T_{к.вх}+\Psi_{к3n}(x_n)\big|_{x_n=0}\cdot T_{ос};\\
T_{в1}(x_1)\big|_{x_1=L_1}=\Psi_{в11}(x_1)\big|_{x_1=L_1}\cdot T_{в.вх01}+\Psi_{в21}(x_1)\big|_{x_1=L_1}\cdot T_{к2}(x_2)\big|_{x_2=0}+\Psi_{в31}(x_1)\big|_{x_1=L_1}\cdot T_{ос};\\
T_{в2}(x_2)\big|_{x_2=L_2}=\Psi_{в12}(x_2)\big|_{x_2=L_2}\cdot\gamma_{в12}\cdot T_{в1}(x_1)\big|_{x_1=L_1}+\Psi_{в12}(x_2)\big|_{x_2=L_2}\cdot\gamma_{в22}\cdot T_{в.вх02}+\\
+\Psi_{в22}(x_2)\big|_{x_2=L_2}\cdot T_{к3}(x_3)\big|_{x_3=0}+\Psi_{в32}(x_2)\big|_{x_2=L_2}\cdot T_{ос};\\
\ldots\\
T_{в(n-1)}(x_{n-1})\big|_{x_{n-1}=L_{n-1}}=\Psi_{в1(n-1)}(x_{n-1})\big|_{x_{n-1}=L_{n-1}}\cdot\gamma_{в1(n-1)}\cdot T_{в(n-2)}(x_{n-2})\big|_{x_{n-2}=L_{n-2}}+\\
+\Psi_{в1(n-1)}(x_{n-1})\big|_{x_{n-1}=L_{n-1}}\cdot\gamma_{в2(n-1)}\cdot T_{в.вх0(n-1)}+\Psi_{в2(n-1)}(x_{n-1})\big|_{x_{n-1}=L_{n-1}}\cdot T_{кп}(x_n)\big|_{x_n=0}+\Psi_{в3(n-1)}(x_{n-1})\big|_{x_{n-1}=L_{n-1}}\cdot T_{ос};\\
T_{вп}(x_n)\big|_{x_n=L_n}=\Psi_{в1n}(x_n)\big|_{x_n=L_n}\cdot\gamma_{в1n}\cdot T_{в(n-1)}(x_{n-1})\big|_{x_n=L_n}+\\
+\Psi_{в1n}(x_n)\big|_{x_n=L_n}\cdot\gamma_{в2n}\cdot T_{в.вх0n}+\Psi_{в2n}(x_n)\big|_{x_n=L_n}\cdot T_{к.вх}+\Psi_{в3n}(x_n)\big|_{x_n=L_n}\cdot T_{ос};
\end{cases}
$$

Представленное математическое описание позволяет получить участок температурной кривой туннельной печи, соответствующей этапу охлаждения. Вычисленные с помощью представленных выражений составляющие кривой охлаждения объединим, используя следующую зависимость:

$$T_к(x)=T_{к1}(x_1)+T_{к2}(x_2+L_1)+\ldots+T_{к(n-1)}(x_{n-1}+\sum_{i=1}^{n-2}L_i)+T_{кп}(x_n+\sum_{i=1}^{n-1}L_i)\,.$$

Аналогично получим зависимость изменения температуры воздуха по длине всей зоны охлаждения:

$$T_в(x)=T_{в1}(x_1)+T_{в2}(x_2+L_1)+\ldots+T_{в(n-1)}(x_{n-1}+\sum_{i=1}^{n-2}L_i)+T_{вп}(x_n+\sum_{i=1}^{n-1}L_i)\,.$$

В качестве примера рассмотрим вариант зоны охлаждения, разделенной на 4 участка. При этом процесс характеризуется параметрами, представленными в табл. 1.

Таблица 1

Параметры процесса охлаждения керамического кирпича

Параметр	*i*			
	1	**2**	**3**	**4**
$v_к$, м/с	$5.6 \cdot 10^{-4}$			
$Q_{вхi}$, м^3/с	2.1	0.3	0.48	0.3
$Q_{выхi}$, м^3/с	0			3.18
L_i, м	5	6		
$V_{кi}$, м^3	4.875	5.85		
$V_{вi}$, м^3	23.73	28.48		
F_i, м^2	158.65	190.4		
$F_{вi}$, м^2	38.1	45.7		
$\rho_к$, кг/м^3	1800			
$\rho_в$, кг/м^3	1.205			
$c_к$, Дж/(кг·°С)	916			
$c_в$, Дж/(кг·°С)	1017			
$k_{\varepsilon i}$	1.2	0.52	0.19	0.27
k_{Ti}	1.11	1.325	1.46	1.59
$\alpha_н$, Вт/(м^2·°С)	5.6			
$\sum_{j=1}^{r} \frac{\delta_j}{\lambda_j}$, м^2·°С/Вт	0.51			
$T_{к.вх}$, °С	–			995
$T_{в.вх0i}$, °С	20			
$T_{ос}$, °С	20			

В результате расчета с использованием представленных выше математических зависимостей получен участок температурной кривой кирпича, соответствующий зоне охлаждения (рис. 2). Следует отметить, что маркерами обозначены значения температуры в характерных точках (на входах и выходах рассматриваемых четырех участков) зоны охлаждения действующей туннельной печи [11], которая работает в аналогичных расчетным технологических условиях. Оценим точность математической модели статического режима работы зоны охлаждения керамического кирпича. Произведя сравнение в указанных точках расчетных значений $T_к$ и значений $T_{кн}$ температур кирпича, полученных на реальной установке, можем увидеть (см. табл. 2), что максимальная погрешность δ наблюдается при $x = 0$ и составляет 1.63 %. Поэтому можно сделать вывод об адекватности разработанной математической модели.

Таблица 2

Оценка точности математической модели статического режима работы зоны охлаждения керамического кирпича

Параметр	*x*, м				
	0	**5**	**11**	**17**	**23**
$T_{кн}$, °С	92	280	513	658	995
$T_к$, °С	93.5	279.3	511.9	661.7	995
δ, %	1.63	–0.25	–0.21	0.56	0

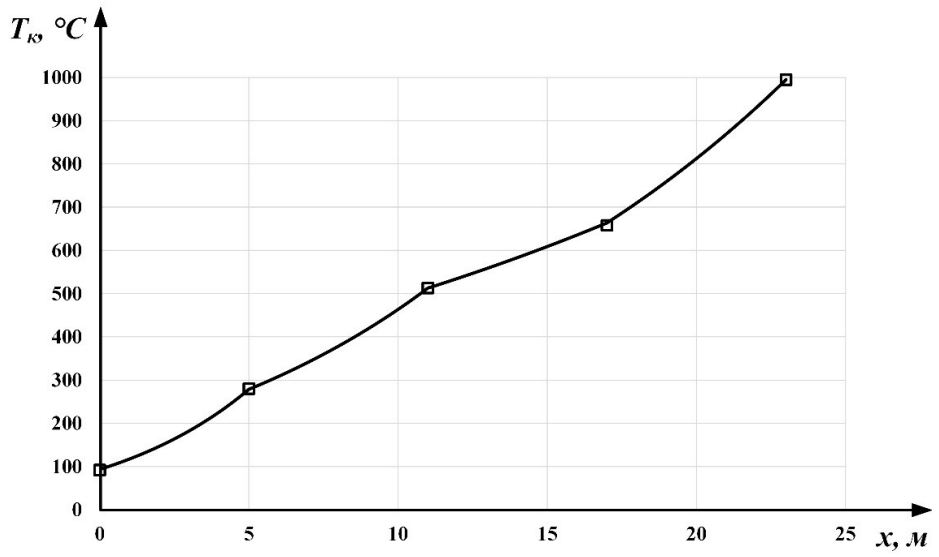


Рис. 2. Температурная кривая кирпича в зоне охлаждения туннельной печи

Таким образом, полученные выражения позволяют с достаточной для инженерной практики точностью рассчитать кривые распределения температур кирпича и охлаждающего воздуха по длине зоны охлаждения. Предложенный подход может быть использован при проектировании туннельных печей для выбора наиболее энергоэффективной конфигурации системы распределения теплоносителей, а также подбора необходимого технологического оборудования. Кроме того, использование предложенного математического описания при автоматизации рассматриваемого процесса существенно расширяет возможности управления, что позволит добиться требуемых показателей качества работы тепловых установок, тем самым снизив количество брака и энергетические затраты на керамическом производстве.

Выводы

1. Выполнен анализ технологического процесса охлаждения обожженного керамического кирпича, который представляет собой объект управления с распределенными по длине зоны охлаждения туннельной печи параметрами. Обозначено, что основной интегральной характеристикой, наилучшим образом отражающей соответствие параметров процесса технологическим требованиям, является температурная кривая.

2. Разработано математическое описание статического режима работы зоны охлаждения кирпича с распределенными подачей и отбором охлаждающего агента в виде системы неоднородных дифференциальных уравнений первого порядка и их граничных условий.

3. Найдено решение системы уравнений, позволяющее моделировать процессы для конфигураций схемы распределения теплоносителей с разным количеством точек подачи и отбора охлаждающего агента.

4. Представлен подход к определению граничных условий для каждого участка зоны охлаждения.

5. Полученные результаты предоставляют возможность создания

эффективных систем управления процессом охлаждения керамического кирпича в соответствующей зоне туннельной печи, позволяющих повысить качество продукции и сократить энергетические затраты производства.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Нохратян К.А.* Сушка и обжиг в промышленности строительной керамики. М.: Государственное издательство литературы по строительству, архитектуре и строительным материалам, 1962. 604 с.
2. *Китайцев В.А., Гурвич Р.М., Корольков И.В.* Теплотехника и тепловые установки в промышленности строительных материалов. М.: Промстройиздат, 1954. 496 с.
3. *Наумов М.М., Кашкаев И.С., Буз М.А., Шейнман Е.Ш.* Технология глиняного кирпича. М.: Издательство литературы по строительству, 1969. 269 с.
4. *Гудков К.В., Анцев В.Ю., Шафорост А.Н., Толоконников А.С., Горынин А.Д.* Повышение качества продукции кирпичного производства на основе технологического реинжиниринга // Известия ТулГУ. Технические науки. 2023. Вып. 9. С. 490–494. DOI: 10.24412/2071-6168-2023-9-485-486. EDN: ZHWZFQ
5. *Бухмиров В.В., Гнездов Е.Н., Корвяков П.А., Ракутина Д.В.* Исследование режима обжига керамических изделий в туннельных печах кирпичного производства // Промышленные печи и трубы. 2006. № 1. С. 79–83. EDN: PXKLXL
6. *Лопатина М.В., Антонычев С.В.* Комплексное теплотехнологическое обследование туннельной печи для обжига кирпича // Строительные материалы. 2016. № 12. С. 34–37. EDN: XHFQDF
7. *Гнездов Е.Н., Гнездов Н.Е., Марченко Ю.И., Пережигин Е.А., Лопатина М.В., Цветкова М.С.* Технологический энергоаудит туннельной печи для обжига керамических изделий // Строительные материалы. 2012. № 5. С. 54–57. EDN: NNREYJ
8. *Тугов В.В., Сабанчин В.Р.* Автоматизация процесса обжига керамического кирпича: монография. Оренбург: ОГУ, 2019. 150 с.
9. *Сабанчин В.Р.* Автоматизированная система управления процессом обжига керамического кирпича на основе многомерного логического регулятора: дис. … канд. техн. наук. Оренбург, 2018. 166 с. EDN: JGGXHG
10. *Чаудхари Р.Р.* Автоматизация линии перемещения продукции кирпично-черепичного производства в зоне сушки и обжига: дис. … канд. техн. наук. М., 2013. 119 с.
11. *Умаралиев Р.Ш.* Автоматизация и моделирование технологического процесса обжига керамического кирпича в туннельной печи: дис. … канд. техн. наук. М., 2012. 125 с. EDN: QFWGWN

Статья поступила в редакцию 13.03.2025

doi: 10.14498/tech.2025.1.4

MATHEMATICAL DESCRIPTION OF THE STATIC OPERATIONAL MODE OF THE CERAMIC BRICK COOLING ZONE IN A TUNNEL KILN WITH DISTRIBUTED SUPPLY OF COOLING AGENT

***M.A. Nazarov, A.A. Zavarzin*[1]**

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

E-mail: nazarovm86@yandex.ru, andrew163ru@mail.ru

Abstract. *The analysis of the technological process of cooling ceramic bricks in a tunnel kiln as a control object with parameters distributed along the longitudinal coordinate is performed. It is revealed that the process under consideration has a significant effect on the strength of the finished brick, while research in the field of developing effective methods and means of controlling this stage is practically absent. In the course of the work, the following were determined: a vector of output coordinates, including the temperatures of the brick and cooling air and their gradients along the longitudinal coordinate of the kiln, a vector of control actions consisting of the flow rates of the supplied cooling air and the extracted air, a vector of disturbing actions - the temperature of the brick at the entrance to the cooling zone, the air supplied to the cooling zone, and the environment. A calculation scheme for the process of reducing the temperature of ceramic bricks has been developed taking into account an arbitrary number of points of supply and extraction of air to the cooling zone, which determines the number and size of its sections. Taking into account the accepted assumptions and simplifications, a mathematical description of the static mode of operation of the cooling zone with distributed supply and selection of the cooling agent was performed in the form of a system of non-homogeneous differential equations with the corresponding boundary conditions, which is problem-oriented towards the synthesis of automatic control systems. Their solution made it possible to determine the mathematical operators that link the output coordinates with the control and main disturbing effects. In the future, the results of the work can be used to create effective control systems for the brick cooling process, which will improve the quality of products and reduce energy costs for production.*

Keywords: *ceramic brick, tunnel kiln, cooling zone, mathematical model, control object with distributed parameters.*

REFERENCES

1. *Nohratyan K.A.* Sushka i obzhig v promyshlennosti stroitel'noj keramiki [Drying and Firing in the Industry of Construction Ceramics]. M.: Gosudarstvennoe izdatelstvo literatury po stroitelstvu, arhitekture i stroitelnym materialam, 1962. 604 p. (In Russian)
2. *Kitajcev V.A., Gurvich R.M., Korolkov I.V.* Teplotekhnika i teplovye ustanovki v promyshlennosti stroitelnyh materialov [Thermal Engineering and Thermal Installations in

© The Author(s), 2025

[1] *Maxim A. Nazarov (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor, Dept. of Mechanization, Automation, and Energy Supply in Construction.*
Andrey A. Zavarzin, Engineer, Dept. of Mechanization, Automation, and Energy Supply in Construction.

the Industry of Construction Materials]. M.: Promstrojizdat, 1954. 496 p. (In Russian)
3. *Naumov M.M., Kashkaev I.S., Buz M.A., Shejnman E.Sh.* Tekhnologiya glinyanogo kirpicha [Technology of Clay Brick]. M.: Izdatelstvo literatury po stroitelstvu, 1969. 269 p. (In Russian)
4. *Gudkov K.V., Ancev V.Yu., Shaforost A.N., Tolokonnikov A.S., Gorynin A.D.* Povyshenie kachestva produkcii kirpichnogo proizvodstva na osnove tekhnologicheskogo reinzhiniringa [Improving the Quality of Brick Production Based on Technological Reengineering] // Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki. 2023. Vyp. 9. Pp. 490–494. DOI: 10.24412/2071-6168-2023-9-485-486. (In Russian)
5. *Buhmirov V.V., Gnezdov E.N., Korvyakov P.A., Rakutina D.V.* Issledovanie rezhima obzhiga keramicheskih izdelij v tunnelnyh pechah kirpichnogo proizvodstva [Study of the Firing Regime of Ceramic Products in Tunnel Kilns of Brick Production] // Promyshlennye pechi i truby. 2006. No. 1. Pp. 79–83. (In Russian)
6. *Lopatina M.V., Antonychev S.V.* Kompleksnoe teplotekhnologicheskoe obsledovanie tunnelnoj pechi dlya obzhiga kirpicha [Comprehensive Thermal Technology Survey of a Tunnel Kiln for Firing Brick] // Stroitelnye materialy. 2016. No. 12. Pp. 34–37. (In Russian)
7. *Gnezdov E.N., Gnezdov N.E., Marchenko Yu.I., Perezhigin E.A., Lopatina M.V., Cvetkova M.S.* Tekhnologicheskij energoaudit tunnelnoj pechi dlya obzhiga keramicheskih izdelij [Technological Energy Audit of a Tunnel Kiln for Firing Ceramic Products] // Stroitelnye materialy. 2012. No. 5. Pp. 54–57. (In Russian)
8. *Tugov V.V., Sabanchin V.R.* Avtomatizaciya processa obzhiga keramicheskogo kirpicha: monografiya [Automation of the Firing Process of Ceramic Brick]. Orenburg: OGU, 2019. 150 p. (In Russian)
9. *Sabanchin V.R.* Avtomatizirovannaya sistema upravleniya processom obzhiga keramicheskogo kirpicha na osnove mnogomernogo logicheskogo regulyatora [Automated Control System for the Firing Process of Ceramic Brick Based on a Multidimensional Logic Controller]: dis. … kand. tekhn. nauk. Orenburg, 2018. 166 p. (In Russian)
10. *Chaudhari R.R.* Avtomatizaciya linii peremeshcheniya produkcii kirpichno-cherepichnogo proizvodstva v zone sushki i obzhiga [Automation of the Product Movement Line in the Brick and Tile Production Zone During Drying and Firing]: dis. … kand. tekhn. nauk. M., 2013. 119 p. (In Russian)
11. *Umaraliev R.Sh.* Avtomatizaciya i modelirovanie tekhnologicheskogo processa obzhiga keramicheskogo kirpicha v tunnel'noj pechi [Automation and Modeling of the Technological Process of Firing Ceramic Bricks in a Tunnel Kiln]: dis. … kand. tekhn. nauk. M., 2012. 125 p.

Original article submitted 13.03.2025

doi: 10.14498/tech.2025.1.5
EDN: OSLOOT

Энергетика и электротехника

УДК 621.3.06

АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ И ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ЗАЗЕМЛИТЕЛЕ НА НАПРЯЖЕНИЕ 10 КВ

***А.А. Базаров, О.В. Белый*[1]**

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

E-mail: aleksbazarov@yandex.ru, Oleg.Belyi@electroshield

Аннотация. *Рассматриваются электромагнитные и тепловые процессы в системе токоведущих элементов заземлителя в шкафу распредустройства среднего напряжения, протекающие во время короткого замыкания. Режим короткого замыкания является необходимым этапом при испытаниях коммутирующих устройств. Возникновение больших токов приводит к значительным электродинамическим и термическим воздействиям. Устойчивость к токам короткого замыкания зависит от длительности, формы кривой тока, а также от распределения плотности тока по сечению токоведущих элементов аппарата.*

При проектировании новых устройств проводится комплекс расчетов и испытаний. Применение аналитических методов расчета не позволяет учесть в полном объеме влияние различных факторов. Целью статьи является разработка численной модели электромагнитных и тепловых процессов в заземлителе для повышения точности расчетов, сокращения времени испытаний и определения максимально допустимых значений токов при определении термической стойкости.

Решение проблемы обеспечивается с помощью мультифизической электротепловой модели, построенной с использованием метода конечных элементов. Полученные результаты моделирования электромагнитных и тепловых полей в конструкции заземлителя позволяют определить наиболее нагруженные участки и предусмотреть меры по изменению конструкции с целью повышения термической и динамической стойкости заземлителя.

Ключевые слова: *заземлитель, метод конечных элементов, электромагнитные процессы, тепловые процессы, термическая стойкость*.

Введение

При эксплуатации коммутирующего электрооборудования среднего напряжения возникают аварийные режимы, связанные с протеканием токов короткого замыкания, которые могут привести к повреждениям или сокращению срока

© Автор(ы), 2025

[1] *Александр Александрович Базаров, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры электроснабжения промышленных предприятий.*

Олег Викторович Белый, аспирант кафедры электроснабжения промышленных предприятий.

службы токоведущих и коммутирующих элементов. Стандартами для разъединителей и заземлителей во включенном состоянии, без процессов коммутации, предусмотрены предельно допустимые значения температуры токоведущих элементов. При отсутствии контакта с органической изоляцией температура токоведущего элемента из меди кратковременно не должна превышать 300 градусов [1]. Тепловое воздействие определяется величиной тока и временем, поэтому допускается использовать разъединители и заземлители при времени короткого замыкания *t*, превышающем нормированное время короткого замыкания $t_{к.з.}$ с одновременным уменьшением величины номинального кратковременного выдерживаемого тока I_T (ток термической стойкости) до значения I_t, определяемого в соответствии с соотношением

$$I_t^2 \cdot t = I_T^2 \cdot t_{к.з.} \qquad (1)$$

В работе рассматриваются процессы термического воздействия на элементы заземлителя, который находится во включенном состоянии, при протекании тока короткого замыкания. Это уменьшает число обязательных видов исследования. Тем не менее расчеты осложнены как зависимостью тока от времени, определяемой свойствами системы электроснабжения, так и конструктивными особенностями заземлителя и шкафа распредустройства.

Существующие аналитические методики расчета мощности тепловыделения в проводниках не позволяют учесть все особенности распределения плотности тока и мощности тепловыделения, обусловленные взаимным влиянием токов в проводниках разных фаз, поверхностным эффектом в проводниках и магнитным полем наведенных токов в ферромагнитных стенках шкафа. Величина тока короткого замыкания определяется суммарным сопротивлением всей цепи. Влияние комплексного сопротивления токопроводящих элементов в шкафу с заземлителем на суммарное значение сопротивления минимально, однако перераспределение плотности тока может существенно повлиять на мощность тепловыделения и температуру в различных точках подвижных и неподвижных элементов.

Целью работы является определение погрешности расчетов для электромагнитных и тепловых процессов при использовании линейных моделей по сравнению с более точными нелинейными моделями и определение возможности корректного применения на предварительных этапах исследования.

Для достижения поставленной цели выполнен ряд задач, включающий построение математических моделей и расчеты внутренних источников тепловыделения и распределения температуры для разных вариантов моделей.

При проектировании и исследовании устройств для передачи и коммутации больших токов используются численные методы. Большое внимание уделяется исследованию на термическую устойчивость электрооборудования среднего напряжения [2–5].

При проверке устройств на термическую и электродинамическую стойкость производятся испытания с помощью специального оборудования [6]. При подготовке математических моделей заземлителя особенности испытаний должны быть учтены.

Моделированию электромагнитных и тепловых процессов с помощью специализированного программного обеспечения посвящено много работ в области термической стойкости шинопроводов [7–11,13] и коммутирующей аппаратуры [12, 13].

Формулировка электромагнитной задачи

При использовании векторного магнитного потенциала электромагнитная задача формулируется в виде уравнения Пуассона:

$$\nabla^2\left\{\overline{A}\right\} - j\omega\sigma\left\{\overline{A}\right\} - \left\{\overline{J}\right\} = 0. \quad (2)$$

Основное уравнение дополняется граничными условиями на поверхности, достаточно удаленной от элементов системы:

$$\left\{\overline{A}\right\} = 0 \text{ на } S_B. \quad (3)$$

Моделирование в Comsol для трехмерной области осуществляется при использовании системы из двух уравнений:

$$\nabla\cdot\left(j\omega\sigma_э + \sigma_э\nabla V - \mathbf{J}^e\right) = 0; \quad (4)$$

$$\left(j\omega\sigma_э\mathbf{A} + \nabla\times\left(\mu_0^{-1}\mu_r^{-1}\nabla\times\mathbf{A}\right) + \sigma_э\nabla V\right) = \mathbf{J}^e. \quad (5)$$

Здесь: $\sigma_э$ – электропроводность; A – векторный магнитный потенциал; V – скалярный электрический потенциал; $\mathbf{J}^e$ – вектор источников (плотность тока); μ_0 – магнитная проницаемость вакуума; μ_r – относительная магнитная проницаемость среды.

Электропроводность нагреваемых проводников для упрощения принята неизменной на всем протяжении процесса нагрева, так как в диапазоне рассматриваемых температур (0–300 градусов) она изменяется незначительно. В рассматриваемой задаче магнитные материалы использовались при изготовлении стенок шкафа. Относительная магнитная проницаемость для них определяется в процессе решения с помощью кривой намагничивания.

Формулировка тепловой задачи

Моделирование тепловых процессов в системе «проводники – окружающая среда» производится с помощью решения уравнения теплопроводности, записанного в виде уравнения в частных производных, которое дополнено граничными условиями. Источники тепла в данной задаче определяются при решении электромагнитной задачи и могут быть непосредственно экспортированы в виде распределения мощности или заданы в специально сформированных геометрических областях для случая проведения тепловых расчетов отдельно от электромагнитных процессов.

Нестационарное уравнение теплопроводности для трехмерной области формулируется в декартовой системе координат в следующем виде:

$$\gamma C_P\frac{\partial T}{\partial\tau} = \nabla\cdot(\lambda\nabla T) + Q, \quad (6)$$

с начальными условиями

$$T\left(x,y,z,0\right) = \text{const} \quad (7)$$

и граничными условиями

$$\lambda\nabla T = \alpha\left[T - T_c\right] + \varepsilon\sigma\left[T_1^4 - T_2^4\right]. \quad (8)$$

Здесь: $T\left(r,x,z,\tau\right)$ – распределение температуры в заготовке в произвольный момент времени τ; T_c – температура окружающей среды; T_1, T_2 – значения (распределения) температуры поверхностей, между которыми происходит теплообмен излучением (вместо одной из поверхностей может выступать окружающая

среда); $C_p(x,y,z,t)$, $\gamma(x,y,z,\tau)$, $\lambda(x,y,z,\tau)$ – соответственно удельные теплоемкость, теплопроводность и плотность металла; $\alpha,\varepsilon,\sigma$ – коэффициенты конвективного теплообмена, степень черноты и коэффициент излучения поверхности материала; Q – удельная мощность источников внутреннего тепловыделения.

Моделирование электромагнитных процессов

Заземлитель состоит из трехфазного замыкающего устройства, размещенного внутри стального короба. На рис. 1 показана геометрическая модель заземлителя, содержащая необходимые конструктивные элементы и шину 3, обеспечивающую замыкание фазных цепей. С нижней стороны соединение осуществляется с помощью трубчатой шины 2, являющейся конструктивным элементом. Модель заземлителя содержит систему подвижных 4 и неподвижных 5 ножей, представляющих собой шины прямоугольного сечения. Особенности задания источников тока в используемой программе приводят к заданию различных физических свойств для отдельных участков шин. Задание необходимого значения тока на участке 7 проводника обеспечивается при нулевой электропроводности и расчетном значении плотности тока и сдвига по фазе. Такое сочетание приводит к получению нужной величины тока независимо от сопротивления других элементов цепи, подключенных последовательно. Для проверки корректности расчетов предусмотрен участок 8 такой же длины с ненулевой электропроводностью.

В качестве материала для подвижных и неподвижных контактов использована медь. Корпус шкафа выполнен из ферромагнитной стали.

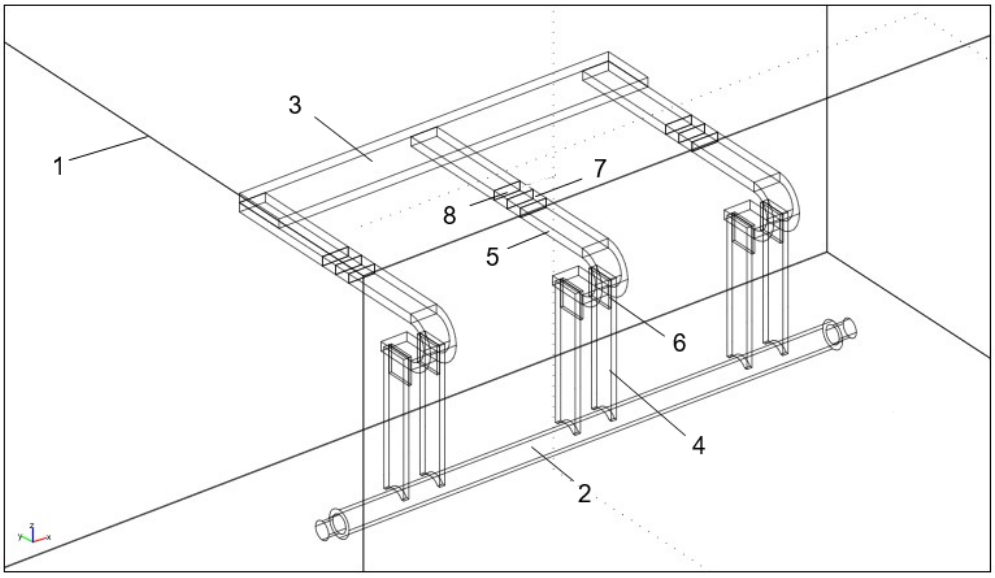


Рис. 1. Геометрическая модель заземлителя: 1 – корпус шкафа с заземлителем; 2 – вал подвижных ножей; 3 – шинная перемычка; 4 – подвижный нож; 5 – неподвижный нож; 6 – вспомогательная накладка на подвижном ноже; 7 – вставка для задания источника тока; 8 – вставка для контроля тока

В качестве расчетного тока заземлителя заданы значения 31,5 кА со сдвигом по фазе 120 градусов.

Решение трехмерной электромагнитной задачи, содержащей магнитные материалы, требует гораздо больших затрат времени. Поэтому выполнены расчеты для нескольких вариантов задания магнитной проницаемости для стенок шкафа. Наиболее правильный подход обеспечивает задание кривой намагничивания. Для двух других вариантов приняты значения магнитной проницаемости, равные 160 и 300. Более сложные варианты задания постоянных значений проницаемости на различных участках не рассматривались.

Геометрическая модель заземлителя показана в соответствии с возможностями и требованиями программы, в которой моделируется электромагнитный процесс. Источник трехфазного тока задан на прямолинейных участках 8 для каждой фазы в виде плотности тока. В этом случае токи между фазами замыкаются с помощью перемычки 3 и вала 2. При нулевой электропроводности участка 8 и аналогичных в других фазах ток определяется произведением плотности тока на сечение и не зависит от сопротивления цепи, что соответствует понятию источника тока.

Расчет электромагнитных процессов в шкафу с заземлителем при задании кривой намагничивания в стенках шкафа

В качестве материала для стенки в расчетной модели принято обычное железо с максимальным значением магнитной проницаемости, равным 1200 при отсутствии напряженности магнитного поля. В данном случае термин «железо» соответствует сталям, не относящимся к электротехническим. Магнитные свойства железа и конструкционных малоуглеродистых сталей близки.

В результате расчета получены значения мощности тепловыделения в элементах заземлителя, шинной перемычке 3, стенках шкафа 1 и на валу 2 (ось вращения подвижных контактов).

В перемычке мощность тепловыделения составляет P = 6.19 кВт, в корпусе вала P = 4.92 кВт, в стенках шкафа P = 6.42 кВт.

Значения мощности в подвижных и неподвижных контактах представлены в табл. 1.

Таблица 1

Мощности тепловыделения в элементах заземлителя

Полюс	$P_{дв.л}$, кВт	$P_{дв.пр}$, кВт	$P_{нд}$, кВт	$P_{сум}$, кВт
A	1.1	1.94	8.26	11,3
B	2.16	1.08	8.27	11,51
C	1.99	1.02	8.16	11,17

Суммарная мощность тепловыделения в заземлителе равна 33,98 кВт.

Расчет электромагнитных процессов в шкафу с заземлителем при задании постоянной магнитной проницаемости $\mu = 160$ в стенках шкафа

В перемычке мощность тепловыделения составляет $P = 6.02$ кВт, в корпусе вала $P = 4.92$ кВт, в стенках шкафа $P = 1.64$ кВт.

Значения мощности в подвижных и неподвижных контактах представлены в табл. 2.

Таблица 2

Мощности тепловыделения в элементах заземлителя

Полюс	$P_{дв.л}$, кВт	$P_{дв.пр}$, кВт	$P_{нд}$, кВт	$P_{сум}$, кВт
A	0.89	1.82	7.81	10,52
B	1.33	1.81	8.19	11,33
C	0.79	1.81	7.99	10,59

Суммарная мощность в заземлителе $P = 32.44$ кВт.

Расчет электромагнитных процессов в шкафу с заземлителем при задании постоянной магнитной проницаемости $\mu = 300$ в стенках шкафа

В перемычке мощность тепловыделения составляет $P = 6.2$ кВт, в корпусе вала $P = 4.92$ кВт, в стенках шкафа $P = 1.85$ кВт.

Значения мощности в подвижных и неподвижных контактах представлены в табл. 3.

Таблица 3

Мощности тепловыделения в элементах заземлителя

Ф	$P_{дв.л}$, кВт	$P_{дв.пр}$, кВт	$P_{нд}$, кВт	$P_{сум}$, кВт
A	1.1	1.94	8.26	11,3
B	1.92	1.4	8.25	11,57
C	0.91	2.14	8.36	11,41

Суммарная мощность тепловыделения 34,28 кВт.

Результаты расчетов мощности тепловыделения для вариантов задания магнитной проницаемости представлены в табл. 4. Для сравнения определены значения отклонения суммарной мощности тепловыделения относительно варианта с заданием кривой намагничивания.

Таблица 4

Расчетные значения мощности тепловыделения в контактной системе заземлителя при разных значениях магнитной проницаемости шкафа

№	μ	$P_{сум}$, кВт	$P_{ст}$, кВт	ε, %
1	$\mu = f(H)$	33,98	6,4	0
2	160	32,44	1,64	–4,5
3	300	34,28	1,85	0,8

Приведенные в таблице значения мощности тепловыделения в токоведущих элементах заземлителя $P_{сум}$ (подвижные и неподвижные контакты заземлителя без перемычки и вала) для разных вариантов задания магнитной проницаемости имеют незначительную разницу. В корпусе шкафа $P_{ст}$ разница более значитель-

на, но величина мощности невелика и мало скажется на температуре заземлителя.

Моделирование электромагнитных процессов в системе проводников заземлителя происходит при использовании большого объема оперативной памяти. Наличие ферромагнитных элементов в виде стальных листов, служащих стенками шкафа, приводит к дополнительному замедлению расчетов из-за того, что итерационные методы решения нелинейных задач требуют больше шагов. На примере данной задачи при переходе с линейной на нелинейную модель электромагнитной задачи наблюдается увеличение оперативной памяти с 70 до 100 Гб, а времени счета – в два раза, с 10 до 20 часов (последний показатель зависит от вычислительной мощности процессора). При многократных расчетах потери времени становятся нежелательными. Возникает вопрос об обосновании применения линейных моделей для ускорения вычислений.

Если принять расчет для нелинейной модели за эталон, то погрешности могут быть определены для разных вариантов задания магнитной проницаемости в виде постоянной величины, как показано в табл. 4.

Корректное обоснование средней величины является непростой задачей. Кроме непосредственной зависимости от расчетного тока в заземлителе играют значительную роль расстояния между стенками корпуса шкафа и токоведущими элементами.

Принятые в качестве характеристик стали значения магнитной проницаемости, равные 160 и 300, являются отражением влияния электромагнитного поля шин замыкателя на мощность тепловыделения в листах корпуса. Как видно из приведенных значений в таблицах, совпадения всех параметров добиться сложно при таком подходе. Наблюдается не только влияние поля шин на проницаемость стального листа, но и влияние суммарного магнитного поля на распределение плотности тока в шинах. Модель построена таким образом, что токи совпадают для всех трех случаев задания магнитных свойств. Ввиду идентичности картины распределения токов информация о них не представлена. Наблюдаемые отличия в мощности тепловыделения объясняются небольшими изменениями в распределении плотности тока, а также разным сдвигом по фазе. Несмотря на то, что задача является стационарной (квазистационарной), расчетные величины при постпроцессорной обработке меняются в зависимости от задания фазы контролируемой величины. Суммарный полный ток для каждой пары имеет неизменную величину в пределах вычислительной погрешности.

Тепловые расчеты

Решение тепловой задачи выполняется за несколько шагов по времени. Объединение с электромагнитной задачей нежелательно, так как это потребует неоправданно больших затрат времени, особенно с учетом изменения свойств материалов.

Задание плотности источников тепловыделения выполняется вручную для каждой подобласти в соответствии со значениями, найденными при решении электромагнитной задачи.

Удельное сопротивление меди изменяется с увеличением температуры и рассчитывается по формулам

$$\Delta R = \alpha \cdot R \cdot \Delta T\,; \tag{9}$$

$$R_2 = R_1 \cdot \left(1 + \alpha\left(T_2 - T_1\right)\right), \tag{10}$$

где ΔR – изменение удельного сопротивления; R – удельное сопротивление при температуре, принятой в качестве базового уровня (обычно 20 °С); ΔT – градиент температур; α – температурный коэффициент удельного сопротивления для данного материала (размерность $^\circ C^{-1}$). В диапазоне от 0 до 100 °С для меди принят температурный коэффициент 0,004 $^\circ C^{-1}$. Рассчитаем удельное сопротивление меди при 60 °С:

$$R_{60^\circ C} = R_{20^\circ C} \cdot \left(1 + \alpha\left(60 - 20\right)\right) = 0{,}0172 \cdot \left(1 + 0{,}004 \cdot 40\right) \approx 0{,}02 \text{ Ом·мм}^2\text{/м}.$$

При протекании тока в проводнике выделяется мощность

$$P = I^2 \cdot R. \tag{11}$$

Если величина тока не зависит от температуры, то мощность увеличивается пропорционально изменению температуры $P \sim T$. Это справедливо в случае, когда площадь сечения проводника, через которую течет ток, не изменяется, то есть глубина проникновения тока заведомо больше толщины провода в диапазоне рабочих температур. Такое соотношение толщины провода (шины) и глубины проникновения тока выполняется для медных шин для токов частотой 50 Гц, если толщина проводника менее 10 мм. В таком случае мощность тепловыделения пропорциональна температуре проводника:

$$P = I^2 \cdot R_1 \cdot \left(1 + \alpha \cdot \left(T_2 - T_1\right)\right). \tag{12}$$

В тепловой задаче, рассматриваемой отдельно от электромагнитной задачи, перерасчет источников тепла не производится, поэтому для учета температурной зависимости в функцию источников тепловыделения вводится коэффициент, отражающий влияние температуры:

$$Q\left(T\right) = Q_0 \cdot \left(1 + \alpha \cdot \left(T_2 - T_1\right)\right). \tag{13}$$

Результаты моделирования тепловых процессов в токоведущих элементах представлены на рис. 2–6. На рис. 2–4 наблюдается зависимость температуры на линейных участках от расстояния до краев, где происходит отвод тепла к более массивным элементам, таким как перемычка.

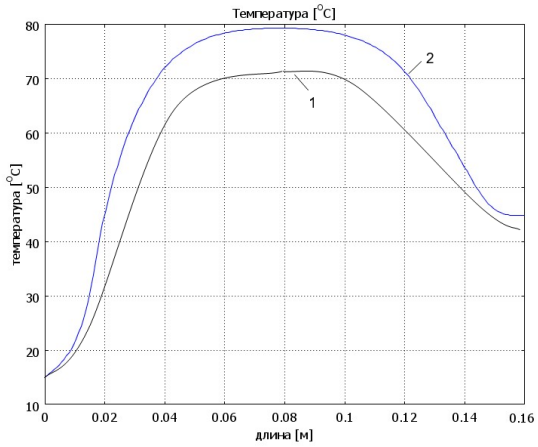


Рис. 2. Диаграммы температуры по длине подвижного ножа заземлителя в момент времени 3 с: 1 – при постоянной мощности тепловыделения; 2 – при возрастающей мощности тепловыделения

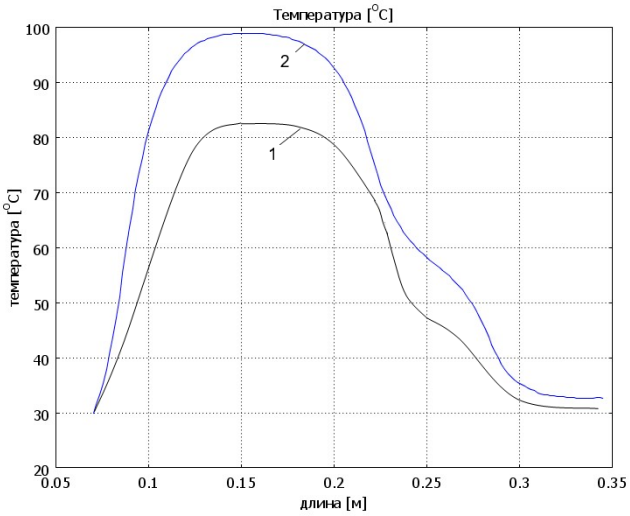


Рис. 3. Диаграммы температуры по длине средней неподвижной шины заземлителя в момент времени 3 с: 1 – при постоянной мощности тепловыделения; 2 – при возрастающей мощности тепловыделения

Сравнение результатов расчета для линейной и нелинейной моделей показало разницу в 10–17 градусов.

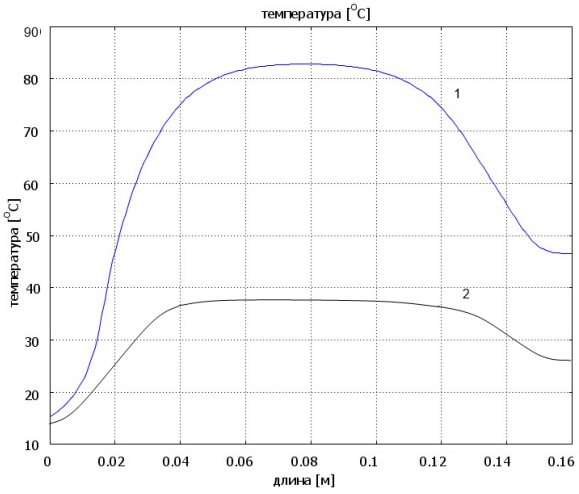


Рис. 4. Диаграммы температуры по длине подвижных ножей заземлителя при возрастающей мощности тепловыделения в момент времени 3 с: 1 – средняя фаза; 2 – крайняя фаза

Представленные на рис. 5 графики температуры в наиболее важных точках (контакты) показывают допустимые значения. Нужно сделать уточнение, что при расчете не учитывалось наличие переходного сопротивления контактов, которое может существенно повлиять на уровень температуры в месте контакта.

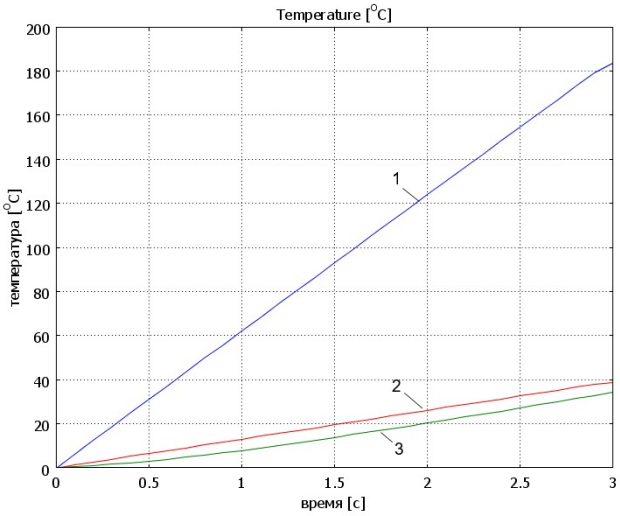


Рис. 5. Графики температуры при нагреве током 31.5 кА в точках заземлителя: 1 – поверхность вала; 2 – точка на линии между подвижным и неподвижным контактами; 3 – точка в месте подвода внешних шин

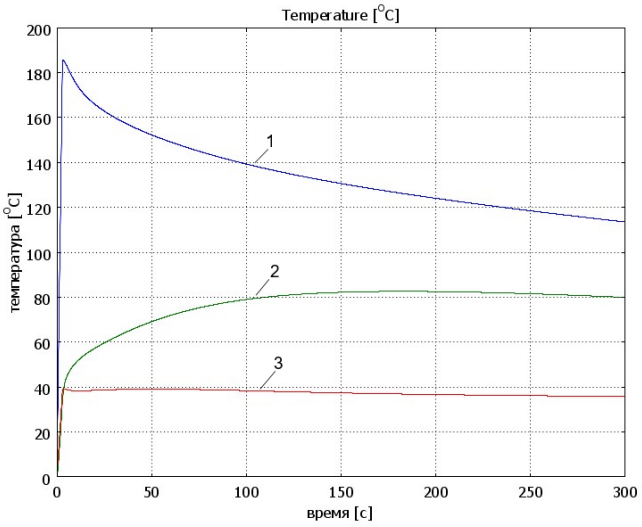


Рис. 6. Графики температуры при нагреве током 31.5 кА и последующем охлаждении в точках заземлителя: 1 – поверхность вала; 2 – между подвижным и неподвижным контактами; 3 – точка подвода внешних шин

Отрицательно сказывается на уровне максимальной температуры наличие материалов из немагнитной стали. При изготовлении вала из такой стали происходит значительный перегрев места соединения вала с шинами подвижных кон-

тактов. Измерение температуры на реальной установке затруднено, поэтому данная информация позволяет учесть влияние данного узла на ресурс устройства.

Заключение

Моделирование электромагнитных и тепловых процессов в токоведущих частях заземлителя показало, что полученные значения мощности тепловыделения и диаграммы температуры подтверждают соответствие заложенным характеристикам: в режиме короткого замыкания в течение 3 секунд не происходит нагрева токоведущих элементов выше 100 градусов. Однако применение стальных немагнитных конструктивных элементов недопустимо из-за повышенного тепловыделения и дополнительного нагрева подвижных контактов.

Использование упрощенных линейных моделей для электромагнитных задач допустимо, так как при обосновании значения магнитной проницаемости стенок шкафа вычислительная погрешность, связанная с магнитными свойствами, становится менее 1 %.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ 14693-90. Устройства комплектные распределительные негерметизированные в металлической оболочке на напряжение до 10 кВ. Общие технические условия. Введ. 1991-07-01. М.: Изд-во стандартов, 1990. 25 с. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200005012 (дата обращения: 22.04.2025).
2. *Клименко Б.В., Байда Е.И., Гречко А.М., Боев С.А.* О термическом действии токов коротких замыканий в электрических цепях средних напряжений, защищаемых вакуумными выключателями // Электротехника и электромеханика. 2007. № 1. С. 30–33. EDN: RZDNCJ
3. *Шульга Р.Н., Хренников А.Ю.* Тепловое действие токов короткого замыкания и термическая стойкость электрооборудования // Энергетик. 2022. № 5. С. 14–19. EDN: XMJEFY
4. *Нехожин Е.В., Буслаев Е.А., Квашнин С.А., Конопатин Е.И., Макаев Е.И.* Проверка термической, электродинамической стойкости и коммутационной способности выключателей в сети собственных нужд гидроэлектростанции // Современные тенденции в науке, технике, образовании: сб. науч. тр. по материалам III Междунар. науч.-практ. конф.: в 2 ч. 2018. Ч. 1. С. 72–74. EDN: YXFGDC
5. *Александров Р.И., Егоров Е.Г., Кулагина А.Г., Луия Н.Ю., Пичугин В.Н., Федоров Р.В.* Исследование температурных режимов контактов автоматического выключателя при отключении тока короткого замыкания // Электротехника. 2020. № 8. С. 2–5. EDN: ATQQAF
6. *Бешенцев Н.А., Ларин В.С., Милкин Е.А., Тимохин Д.А.* Определение параметров ударного трансформатора для испытания на стойкость к токам короткого замыкания // Электричество. 2023. № 8. С. 23–29. DOI: 10.24160/0013-5380-2023-8-23-29. EDN: THXZPI
7. *Терзян А.А., Сукиасян Г.С.* О численных методах решения задач электромагнитного поля // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2010. № 6. С. 3–14. EDN: NCLSAF
8. *Панова Е.А., Варганова А.В., Панарина М.С.* Автоматизированная проверка однополосных шин прямоугольного сечения по условиям термической электродинамической стойкости // Электротехнические системы и комплексы. 2020. № 1 (46). С. 28–33. DOI: 10.18503/2311-8318-2020-1(46)-28-33. EDN: SDFPYO
9. *Теличко Л.Я., Басов П.М.* Применение математического моделирования для исследования провалов напряжения, возникающих при коротких замыканиях в распределительных сетях высокого напряжения // Электротехнические комплексы и системы управления. 2010. № 4. С. 12–17. EDN: NAXJLN
10. *Цицикян Г.Н., Антипов М.Ю.* Электродинамические силы в ошиновке электротехнического оборудования автономных систем // Электротехника. 2018. № 4. С. 53–57. EDN: YUCCNH
11. *Цицикян Г.Н., Бобровников П.В.* Об электродинамических силах между параллельными шинами с током // Электричество. 2016. № 11. С. 44–48. EDN: WXQTPJ

12. *Krcum M., Zubcic M., Dlabač T.* Electromechanical Analysis of the Medium Voltage Earthing Switch due to Short-Time and Peak Withstand Current Test // Energies. 2019. Vol. 12. No. 12. P. 3189. DOI:10.3390/en12163189
13. *Абашева У.Н., Фризен В.Э., Назаров С.Л.* Численное моделирование испытания на термостойкость закрытого трехфазного шинопровода 10 кВ в режиме трехфазного короткого замыкания // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2022. № 43. С. 29–48. DOI: 10.15593/2224-9397/2022.3.02. EDN: BSHELL
14. *Саушев А.В., Туганов Р.Б., Бычков Е.В., Подшивалов Е.С.* Математическое моделирование токовой интенсивности в шинах распредустройств при геометрических неоднородностях // Автоматизация и IT в энергетике. 2023. № 1 (162). С. 20–28. EDN: DRYUIG
15. *Грачева Е.И., Лазаревич А.С.* Исследование теплофизических процессов в замкнутых контактах низковольтных коммутационных аппаратов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2004. № 5–6. С. 102–106. EDN: RAPNWH
16. *Лунев М.К., Фетисов Л.В.* Исследование теплофизических процессов в замкнутых контактах низковольтных автоматических выключателей // Перспективные научные исследования: опыт, проблемы и перспективы развития: сб. науч. ст. по материалам VIII Междунар. науч.-практ. конф. Уфа, 2022. С. 28–33. EDN: MZNTSD

Статья поступила в редакцию 22.04.2025

doi: 10.14498/tech.2025.1.5

ANALYSIS OF ELECTROMAGNETIC AND THERMAL PROCESSES IN A GROUNDING DEVICE AT A VOLTAGE OF 10 KV

***A.A. Bazarov, O.V. Belyi*[1]**

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

E-mail: aleksbazarov@yandex.ru, Oleg.Belyi@electroshield

Abstract. *The paper considers electromagnetic and thermal processes in the system of current-carrying elements of the grounding device in the medium voltage switchgear cabinet, occurring during a short circuit. The short-circuit mode is a necessary stage in testing switching devices. The occurrence of large currents leads to significant electrodynamic and thermal effects. Resistance to short-circuit currents depends on the duration, shape of the current curve, as well as on the distribution of the current density over the cross-section of the current-carrying elements of the device.*
When designing new devices, a set of calculations and tests is carried out. The use of analytical calculation methods does not allow to fully take into account the influence of various factors. The aim of the article is to develop a numerical model of electromagnetic and thermal processes in a grounding device to improve calculation accuracy, reduce testing time, and determine the maximum permissible current values when assessing thermal stability.
The problem is solved using a multiphysical electrothermal model built using the finite element method. The obtained results of modeling electromagnetic and thermal fields in the design of the ground electrode system allow us to determine the most loaded sections and provide measures to change the design in order to increase the thermal and dynamic resistance of the ground electrode system.

Keywords: *ground electrode system, finite element method, electromagnetic processes, thermal processes, thermal resistance.*

REFERENCES

1. GOST 14693-90. Ustrojstva komplektnye raspredelitel'nye negermetizirovannye v metallicheskoj obolochke na naprjazhenie do 10 kV. Obshhie tehnicheskie uslovija [Unsealed metal-enclosed complete distribution assemblies for voltages up to 10 kV. General technical specifications. Introduced]. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200005012 (data obrashhenija 22.04.2025). (In Russian)
2. *Klimenko B.V., Bajda E.I., Grechko A.M., Boev S.A.* O termicheskom dejstvii tokov korotkih zamykanij v elektricheskih cepyah srednih napryazhenij, zashchishchaemyh vakuumnymi vyklyuchatelyami [On the Thermal Effect of Short-Circuit Currents in Medium-Voltage Electrical Circuits Protected by Vacuum Circuit Breakers] // Elektrotekhnika i elektromekhanika. 2007. No. 1. Pp. 30–33. (In Russian)
3. *Shulga R.N., Hrennikov A.Yu.* Teplovoe dejstvie tokov korotkogo zamykaniya i termicheskaya stojkost elektrooborudovaniya // Energetik. 2022. No. 5. Pp. 14–19. (In Russian)
4. *Nekhozhin E.V., Buslaev E.A., Kvashnin S.A., Konopatin E.I., Makaev E.I.* Proverka termicheskoj, elektrodinamicheskoj stojkosti i kommutacionnoj sposobnosti vyklyuchatelej v seti sobstvennyh nuzhd gidroelektrostancii [Verification of Thermal, Electrodynamic Withstand

© The Author(s), 2025

[1] *Alexander A. Bazarov (Dr. Sci. (Techn.)), Associate Professor, Dept. of Industrial Power Supply.*
Oleg V. Bely, Postgraduate Student, Dept. of Industrial Power Supply.

Capability, and Switching Capacity of Circuit Breakers in the Auxiliary Power Network of a Hydroelectric Power Plant] // Sovremennye tendencii v nauke, tekhnike, obrazovanii: sb. nauch. tr. po materialam III Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. 2018. V. 2. Ch. 1. P. 72–74. (In Russian)

5. *Aleksandrov R.I., Egorov E.G., Kulagina A.G., Luiya N.Yu., Pichugin V.N., Fedorov R.V.* Issledovanie temperaturnyh rezhimov kontaktov avtomaticheskogo vyklyuchatelya pri otklyuchenii toka korotkogo zamykaniya [Study of Temperature Regimes of Circuit Breaker Contacts During Short-Circuit Current Interruption] // Elektrotekhnika. 2020. No. 8. Pp. 2–5. (In Russian)
6. *Beshencev N.A., Larin V.S., Milkin E.A., Timohin D.A.* Opredelenie parametrov udarnogo transformatora dlya ispytaniya na stojkost k tokam korotkogo zamykaniya [Determination of the parameters of an impulse transformer for short-circuit current withstand testing] // Elektrichestvo. 2023. No. 8. Pp. 23–29. DOI:10.24160/0013-5380-2023-8-23-29. (In Russian)
7. *Terzyan A.A., Sukiasyan G.S.* O chislennyh metodah resheniya zadach elektromagnitnogo polya [On Numerical Methods for Solving Electromagnetic Field Problems] // Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Elektromekhanika. 2010. No. 6. Pp. 3–14. (In Russian)
8. *Panova E.A., Varganova A.V., Panarina M.S.* Avtomatizirovannaya proverka odnopolosnyh shin pryamougolnogo secheniya po usloviyam termicheskoj elektrodinamicheskoj stojkosti [Automated Verification of Single-Bus Rectangular Conductors for Thermal and Electrodynamic Withstand Capability] // Elektrotekhnicheskie sistemy i kompleksy. 2020. No. 1 (46). Pp. 28–33. DOI: 10.18503/2311-8318-2020-1(46)-28-33. (In Russian)
9. *Telichko L.Ya., Basov P.M.* Primenenie matematicheskogo modelirovaniya dlya issledovaniya provalov napryazheniya, voznikayushchih pri korotkih zamykaniyah v raspredelitelnyh setyah vysokogo napryazheniya [Application of Mathematical Modeling to Study Voltage Sags Caused by Short Circuits in High-Voltage Distribution Networks] // Elektrotekhnicheskie kompleksy i sistemy upravleniya. 2010. No. 4. Pp. 12–17. (In Russian)
10. *Cicikyan G.N., Antipov M.Yu.* Elektrodinamicheskie sily v oshinovke elektrotekhnicheskogo oborudovaniya avtonomnyh sistem [Electrodynamic Forces in Busbar Systems of Autonomous Power Equipment] // Elektrotekhnika. 2018. No. 4. Pp. 53–57. (In Russian)
11. *Cicikyan G.N., Bobrovnikov P.V.* Ob elektrodinamicheskih silah mezhdu parallelnymi shinami s tokom [On Electrodynamic Forces Between Current-Carrying Parallel Busbars] // Elektrichestvo. 2016. No. 11. Pp. 44–48. (In Russian)
12. *Krcum M., Zubcic M., Dlabač T.* Electromechanical Analysis of the Medium Voltage Earthing Switch due to Short-Time and Peak Withstand Current Test // Energies. 2019. Vol. 12. No. 12. P. 3189. DOI: 10.3390/en12163189
13. *Abasheva U.N., Frizen V.E., Nazarov S.L.* Chislennoe modelirovanie ispytaniya na termostojkost zakrytogo trekhfaznogo shinoprovoda 10 kV v rezhime trekhfaznogo korotkogo zamykaniya [Numerical Simulation of Thermal Withstand Testing for a 10 kV Enclosed Three-Phase Busduct Under Three-Phase Short-Circuit Conditions] // Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatelskogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotekhnika, informacionnye tekhnologii, sistemy upravleniya. 2022. No. 43. Pp. 29–48. DOI: 10.15593/2224-9397/2022.3.02. (In Russian)
14. *Saushev A.V., Tuganov R.B., Bychkov E.V., Podshivalov E.S.* Matematicheskoe modelirovanie tokovoj intensivnosti v shinah raspredustrojstv pri geometricheskih neodnorodnostyah [Mathematical Modeling of Current Intensity in Busbars of Distribution Devices with Geometric Inhomogeneities] // Avtomatizaciya i IT v energetike. 2023. No. 1 (162). Pp. 20–28. (In Russian)
15. *Gracheva E.I., Lazarevich A.S.* Issledovanie teplofizicheskih processov v zamknutyh kontaktah nizkovol'tnyh kommutacionnyh apparatov [Investigation of Thermophysical Processes in Enclosed Contacts of Low-Voltage Switching Devices] // Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Problemy energetiki. 2004. No. 5–6. Pp. 102–106. (In Russian)
16. *Lunev M.K., Fetisov L.V.* Issledovanie teplofizicheskih processov v zamknutyh kontaktah nizkovol'tnyh avtomaticheskih vyklyuchatelej [Study of Thermophysical Processes in Enclosed Contacts of Low-Voltage Circuit Breakers] // Perspektivnye nauchnye issledovaniya: opyt, problemy i perspektivy razvitiya: sb. nauch. st. po materialam VIII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. Ufa, 2022. Pp. 28–33. (In Russian)

Original article submitted 22.04.2025

doi: 10.14498/tech.2025.1.6
EDN: RFKCCH

УДК 621.313

ОПТИМИЗАЦИЯ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ РЕЖИМА ПЕРЕКАЧКИ МАГИСТРАЛЬНОГО НЕФТЕПРОВОДА

Н.А. Носиков[1,2], Ю.А. Макаричев[2]

[1]ТПП «РИТЭК-Самара-Нафта» ООО «РИТЭК»
Россия, 443041, г. Самара, ул. Ленинская, 120А

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

E-mail: nosikovn@yandex.ru, makarichev2801@mail.ru

Аннотация. *Актуальная задача повышения энергоэффективности нефтеперекачивающих станций (НПС) магистральных нефтепроводов (МН) заключается в снижении потребления электроэнергии на перекачку единицы товарной продукции. Обычно эта величина измеряется в кВт·ч на тонну перекачанной нефти. Значение удельных энергозатрат зависит от множества факторов: длины нефтепровода, реологических свойств перекачиваемой нефти, плановых объемов, напора на входе и выходе нефтеперекачивающих станций и др.*

Для отдельно взятого участка магистрального нефтепровода и фиксированного временного периода, обычно в течение месяца, многие из перечисленных параметров изменяются незначительно или остаются постоянными. Например, свойства нефти в течение одного месяца не меняются, так как они определены коммерческим контрактом.

Существенным параметром, определяющим удельное электропотребление, является режим перекачки – режим работы насосных агрегатов, определяющий их производительность и среднюю мощность. В зависимости от технологических задач режимы работы постоянно изменяются в соответствии с заданным графиком. Как правило, нормативными документами задаются несколько фиксированных режимов перекачки. Таких режимов может быть от 5 до 10.

Задача оптимизации режимов перекачки заключается в отыскании минимума функции цели – удельного потребления электроэнергии за один календарный месяц работы трубопровода при условии обеспечения плана перекачки за счет оптимального подбора режимов работы НПС. В статье на примере работы МН АО «Транснефть-Приволга» описан алгоритм и результаты оптимизационного расчета, позволившего получить экономию затрат на электроэнергию при обеспечении заданного объема перекачки нефти.

Ключевые слова: *нефтеперекачивающая станция, электрооборудование, энергоэффективность.*

© Автор(ы), 2025

[1] *Николай Александрович Носиков, главный энергетик – руководитель группы главного энергетика, аспирант кафедры электромеханики и автомобильного электрооборудования.*

Юрий Александрович Макаричев, доктор технических наук, профессор, и.о. декана электротехнического факультета, заведующий кафедрой электромеханики и автомобильного электрооборудования.

Актуальность вопроса

Анализ влияния наиболее важных технологических параметров, характеризующих процесс транспортировки нефти, на потребление электроэнергии основным и вспомогательным оборудованием НПС приведен в [1]. Предложенная в статье математическая модель определяет электропотребление насосных станций в зависимости от объемов перекачиваемой нефти, значения входного и выходного напора в трубопроводе, физических свойств перекачиваемого продукта, а также от режима работы основного и вспомогательных комплексов электрооборудования. Математическая модель позволяет рассчитывать как суммарное потребление электроэнергии НПС, так и ее удельные, на единицу продукции, значения.

Кроме параметров, определенных в [1], нужно в обязательном порядке учесть режимы переключений отдельных насосных агрегатов с целью обеспечения требуемого технологического графика транспортировки нефти. Неизбежные процессы включения-выключения электродвигателей магистральных насосов сопровождаются повышенным потреблением электроэнергии, дополнительной нагрузкой на трансформаторные подстанции и вызывают снижение остаточного ресурса всего задействованного электрооборудования. Исследования, проведенные авторами на основе статистических данных работы НПС «Б. Черниговка» Самарского РНУ АО «Транснефть-Приволга», позволяют заложить основы алгоритма оптимального управления режимами работы НПС и за счет этого снизить удельные показатели расхода электроэнергии на перекачку единицы товарной продукции, что подтверждает важность и актуальность решения поставленной задачи.

Выявление потенциальных возможностей экономии и затрат на электроэнергию невозможно без оптимизации режимов работы НПС и сопряженного с ней участка нефтепровода [2, 5, 9, 11, 12, 14].

Режимы работы эксплуатационного участка нефтепровода

Суммарная установленная мощность электроприводов только одной насосной станции может составлять десятки мегаватт, что определяет годовое потребление электроэнергии в сотни миллионов кВт·час. Однако только часть этой энергии является полезно используемой. Анализ работы магистральных нефтепроводов показывает, что основной причиной, приводящей к перерасходу электроэнергии, является нерациональный выбор режимов работы насосных агрегатов [13, 14]. Регулирование работы насосов на всех НПС направлено на решение технологических задач и, как правило, не учитывает энергетических аспектов транспорта нефти.

В настоящее время регулирование производится несколькими методами. Наиболее часто встречающийся метод – ступенчатое регулирование, осуществляющееся посредством использования нескольких насосов с разными диаметрами рабочих колес. Суть метода заключается в удалении материала рабочего колеса для уменьшения его диаметра выхода D_2. В свою очередь, результатом уменьшения диаметра является снижение напора и производительности насоса [5, 15, 16]. Следовательно, при обточке рабочего колеса кривая характеристики насоса понижается и при некотором значении D_2 будет проходить через заданную режимную точку. У данного способа два очень существенных недостатка: во-первых, он применим только для стационарных режимов перекачки и при из-

менении режима неприменим; во-вторых, процесс обточки рабочего колеса необратим, для восстановления максимальной подачи необходимо иметь несколько рабочих колес с разными диаметрами. Замена рабочего колеса насоса сопряжена с остановкой агрегата и существенными затратами на ремонт, которые могут превысить получаемую выгоду от снижения потребления электроэнергии.

Дросселирование как метод регулирования производительности насосных агрегатов, несмотря на свою простоту, – самый неэффективный по затратам электроэнергии метод. До 10–25 % электроэнергии расходуется на непроизводительную работу агрегатов [17].

Наиболее энергоэффективным способом регулирования производительности насосных агрегатов с приводом от асинхронных и синхронных электродвигателей общепризнанно считается метод частотного регулирования. У этого способа есть много достоинств, включая возможность широкого регулирования производительности насосов, плавного пуска, исключающего гидравлические удары, высокий КПД во всем диапазоне частот. Единственным и основным недостатком метода остается высокая стоимость частотного преобразователя большой мощности, в несколько раз превышающая стоимость приводного электродвигателя [18].

Поэтому основным способом регулирования производительности участка магистрального нефтепровода в настоящее время остается дискретное регулирование за счет включения-отключения насосных агрегатов [18].

Для упорядочения режимов работы разрабатывается карта технологических режимов магистрального трубопровода [19]. В этом документе определяются все допустимые режимы работы насосных агрегатов. Таких режимов может быть несколько, и характеризуются они в зависимости от количества включенных агрегатов различной производительностью и, следовательно, различной мощностью потребляемой электроэнергии. Что важно, при этом меняется и удельная мощность потребления электроэнергии на единицу перекачанной нефти. В табл. 1 приведены в качестве примера данные для пяти режимов МТ «Гурьев – Куйбышев».

Таблица 1

Карта технологических режимов

Показатель	Номер варианта (режима)				
	1	2	3	4	5
P_i, кВт	4585	4086	3380	2710	1042
Производительность, q_i, т/сут	45504	43728	39420	32760	21840
Удельный показатель электропотребления, S_i, кВт·час/т	2,418	2,243	2,058	1,985	1,145

Производительность режимов изменяется с 21840 до 45504 т/сутки, а удельное потребление электроэнергии в этих режимах различается в 2,11 раза.

Задача представляемого исследования – при анализе непроизводительных потерь электроэнергии выяснить требуемое время наработки эксплуатационного участка магистрального трубопровода на каждом режиме и на этой основе определить оптимальное время наработки между переключениями и их необходимое количество по критерию минимума потребляемой электроэнергии с учетом графика прокачки нефти.

Допущения и ограничения, принятые при решении задачи

Допущения, принятые при решении оптимизационной задачи, были приняты на основании данных, приведенных в [4, 19, 20].

1. Анализируемый период – один месяц (29 суток, так как одни или двое суток резервируются на остановку МН для планового ремонта и профилактики оборудования).

2. Период дискретизации – одни сутки.

3. Физические свойства перекачиваемой нефти – определены коммерческим контрактом и в течение исследуемого периода неизменны.

4. За расчетную мощность принята средняя мощность агрегатов за сутки.

5. Мощность вспомогательного оборудования НПС в расчетах не учитывается. Учитывается только мощность основного электрооборудования по перекачке товарного продукта [1].

Обоснованность последнего допущения доказана в [1] и основывается на обработке данных по типовой НПС за два периода работы: 2003–2006 гг. – полная загрузка, 2021–2023 гг. – частичная загрузка станций.

Любая задача оптимизации связана с ограничениями, накладываемыми на варьируемые переменные и их соотношение. В рассматриваемой задаче были приняты следующие ограничения.

Первое определяется равенством (1)

$$t_1 + t_2 + ... + t_n = T, \quad (1)$$

где t_1, t_2, ..., t_n – время работы для 1, 2, … n-го режима соответственно, сутки; T – отчетный период времени работы нефтепровода, сутки.

Второе ограничение определяется месячной программой объема перекачки нефти

$$q_1 t_1 + q_2 t_2 + ... + q_n t_n = Q, \quad (2)$$

где q_1, q_2, ..., q_n – расход 1, 2, … n-го периодов соответственно, тыс. т/сутки; Q – требуемый объем перекачки за отчетный период времени, тыс. т.

Следующее ограничение связано с максимально допустимой мощностью установленного оборудования $p_{\max}$ для данного участка МН. Средняя мощность для каждого режима p_i не должна превышать значения максимальной установленной мощности

$$p_i \le p_{\max}. \quad (3)$$

Учитывалось ограничение, связанное с максимальным количеством «горячих» и «холодных» пусков двигателей насосов под нагрузкой в единицу времени, определенное инструкцией по эксплуатации электродвигателя.

Критерий оптимальности и варьируемые факторы

В соответствии с выбранной целью исследования, заключающейся в минимизации непроизводительных расходов электроэнергии, главным параметром, характеризующим эту цель количественно, является расход электроэнергии на единицу товарной продукции, а *критерием оптимальности* – минимум этого параметра:

$$p_1 t_1 / q_1 + p_2 t_2 / q_2 + ... + p_n t_n / q_n = Э_{расч.} / Q \to \min, \quad (4)$$

где p_1, p_2, ..., p_n – расход 1, 2, … n-го режима соответственно, кВт; $Э_{расч.}$ – расчетный расход электроэнергии, кВт·час.

В качестве *варьируемых переменных* в исследовании предложено выбрать время работы агрегатов $t_1,\ t_2,\ldots,\ t_n$ для 1, 2, … n-го режимов, сутки в месяц, и соответствующие им значения средней мощности S_i, кВт·час/т.

Алгоритм поиска экстремума целевой функции

Варьируемые переменные $t_1,\ t_2,\ldots,\ t_n$ в поставленной задаче могут принимать целочисленные значения от 0 до 29. Значение $t_i = 0$ означает, что i-тый режим в течение исследуемого периода не применяется ни одного раза.

Количество всех возможных сочетаний определяется известным выражением [3]

$$N = p^k = 30^5 = 24.3 \cdot 10^6 . \qquad (5)$$

Такое количество вариантов исследовать весьма проблематично. Но с учетом ограничения (2) это число значительно сокращается. Если равенство (2) задать абсолютно строгим, то множество (4) может оказаться вообще пустым. Поэтому вместо строгого равенства (2) было предложено условие, которое заключалось в том, что отклонение расчетного объема перекачиваемой нефти от заданного контрактом Q_k не должно превышать наперед заданной величины $e_{\%}$:

$$\Delta Q_{\%} \le e_{\%},$$

где

$$\Delta Q_{\%} = \frac{\left(q_1 \cdot t_1 + q_2 \cdot t_2 + q_3 \cdot t_3 + q_4 \cdot t_4 + q_5 \cdot t_5 - Q_k\right) \cdot 100}{Q_k}. \qquad (6)$$

При такой постановке задачи число возможных сочетаний режимов работы, обеспечивающих заданную точность, значительно сокращается. Так, если $e_{\%} = 0.5\,\%$, то число вариантов, отвечающих условиям (1) и (6), сокращается до 1276. Следует отметить, что 0.5% от планового показателя объема месячной перекачки составляет 2,5 тыс. т – примерно двадцатую часть средней суточной производительности МН. В этом случае неточность обеспечения заданной месячной производительности МН корректируется сокращением или добавлением 1–2 часов работы в резервный день.

Для такого количества «испытаний» (расчетов) по математической модели и последующего анализа полученных результатов рационально применить метод упорядоченного перебора с последующим ранжированием значений параметра оптимизации. Современные компьютерные программы легко позволяют это сделать.

Алгоритм отбора всех удовлетворяющих условиям постановки задачи режимов представлен на рис. 1.

Задача оптимизации в общем виде ставилась как задача выбора из множества допустимых альтернативных вариантов подмножества оптимальных решений, среди которых в дальнейшем определялся окончательный оптимальный режим переключений агрегатов, обеспечивающий минимум потребления электроэнергии на единицу объема перекачанной нефти.

Подмножество всех вариантов сочетаний режимов экспортировалось из программы MatchCad в Excel в виде неупорядоченного массива данных о 1276 вариантах, в которые входили:

– количество суток работы для каждого режима $t_1,\ t_2,\ldots,\ t_5$;

– расчетная производительность за месяц Q, т;

– отклонение расчетной месячной производительности от заданной, $\Delta Q_{\%}$;

– затраты электроэнергии для каждого варианта режимов Э, кВт·час;

– значение экономии электроэнергии в сравнении с фактическим за исследуемый месяц ΔЭ, кВт·час и %.

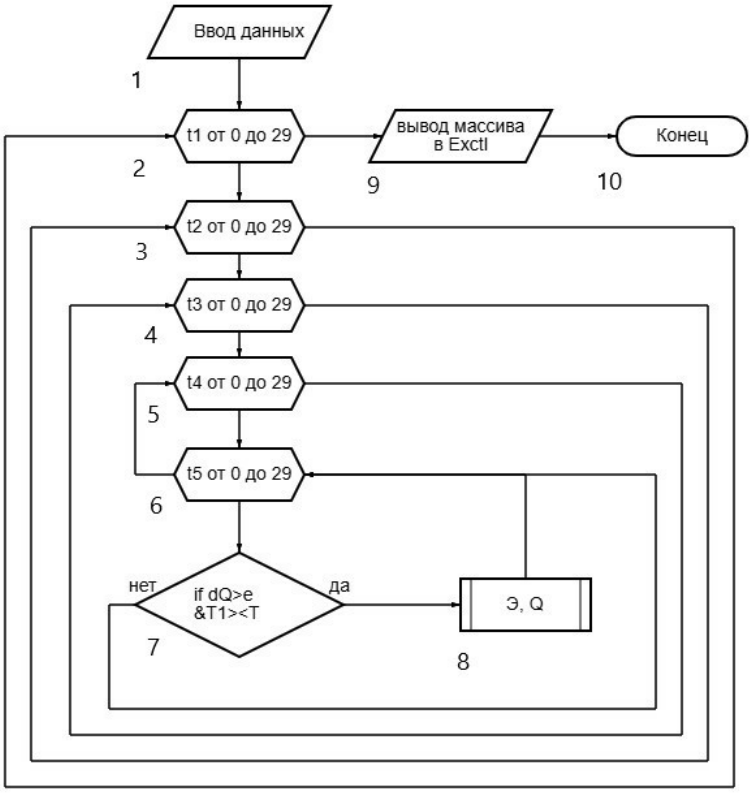


Рис. 1. Алгоритм метода упорядоченного перебора:

1 – блок ввода исходных данных и констант; 2…6 – вложенные циклы перебора всех возможных сочетаний периодов работы каждого технологического цикла; 7 – проверка ограничения по отклонению суммарной производительности от заданного значения и проверка условия (6), в случае нарушения одного из этих ограничений вариант отклоняется и расчет переходит к следующему варианту; 8 – подпрограмма расчета потребного месячного энергопотребления Э, кВт·час; 9 – вывод массива расчетных данных в Excel для дальнейшей обработки

Результаты решения оптимизационной задачи

Как отмечалось выше, в качестве объекта оптимизации был выбран участок магистрального нефтепровода «Гурьев – Куйбышев» системы ПАО «Транснефть» проектной мощностью 17,5 млн т/год. Статистические данные выбраны за один из типичных месяцев исследуемого периода, когда трубопровод работал на 47 % от проектной мощности. Оптимизационный расчет проводился для этого коэффициента загрузки МН.

За месяц по исследуемому участку МН было перекачано согласно коммерческому плану $Q = 1027760$ т нефти.

Фактическое энергопотребление составило $Э_{факт} = 2004478$ кВт·час.

Задачей оптимизации было найти такое соотношение режимов работы из пяти допустимых картой технических режимов, при котором расчетное потребление электроэнергии будет меньше $Э_{факт}$, а в общем случае будет минимальным.

В электронных таблицах Excel данные массива всех возможных вариантов режимов перекачки были структурированы в порядке убывания величины расчетной экономии электроэнергии за месяц ΔЭ, кВт·час. Из 25 лучших вариантов 23 дают по сравнению с фактическим расходом электроэнергии за исследуемый месяц экономию от 2 158 до 44 782 кВт·час (0,11–2,23 %). Варианты, начиная с 24-го и далее, экономии энергии не дают.

Для более детального анализа в электронных таблицах были рассчитаны дополнительные параметры режимов перекачки.

В табл. 2 приведены структурированные данные по объемам перекачки для 12 лучших по энергоэффективности вариантов с учетом объема перекачки каждого из пяти режимов за расчетное количество суток $q_i \cdot t_i$.

В итоговых столбцах таблицы даны значения дефицита/профицита месячного плана перекачки в тоннах ΔQ и процентах $\Delta Q_{\%}$.

Отметим, что профицит месячной производительности в 976 т соответствует только одному варианту № 10. Для остальных вариантов недовыполнение программы перекачки составляет от 1376 до 10040 т.

Для того чтобы компенсировать недовыполнение плана перекачки, например для варианта № 3 в 10 040 т, потребуется работа агрегатов МН в режиме № 1 в течение 5 часов в резервные сутки, что, как правило, нежелательно, хотя и допустимо, по технологическим причинам.

На диаграмме рис. 2 в виде столбцов с накоплением показана структура перекачки для первых 12 вариантов режимов. Каждая часть столбца соответствует номеру режима (с 1 по 5 снизу вверх) в сутках, умноженному на мощность соответствующего режима. Весь столбец соответствует месячному объему перекачки для заданного варианта.

Из диаграммы видно, что суммарный объем перекачки – полная высота столбцов – меняется в пределах наперед заданной погрешности 0,5 %.

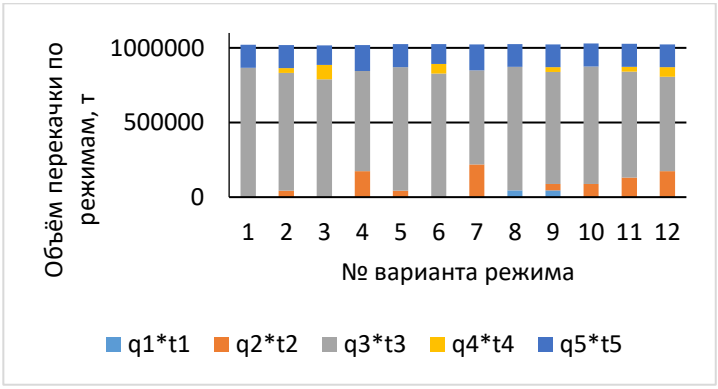


Рис. 2. Диаграмма объемов перекачки для лучших вариантов режимов по экономии электроэнергии

Таблица 2

Производительность МН для отдельных режимов работы

№	t_1, сут	$q_1 \cdot t_1$, т	t_2, сут	$q_2 \cdot t_2$, т	t_3, сут	$q_3 \cdot t_3$, т
1	0	0	0	0	22	867 240
2	0	0	1	43 728	20	788 400
3	0	0	0	0	20	788 400
4	0	0	4	174 912	17	670 140
5	0	0	1	43 728	21	827 820
6	0	0	0	0	21	827 820
7	0	0	5	218 640	16	630 720
8	1	45 504	0	0	21	827 820
9	1	45 504	1	43 728	19	748 980
10	0	0	2	87 456	20	788 400
11	0	0	3	131 184	18	709 560
12	0	0	4	174 912	16	630 720

№	t_4, сут	$q_4 \cdot t_4$, т	t_5, сут	$q_5 \cdot t_5$, т	Q, т	ΔQ, т	ΔQ, %
1	0	0	7	152880	1 020 120	–7640	–0.74
2	1	32 760	7	152880	1 017 768	–9992	–0.97
3	3	98 280	6	131040	1 017 720	–10040	–0.98
4	0	0	8	174720	1 019 772	–7988	–0.78
5	0	0	7	152880	1 024 428	–3332	–0.32
6	2	65 520	6	131040	1 024 380	–3380	–0.33
7	0	0	8	174720	1 024 080	–3680	–0.36
8	0	0	7	152880	1 026 204	–1556	–0.15
9	1	32 760	7	152880	1 023 852	–3980	–0.38
10	0	0	7	152880	1028736	976	0.09
11	1	32760	7	152880	1026384	–1376	–0.13
12	2	65520	7	152880	1024032	–3728	–0.36

На приведенной диаграмме можно проследить структуру потребления электроэнергии для каждого варианта перекачки.

Так, например, для первого варианта графика перекачки 22 суток участок работает по третьему режиму перекачки и 7 суток по пятому режиму (см. табл. 2). Для этого варианта потребуется всего два переключения режима, учитывая включение на режим № 3 в начале периода. Для других вариантов из представленной выборки минимальное количество переключений колеблется от 3 до 5. Заметим, что это минимально необходимое количество переключений режимов. На практике это количество из-за непредвиденных факторов (технологических, экономических, аварийных) может быть значительно больше.

На диаграмме рис. 3 показано соотношение экономии электроэнергии для рассматриваемых режимов ΔЭ % и величины дефицита/профицита прокачанной нефти ΔQ %.

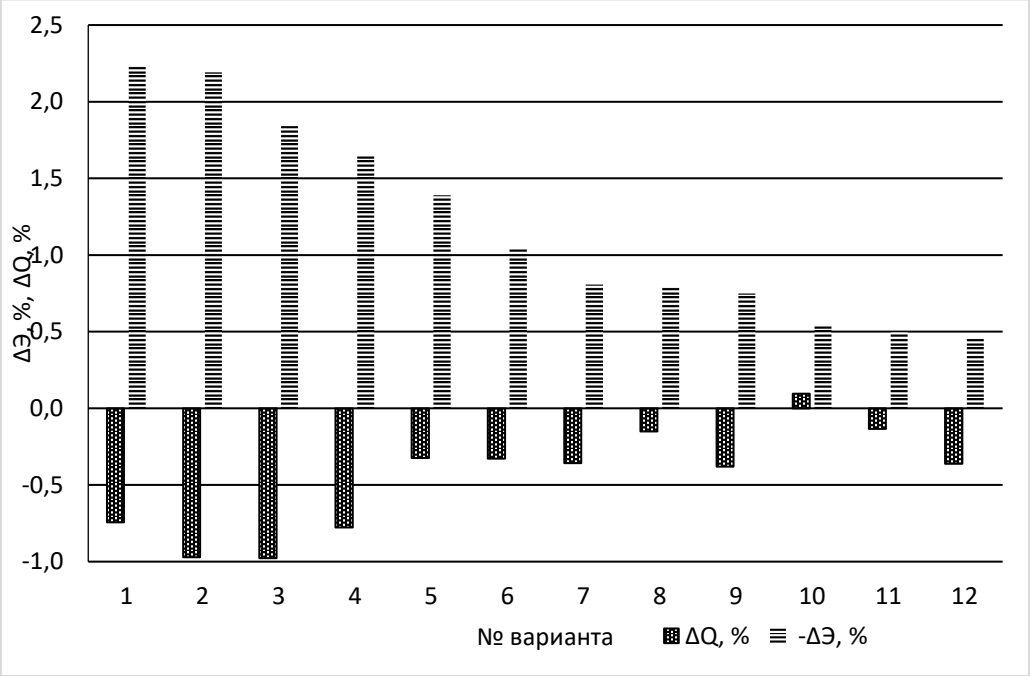


Рис. 3. Соотношение экономии электроэнергии и разницы расчетного и планового объема перекачки

За базовое значение объема перекачки принято плановое задание на исследуемый период $Q = 1027760$ т, а за базовое значение по расходу электроэнергии $Э_{факт} = 2004478$ кВт·час.

В результате оптимизации режимов перекачки для заданных условий, соответствующих заданию по участку МН «Гурьев – Куйбышев» системы ПАО «Транснефть», был получен вариант управления режимами, позволяющий сэкономить 44 782 кВт·час электроэнергии, расходуемой на основной технологический процесс. По сравнению с фактическим расходом электроэнергии экономия составляет 2,24 %. Кроме этого, полученный расчетный вариант требует в идеале только двух переключений режимов перекачки, что значительно снижает динамические нагрузки на питающую сеть и сами электродвигатели магистральных насосов, повышая их ресурс и надежность.

По удельному показателю расхода электроэнергии на тонну перекачанного продукта оптимальный вариант позволяет снизить расход электроэнергии с $q_{факт} = 1.95$ кВт·час/т до $q_{опт} = 1.906$ кВт·час/т (-2.22).

Основные результаты и выводы

1. Основную часть расхода электроэнергии, 93–97 %, составляет электроэнергия, затраченная на основной технологический процесс МН – на работу электродвигателей магистральных насосов. От времени работы на определенном

режиме и количества переключений зависит общий расход электроэнергии. Набор допустимых режимов определен картой технологических режимов.

2. В большинстве случаев можно обеспечить заданную программу перекачки без излишних дополнительных переключений между насосными агрегатами и за счет этого снизить расход электроэнергии и повысить ресурс работы оборудования.

3. В качестве основного критерия оптимальности режимов переключения насосных агрегатов был выбран минимум расхода электроэнергии на единицу перекачиваемой продукции q, кВт·час/т. Дополнительным критерием выступал минимум количества переключений насосных агрегатов, обеспечивающий программу перекачки.

4. Оптимизация режимов работы агрегатов и количества их переключений свелась к упорядоченному перебору 1 276 расчетных вариантов, обеспечивающих заданную программу перекачки с точностью 0,5 %. Из полученного массива вариантов были отобраны 25, в которых расход электроэнергии оказался минимальным.

5. За оптимальный принят вариант перекачки № 1, в котором расчетный расход электроэнергии был снижен по сравнению с фактическим для выбранного периода эксплуатации на 44 782 кВт·час (2,24 %). Этот вариант режима обеспечивается всего тремя переключениями насосных агрегатов, что является лучшим показателем для исследуемой выборки и на порядок меньше фактического количества переключений за исследуемый период эксплуатации участка МНП. Для оптимального варианта удельный расход электроэнергии на единицу перекачиваемого продукта составил 1,906 кВт·час/т, что на 2,22 % меньше, чем удельный фактический расход за исследуемый период.

6. Предложенная методика оптимизации режима работы нефтепровода на заданный период позволяет выбрать требуемый режим работы с минимальными затратами электроэнергии. Методику рекомендуется использовать при составлении месячных планов работы магистрального нефтепровода и прогнозировании величины потребления электроэнергии для выполнения этих планов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Макаричев Ю.А., Носиков Н.А.* Математическая модель потребления электроэнергии на НПС // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2024. Т. 32, № 4. С. 106–117. DOI: 10.14498/TECH.2024.4.8. EDN:JMVDFB
2. *Geunsub Kim, Gunwoo Lee, Seunghyun An, Joowon Lee.* Forecasting future electric power consumption in Busan New Port using a deep learning model // The Asian Journal of Shipping and Logistics. 2023. Vol. 39, Iss. 2. Pp. 78–93. DOI: 10.1016/j.ajsl.2023.04.001. EDN: BKTIVT
3. *Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В.* Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1976. 278 с. EDN: TOBZDM
4. АО «Транснефть-Приволга». Годовой отчет за 2023 год.
5. *Зайцев Л.А., Ясинский Г.С.* Регулирование режимов магистральных нефтепроводов. М.: Недра, 1980. 187 с.
6. *Рахмонов И.У., Ушаков В.Я., Нажимова А.М., Обидов К.К., Сулейманов С.Р.* Математическое моделирование минимизации расходов электроэнергии промышленными предприятиями с непрерывным характером производства // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2024. Т. 335, № 4. С. 43–51. DOI: 10.18799/24131830/2024/4/4423. EDN: GTEVCP
7. ОАО «Приволжскнефтепровод». Годовой отчет за 2006 год.
8. ОР-91.140.50-КТН-0397-24. Магистральный трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов. Потребление электроэнергии (мощности). Порядок планирования и учета. М.: ПАО «Транснефть», 2024. 141 с.

9. *Устюгов Н.В., Проталинский О.М.* Математическая модель потребления электроэнергии в организационно-технической системе // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2020. № 3. С. 116–124. DOI: 10.24143/2072-9502-2020-3-116-124. EDN: XAIKPX
10. *Черноруцкий И.Г.* Методы принятия решений. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 408 с. EDN: QQIXNX
11. *Шаюхов Т.Т.* Расчет удельных норм и прогнозирование электропотребления на промышленных предприятиях. Екатеринбург: УрГУПС, 2016. 74 с. (Инновационный транспорт; № 3 (21)). DOI: 10.20291/2311-164X-2016-3-8-12. EDN: WXOVQX
12. *Шаюхов Т.Т.* Математическое моделирование влияния внешних факторов на параметры электропотребления // Интернет-журнал «Науковедение». 2017. Т. 9, № 5. EDN: YKWHDE
13. *Шалай В.В., Мызников М.О., Кононова М.И.* Пути повышения эффективности эксплуатации нефтепроводов // Нефтегазовый терминал. 2019. № 16. С. 315–319. EDN: OQDUQT
14. *Shalay V.V., Myznikov M.O., Gildebrandt M.I.* Energy and resource saving in hydrocarbons transportation // AIP Conference Proceedings. 2018. Vol. 2007. DOI: 10.1063/1.5051957. EDN: YCAOEH
15. *Ломакин Д.А., Коротков В.В.* Корректировка характеристик центробежных насосов за счет подрезки рабочего колеса // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2017. EDN: YIXEQT
16. *Зайцев Л.А., Ясинский Г.С.* Регулирование режимов магистральных нефтепроводов. М.: Недра, 1980. 187 с.
17. *Разбойников А.А., Барсуков Н.С.* Разработка методики оценки энергетической эффективности магистрального нефтепровода // Экспозиция Нефть Газ. 2019. № 2 (69). 5 с. DOI: 10.24411/2076-6785-2019-10018. EDN:JMKLKE
18. *Васильев Г.Г., Коробков Г.Е., Коршак А.А. и др.* Трубопроводный транспорт нефти: В 2 т. / Под ред. С.М. Вайнштока. М.: Недра-Бизнесцентр, 2002. Т. 2. 621 с. EDN: VSGPJP
19. АО «Транснефть-Приволга». Карта технологических режимов работы МТ «Гурьев – Куйбышев» (ТУ «Б. Черниговка – Самара»).
20. АО «Транснефть-Приволга». Отчет «Соблюдение режима работы МН «Узень-Атырау-Самара» (технологического участка «Атырау-Самара») за 2021–2023 гг».

Статья поступила в редакцию 11.04.2025

doi: 10.14498/tech.2025.1.6

OPTIMIZATION OF ENERGY SAVING MODE PUMPING OF THE MAIN OIL PIPELINE

N.A. Nosikov[1,2], Yu.A. Makarichev[2]

[1] TPP «RITEK-Samara-Nafta» LLC «RITEK»
120A, Leninskaya st., Samara, 443041, Russian Federation

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

E-mail: nosikovn@yandex.ru, makarichev2801@mail.ru

Abstract. *The current task of increasing the energy efficiency of oil pumping stations (OPS) of main oil pipelines (MOP) is to reduce the consumption of electricity for pumping a unit of commercial product. Usually, this value is measured in kW*hours per ton of pumped oil. The value of specific energy consumption depends on many factors: the length of the oil pipeline, the rheological properties of the pumped oil, planned volumes, the pressure at the inlet and outlet of the oil pumping stations, and many other parameters.*
For a separate section of the main oil pipeline and a fixed time period, usually during a month, many of the listed parameters change insignificantly or remain constant. For example, the properties of oil do not change during one month, since they are determined by a commercial contract.
An essential parameter determining specific power consumption is the pumping mode – the operating mode of the pumping units, determining their productivity and average power. Depending on the technological tasks, the operating modes are constantly changing in accordance with the specified schedule. As a rule, regulatory documents specify several fixed pumping modes. There can be from 5 to 10 such modes.
The task of optimizing pumping modes is to find the minimum of the objective function - specific electricity consumption for one calendar month of pipeline operation, provided that the pumping plan is met by optimally selecting the operating modes of the pumping station. The article describes the algorithm and results of the optimization calculation using the example of the operation of the «Transneft-Privolga» JSC oil pumping station, which made it possible to save on electricity costs while ensuring a given volume of oil pumping.

Keywords*: oil pumping station, electrical equipment, energy efficiency.*

REFERENCES

1. *Makarichev Yu.A., Nosikov N.A.* Matematicheskaya model potrebleniya elektroenergii na NPS [Mathematical model of electricity consumption at the oil pumping station] // Vestnik Samarskogo gosudarstsvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki. 2024. V. 32, No. 4. Pp. 106–117. DOI: 10.14498/TECH.2024.4.8. (In Russian)

© The Author(s), 2025

[1] *Nikolay A. Nosikov, Chief Power Engineer – Head of the Chief Power Engineers Group, Postgraduate Student, Dept. of Electromechanics and Automotive Electrical Equipment.*
Yuriy A. Makarichev (Dr. Sci. (Techn.)), Professor, Acting Dean of the Electrical Engineering Faculty, Head Dept. of Electromechanics and Automotive Electrical Equipment.

2. *Geunsub Kim, Gunwoo Lee, Seunghyun An, Joowon Lee*. Forecasting future electric power consumption in Busan New Port using a deep learning model // The Asian Journal of Shipping and Logistics. 2023. Vol. 39, Iss. 2. Pp. 78–93. DOI: 10.1016/j.ajsl.2023.04.001.
3. *Adler Yu.P., Markova E.V., Granovskij Yu.V.* Planirovanie eksperimenta pri poiske optimalnyh uslovij [Experimental planning in the search for optimal conditions]. M.: Nauka, 1976. 278 p. (In Russian)
4. JSC Transneft-Privolga, annual report for 2023. (In Russian)
5. *Zajcev L.A., YAsinskij G.S.* Regulirovanie rezhimov magistralnyh nefteprovodov [Regulation of trunk oil pipeline modes]. M.: Nedra, 1980. 187 p. (In Russian)
6. *Rahmonov I.U., Ushakov V.Ya., Nazhimova A.M., Obidov K.K., Sulejmanov S.R.* Matematicheskoe modelirovanie minimizacii raskhodov elektroenergii promyshlennymi predpriyatiyami s nepreryvnym harakterom proizvodstva [Mathematical modeling of minimizing electricity costs by industrial enterprises with continuous production] // Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov. 2024. V. 335, No. 4. Pp. 43–51. DOI: 10.18799/24131830/2024/4/4423. (In Russian)
7. JSC Privolzhsknefteprovod annual report for 2006. (In Russian)
8. OR-91.140.50-KTN-0397-24. Magistralnyj truboprovodnyj transport nefti i nefteproduktov. Potreblenie elektroenergii (moshchnosti). Poryadok planirovaniya i ucheta [Main pipeline transportation of oil and oil products. Electricity (capacity) consumption. Planning and accounting procedure]. M.: PAO Transneft, 2024. 141 p. (In Russian)
9. *Ustyugov N.V., Protalinskij O.M.* Matematicheskaya model potrebleniya elektroenergii v organizacionno-tekhnicheskoj sisteme [Mathematical model of electricity consumption in an organizational and technical system] // Vestnik Astrahanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika. 2020. No. 3. Pp. 116–124. DOI: 10.24143/2072-9502-2020-3-116-124. (In Russian)
10. *Chernoruckij I.G.* Metody prinyatiya reshenij [Decision-making methods]. SPb.: BHV-Peterburg, 2005. 408 p. (In Russian)
11. *Shayuhov T.T.* Raschet udelnyh norm i prognozirovanie elektropotrebleniya na promyshlennyh predpriyatiyah [Calculation of specific standards and forecasting of electricity consumption at industrial enterprises]. Ekaterinburg: UrGUPS, 2016. 74 p. (Innovacionnyj transport; No. 3 (21)). DOI: 10.20291/2311-164X-2016-3-8-12. (In Russian)
12. *Shayuhov T.T.* Matematicheskoe modelirovanie vliyaniya vneshnih faktorov na parametry elektropotrebleniya [Mathematical modeling of the influence of external factors on electricity consumption parameters] // Internet-zhurnal «Naukovedenie». 2017. V. 9, No. 5. (In Russian)
13. *Shalaj V.V., Myznikov M.O., Kononova M.I.* Puti povysheniya effektivnosti ekspluatacii nefteprovodov [Ways to improve the efficiency of oil pipeline operation] // Neftegazovyj terminal. 2019. No. 16. Pp. 315–319. (In Russian)
14. *Shalay V.V., Myznikov M.O., Gildebrandt M.I.* Energy and resource saving in hydrocarbons transportation // AIP Conference Proceedings. 2018. Vol. 2007. DOI: 10.1063/1.5051957.
15. *Lomakin D.A., Korotkov V.V.* Korrektirovka harakteristik centrobezhnyh nasosov za schyot podrezki rabochego kolesa [Adjustment of centrifugal pump characteristics by trimming the impeller. Actual problems of humanitarian and natural sciences] // Aktualnye problemy gumanitarnyh i estestvennyh nauk. 2017. (In Russian)
16. *Zajcev L.A., Yasinskij G.S.* Regulirovanie rezhimov magistral'nyh nefteprovodov [Regulation of main oil pipeline modes]. M.: Nedra, 1980. 187 p. (In Russian)
17. *Razbojnikov A.A., Barsukov N.S.* Razrabotka metodiki ocenki energeticheskoj effektivnosti magistralnogo nefteprovoda [Development of a methodology for assessing the energy efficiency of a trunk oil pipeline] // Ekspoziciya Neft Gaz. 2019. No. 2 (69). 5 p. DOI: 10.24411/2076-6785-2019-10018. (In Russian)
18. *Vasilev G.G., Korobkov G.E., Korshak A.A. i dr.* Truboprovodnyj transport nefti [Oil pipeline transportation]: V 2 t. / Pod red. S.M. Vajnshtoka. M.: Nedra-Biznescentr, 2002. V. 2. 621 p. (In Russian)
19. JSC «Transneft-Volga Region» map of technological operating modes of the Guryev-Kuibyshev MT (TU B. Chernigovka – Samara).
20. PJSC «Transneft-Volga Region». Report «Compliance with the Operating Regime of the Uzen-Atyrau-Samara Pipeline (Atyrau – Samara Section) for 2021–2023».

Original article submitted 11.04.2025

doi: 10.14498/tech.2025.1.7
EDN: IZNLWI

УДК 621.316.11

ВОЗМОЖНОСТИ ОРГАНИЗАЦИИ НЕПРЕРЫВНОГО ИНСТРУМЕНТАЛЬНО-РАСЧЕТНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ 20–0,4 КВ НА ОСНОВЕ КОНЦЕПЦИИ ТЕПЛОВЫХ ИМПУЛЬСОВ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ

Л.К. Осика[1]

Национальный исследовательский университет «МЭИ»
Россия, 111250, г. Москва, Красноказарменная, 14, стр.1

E-mail: osikalk@yandex.ru

Аннотация. *Анализируется состояние вопроса определения потерь электроэнергии в электрических сетях распределительного сетевого комплекса РФ на основе показаний приборов учета электрической энергии. Установлено, что имеются все организационные и технологические предпосылки для непрерывного расчета потерь в линиях электропередачи и трансформаторах по данным счетчиков и средств измерений тока и напряжения с целью наиболее точного их учета за любой отчетный период и разработки (контроля) балансов электроэнергии. Предложен инструментально-расчетный подход определения потерь, основанный на концепции тепловых импульсов тока и напряжения, который может быть реализован в интеллектуальных приборах учета и на верхнем уровне систем контроля и управления электрических сетей.*

Ключевые слова: *потери электрической энергии, непрерывный расчет потерь, тепловые импульсы тока и напряжения, линия электропередачи, трансформатор, объект электросетевого хозяйства, схемы замещения линий электропередачи и трансформаторов, системы контроля и управления электрических сетей.*

Введение

Проблема определения и анализа потерь электроэнергии в электрических сетях до настоящего времени остается одной из самых актуальных с практической и теоретической точек зрения [1]. Существующие методы решения этой проблемы [1–4] хотя и соответствуют требованиям регулирующих органов и нашли отражение в действующих нормативных документах[2], пока не могут удовлетворить все заинтересованные стороны ни по точности, ни по оперативности, ни по единству подходов для объектов электросетевого хозяйства различных классов напряжений, так как их применение приводит к искажениям (как правило, в сторону увеличения) тарифов на услуги по передаче электроэнергии, а также дис-

© Автор(ы), 2025

[1] *Лев Константинович Осика, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электроэнергетических систем.*

[2] Приказ Министерства энергетики РФ от 30 декабря 2008 г. № 326 «Об организации в Министерстве энергетики Российской Федерации работы по утверждению нормативов технологических потерь электроэнергии при ее передаче по электрическим сетям» (с приложениями).

петчерской и хозяйственной отчетности. Кроме того, эти методы вообще не пригодны для сведения оперативных балансов электроэнергии и выявления очагов технических и коммерческих потерь в процессе оперативно-диспетчерского и оперативно-технологического управления.

Это связано с несколькими обстоятельствами, носящими как объективный, так и субъективный характер. Во-первых, имеет место принципиальное ограничение методологии инструментального (путем выполнения только измерений электроэнергии) определения потерь в объектах электросетевого хозяйства и в участках сети (контролируемых кластерах) вследствие того, что результат прямого измерения потерь активной электроэнергии по своему значению близок к погрешности измерений [5, 6]. Во-вторых, в электрических сетях недостаточно средств измерений (счетчиков, измерителей мощности, амперметров, вольтметров с функциями передачи информации) для объективной оценки величины потерь за различные временные периоды эксплуатации: онлайн (с дискретностью, сопоставимой с периодом получения данных от этих приборов); час, сутки, месяц, год [6, 7]. В-третьих, при оснащении приборами учета объектов электросетевого хозяйства зачастую в этих средствах измерений отсутствует или не реализуется функция «расчет потерь», которая могла бы быть использована при определении потерь в целом в сети электросетевой компании. В-четвертых, различная степень оснащенности контролируемых кластеров средствами измерений и (или) обобщенными расчетными данными в случае отсутствия их достаточного числа затрудняет унификацию, а следовательно, и обеспечение одинаковой степени точности расчетов в этих кластерах. В-пятых, в существующих АСУ ТП (SCADA) нет модуля, позволяющего в автоматическом или автоматизированном режиме рассчитывать потери в сети на основе результатов измерений и расчетов за требуемый промежуток времени [8, 9], вплоть до режима «псевдо онлайн». Под последним будем понимать период обновления информации на средствах ее отображения для целей диспетчерского управления.

В то же время современное состояние парка измерительного оборудования для коммерческого и технического учета электроэнергии, широкое внедрение мощных систем SCADA (АСУ ТП, АСДТУ) и высокоэффективных средств передачи информации в электросетевых компаниях, а также наличие в России достаточной номенклатуры интеллектуальных приборов учета, в том числе с функцией расчета потерь, создают благоприятные предпосылки для организации непрерывного определения потерь электроэнергии в объектах электросетевого хозяйства на унифицированной методической основе с высокой степенью автоматизации измерений и расчетов.

В ПАО «Россети» проделана большая работа по типизации технических решений подстанций распределительной сети, предусматривающих установку современных средств измерений [10], а также по внедрению пунктов коммерческого учета электроэнергии (ПКУ) [11] .

Целью данной статьи является разработка методологии решения проблемы непрерывного инструментально-расчетного определения потерь электроэнергии в распределительных сетях 20–0,4 кВ вплоть до вводно-распределительных устройств (ВРУ) многоквартирных домов (МКД) и отдельных зданий на основе концепции тепловых импульсов, а также рекомендаций по ее реализации в существующих системах оперативного и технологического контроля и управления в распределительном электросетевом комплексе.

Концепция расчетно-инструментального определения потерь в электрической сети на основе вычисления тепловых импульсов тока и напряжения

Известно [12], что в основу современной электротехники положены понятия действующих значений гармонических тока I и напряжения U за период T:

$$I = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T i^2(t)\,dt}\,, \tag{1}$$

$$U = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T u^2(t)\,dt}\,, \tag{2}$$

где $i(t)$ и $u(t)$ – соответственно мгновенные значения тока и напряжения в произвольный момент t.

В общем случае под T понимается не только период «истинно» периодической гармонической функции, но и любой произвольный интервал времени непериодической или периодической функции, которой присвоено название «период». Назовем его фиктивным периодом $T_Ф$.

Активной мощностью называется среднее за время $T(T_Ф)$ значение функции [12]

$$P = \frac{1}{T}\int_0^T u(t)i(t)\,dt\,.$$

Отсюда для гармонического тока с частотой ω при фазовом сдвиге между током и напряжением φ

$$P = UI\cos\varphi\,.$$

Также известно, что мгновенная мощность, выделяющаяся в активном сопротивлении r в виде теплоты путем теплообмена с окружающей средой или в виде электромагнитного излучения (пренебрежимо малого при низких частотах электрического тока[1]), равна

$$p_r(t) = u(t)i_r(t) = ri_r^2(t)\,. \tag{3}$$

Применяя принцип дуальности электрической цепи, получим, что мгновенная мощность, выделяющаяся в активной проводимости g в виде теплоты,

$$p_g(t) = u(t)i_g(t) = gu_g^2(t)\,. \tag{4}$$

Назовем $p_r(t)$, $p_g(t)$ мгновенными *потерями мощности* (если не принимать во внимание термический эффект тока в целях получения тепловой энергии).

Следовательно, I и U равны таким постоянным току и напряжению, которые, будучи приложены к r и g, за время $T(T_Ф)$ выделяют то же количество теплоты, что и соответственно $i(t)$ и $u(t)$. Поэтому в (1), (2) они формально рассчитываются исходя из интегрирования по времени в пределах от 0 до T мгновенных потерь мощности в $r = 1$ Ом и $g = 1$ См, то есть имеют смысл *по-*

[1] В дальнейшем мощность излучения учитываться не будет.

терь электроэнергии за время $\Delta t = T$ в сопротивлении и проводимости, значения которых равны единицам измерений соответствующих величин.

Для прикладных целей оценки термического действия тока при коротких замыканиях (КЗ) в кабельных и воздушных линиях электропередачи используется понятие интеграла Джоуля $B_{\text{тер}}$ (ГОСТ 30323 / ГОСТ Р 50524), который также называют тепловым импульсом тока КЗ:

$$B_{\text{тер}} = B_{\text{тер}}\left(t_{\text{откл}}\right) = \int_0^{t_{\text{откл}}} i_{\text{к}}^2\left(t\right)dt\,, \tag{5}$$

где $i_{\text{к}}\left(t\right)$ – ток КЗ в момент времени t; $t_{\text{откл}}$ – расчетная продолжительность КЗ в электроустановке.

Если сравнить (5) с (1) и (2), то можно сделать вывод, что квадраты действующих значений I и U равны средним за время T соответствующим интегралам Джоуля «по току» $B_{i\text{тер}}\left(T\right)$ и «по напряжению» $B_{u\text{тер}}\left(T\right)$, или

$$I = \sqrt{\frac{1}{T}B_{i\text{тер}}\left(T\right)}\,, \tag{6}$$

$$U = \sqrt{\frac{1}{T}B_{u\text{тер}}\left(T\right)}\,. \tag{7}$$

Из (3), (4) следует, что расчетная или измеренная электроэнергия, выделяющаяся в сопротивлении r или в проводимости g в виде тепла (потерь электроэнергии) $\Delta W_r\left(T_{\text{з}}\right)$, $\Delta W_g\left(T_{\text{з}}\right)$ в любой заданный промежуток времени $\Delta t = T_{\text{з}}$, будет равна

$$\Delta W_r\left(T_{\text{з}}\right) = r\int_0^{T_{\text{з}}} i_r^2\left(t\right)dt = rB_{i\text{тер}}\left(T_{\text{з}}\right), \tag{8}$$

$$\Delta W_g\left(T_{\text{з}}\right) = g\int_0^{T_{\text{з}}} u_g^2\left(t\right)dt = gB_{u\text{тер}}\left(T_{\text{з}}\right). \tag{9}$$

Точное интегрирование для определения $B_{i\text{тер}}\left(T\right)$, $B_{u\text{тер}}\left(T\right)$ по (8), (9) можно согласно (6), (7) заменить приближенным суммированием усредненных по временным интервалам Δt_i квадратов действующих значений токов и напряжений, на которых они принимаются постоянными:

$$B_{i\text{тер}}\left(T_{\text{з}}\right) \cong \sum_{i=1}^{n}\left[I_i^2 * \left(\Delta t_i\right)\right], \tag{10}$$

$$B_{u\text{тер}}\left(T_{\text{з}}\right) \cong \sum_{i=1}^{n}\left[U_i^2 * \left(\Delta t_i\right)\right], \tag{11}$$

$$\sum_{i=1}^{n}\Delta t_i = T_{\text{з}}\,,$$

где n – число интервалов Δt_i на отрезке $\left[0, T_{\text{з}}\right]$.

Если $\Delta t_i = \text{const} = \tau$, то (10), (11) принимают вид:

$$B_{i\text{тер}}\left(T_{\text{з}}\right) \cong \tau \sum_{i=1}^{n} I_i^2 \ , \tag{12}$$

$$B_{u\text{тер}}\left(T_{\text{з}}\right) \cong \tau \sum_{i=1}^{n} U_i^2 \ . \tag{13}$$

Таким образом, мы показали, что в основе определения потерь электроэнергии в объектах электросетевого хозяйства (ЛЭП, трансформаторы, реакторы) лежат косвенные измерения и (или) расчеты на основе косвенных измерений тепловых импульсов токов, протекающих через продольные элементы их схем замещения, и тепловых импульсов напряжений в узлах, воздействующих на их поперечные элементы. Очевидно, $B_{u\text{тер}}\left(T\right)$ также представляет собой тепловой импульс тока в цепи между токоведущей частью с напряжением $u\left(U\right)$ и точкой с нулевым потенциалом (землей).

Отметим, что концепция измерения или расчета потерь энергии (в форме выделения теплоты) на основе тепловых импульсов основана на фундаментальном физическом принципе зависимости мощности потерь на трение от скорости движении материальных объектов. Так, при поступательном механическом движении тела со скоростью ν в вязкой среде с коэффициентом трения μ мощность потерь равна $\mu\nu^2$, а электрический ток – это скорость изменения заряда [12].

$B_{i\text{тер}}\left(T\right)$, $B_{u\text{тер}}\left(T\right)$ являются режимными параметрами электроэнергетической системы (ЭЭС), тогда как r и g – схемными параметрами электрической сети. Как правило, принимается, что схемные параметры в течение интервала $T_{\text{з}}$ остаются постоянными и не зависящими от режимов ЭЭС, то есть от частоты f переменного тока, от $i\left(I\right)$ и от $u\left(U\right)$.

Тем не менее в ряде случаев некоторыми производителями счетчиков с функцией расчета потерь учитываются уточненные потери трансформаторов на гистерезис и на вихревые токи, так как тепловая энергия, выделяемая в магнитопроводе, определяется режимом работы – частотой f и магнитной индукцией[1] $\mathfrak{B}\sim U$ [5, 12]. Как правило, задаются общие удельные потери трансформатора $P_{\text{уд}}^{\text{н}}$ на 1 кг веса сердечника для номинальных условий эксплуатации ($f_{\text{н}} = 50$ Гц, номинальное напряжение $U_{\text{н}}$, магнитная индукция $\mathfrak{B}_0$) по заводским или справочным данным, а потом осуществляется пересчет по эмпирической формуле для расчетного режима $P_{\text{уд}}^{\text{н}}$ при $f = f_{\text{р}}$, $U = U_{\text{р}}$, $B = \mathfrak{B}_p$:

$$P_{\text{уд}}^{p} = P_{\text{уд}}^{\text{н}} \left(\frac{f_{\text{р}}}{f_{\text{н}}}\right)^{\alpha} \left(\frac{\mathfrak{B}_{\text{р}}}{\mathfrak{B}_0}\right)^{\beta} = P_{\text{уд}}^{\text{н}} \left(\frac{f_{\text{р}}}{f_{\text{н}}}\right)^{\alpha} \left(\frac{U_{\text{р}}}{U_{\text{н}}}\right)^{\beta} , \tag{14}$$

где α и β – эмпирические коэффициенты, которые с достаточной для практики точностью могут быть приняты равными 2.

[1] В статье магнитная индукция обозначается готическим изображением буквы B, чтобы отличить данную физическую величину от привычного обозначения интеграла Джоуля (теплового импульса).

Потери в магнитопроводе в целом рассчитываются путем умножения $P_{\text{уд}}^{\text{р}}$ на вес магнитопровода G. Таким образом, (14) также имеет смысл теплового импульса напряжения, если $f \approx f_{\text{р}}$.

Общая измерительно-расчетная задача определения потерь в сетевом элементе

Поясним теперь общую измерительно-расчетную задачу (ИРЗ) определения потерь в сетевом элементе (воздушной, кабельной линии или силовом трансформаторе) по данным, получаемым от счетчиков электроэнергии или от других измерительных приборов, модельная схема которой приведена на рис. 1. Смысл измеряемых и расчетных электрических величин ясеы из приведенной схемы и соответствуют традиционным обозначениям, принятым в практике расчетов режимов электроэнергетических систем (ЭЭС).

На этом рисунке микропроцессорные счетчики электроэнергии установлены на подстанциях (ПС) 1 и 2 на обоих концах сетевого элемента, хотя на практике мы чаще всего имеем дело только с установкой прибора на одном его конце. Такая избыточность введена в целях пояснения особенностей применяемой методики. В принципе избыточность полезна как с точки зрения резервирования приборов учета (ПУ), осуществляющих коммерческие измерения электроэнергии, так и в случае уточнения измерительно-расчетных значений потерь, о чем будет сказано ниже.

Отметим следующие особенности поставленной задачи.

1. ПУ ($Wh1$, $Wh2$) являются многофункциональными микропроцессорными средствами измерений всех параметров режима, указанных в значке «дисплей» под их изображением. Дополнительно в процессе аналого-цифрового преобразования и вычисления действующих значений величин определяется частота переменного тока. Далее, если это не будет оговорено особо, будем относить все рассуждения к $Wh1$.

2. ПУ включены до и после П-образной (или Г-образной, образующейся после удаления ветви g_{20}, b_{20}) схемы замещения (модели), поэтому *расчетные токи и потоки мощностей в поперечном элементе схемы не равны соответствующим токам и потокам мощностей, измеряемым ПУ. Исключение составляет Г-образная модель, где токи и потоки мощности, измеряемые* $Wh2$*, равны этим же величинам в поперечном элементе.* С другой стороны, *измеряемые ПУ напряжения равны напряжениям на поперечных элементах схемы замещения*.

3. В рамках поставленной задачи не учитывается распределенность параметров ЛЭП [12], то есть их волновые сопротивления.

4. Для ЛЭП поперечные проводимости в точках 1 и 2 равны $g_{10} = g_{20}$, $b_{10} = b_{20}$. Данные параметры не равны между собой, только если мы учитываем включение со стороны 1 или 2 заземляющего реактора или иного аппарата, что не имеет места в распределительной сети.

5. $B_{i\text{тер}}(T)$ могут быть рассчитаны в ПУ непосредственно интегрированием мгновенных значений измеренного напряжения $u_1^{\text{и}}$ с возведением их в квадрат, тогда как $B_{i\text{тер}}(T)$ не могут быть точно рассчитаны по $i(T)$, так как расчетное

(модельное) значение тока в поперечной ветви схемы замещений не равно измеренному току: $i_{12}^{\text{р}} \neq i_1^{\text{и}}$ (все обозначения приведены на рис. 1).

6. $i_{12}^{\text{р}}$ не определяется с помощью только измеренных значений тока и напряжения $u_1^{\text{и}}$ и $i_1^{\text{и}}$, так как поперечная ветвь схемы замещения сетевого элемента, содержащая индуктивность или емкость, является модельной, в которой мгновенный ток не измеряется. Строго говоря, для определения расчетных токов и мощностей в продольной ветви схемы замещения требуется рассчитать действующее значение и фазу тока в поперечной ветви на основе заданных g_{10}, b_{10} или по заданным активным P_{XX} и реактивным Q_{XX} мощностям холостого хода (XX) трансформаторов (возможен расчет $P_{\text{уд}}^{\text{р}}$ по (14)).

7. Таким образом, $B_{i\text{тер}}(T)$ рассчитывается с погрешностью, обусловленной как операциями с измеряемым током в начале сетевого элемента вместо расчетного, учитывающего поперечную ветвь схемы замещения (см. рис. 1), так и переходом от мгновенных значений тока и напряжения к их усредненным действующим значениям на заданных в ПУ интервалах времени с определением частоты по периодам переменного тока в этих интервалах.

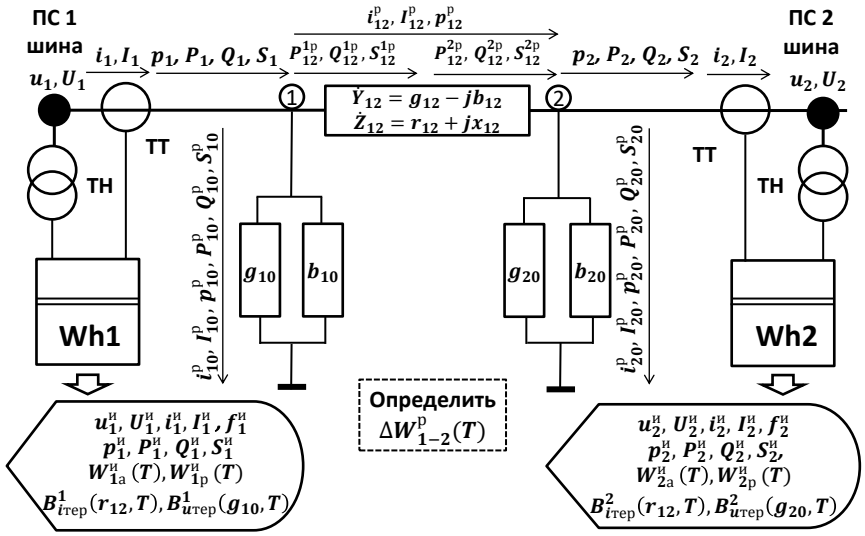


Рис. 1. Схема измерительно-расчетной задачи определения потерь $\Delta W_{1-2}^{\text{р}}$ в линиях электропередачи (ЛЭП) с П-образной схемой замещения и в трансформаторах с Г-образной схемой замещения (при исключении ветви проводимости g_{20}, b_{20})

Такая погрешность, составляющая не более 0,1 % результата косвенного измерения $B_{i\text{тер}}(T)$, как показывает практика, вполне допустима для сетей 20–0,4 кВ с кабельными и воздушными ЛЭП [1–4].

8. Расчетное значение потерь активной мощности в комплексной форме можно определить по измеренным комплексным значениям тока и напряжения

на входе в модель сети, представленной в виде четырехполюсника с П-образной схемой замещения (форма Y). В этом случае точность расчета помимо погрешностей измерительных приборов зависит только от точности определения параметров пассивной модели, или схемы замещения (рис. 2).

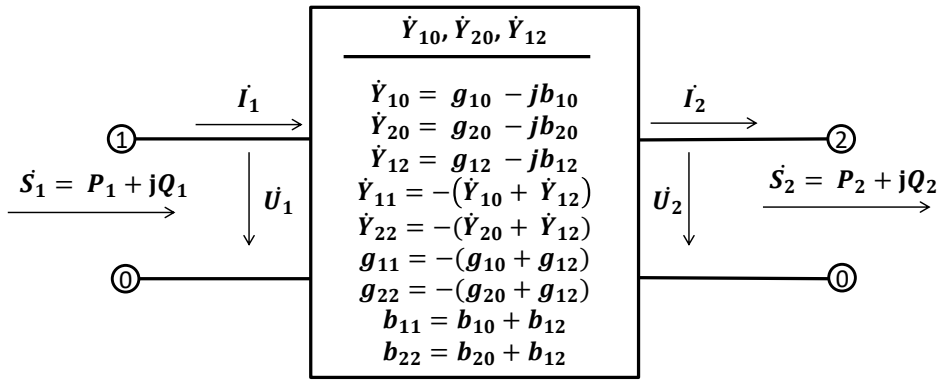


Рис. 2. П-образная модель четырехполюсника в форме Y, параметры которой выражаются через коэффициенты $\dot{A}$, $\dot{B}$, $\dot{C}$, $\dot{D}$ [10]. Развернутая схема замещения приведена на рис. 1

Рассмотрим более подробно последнее утверждение. В [5] показано, что в четырехполюснике, изображенном на рис. 2, все выходные параметры режима (выводы 2–0) однозначно определяются измеренными входными параметрами режима (выводы 1–0). Поэтому «мгновенные»[1] потери мощности как разность активных мощностей со стороны входа и выхода четырехполюсника равны

$$\Delta P = P_2 - P_1 = K_p U_1^2 + L_p I_1^2 + \left(M_p - 1\right) P_1 + N_p Q_1, \qquad (15)$$

где коэффициенты K_p, L_p, M_p, N_p зависят исключительно от параметров схемы замещения четырехполюсника $\dot{Y}_{10}$, $\dot{Y}_{20}$, $\dot{Y}_{12}$ и однозначно определяются ими (обозначения активных и реактивных проводимостей в алгебраической форме указаны на рис. 2). Соответствующие значения данных коэффициентов приведены в [5, приложение 5]. Если имеется в виду приложение к источнику 5, то надо вставить его внутрь квадратных скобок. Если имеется в виду несуществующее приложение к статье, то убрать.

$$K_p = \frac{\left(g_{11}^2 + b_{11}^2\right) g_{22} - \left(g_{11}^2 + b_{11}^2\right) g_{11} - 2 g_{12} b_{12} b_{11}}{g_{12}^2 + b_{12}^2};$$

[1] А на самом деле – усредненные на интервале определения комплексных величин, который задается при цифровой обработке данных в ПУ.

$$L_p = \frac{g_{22}}{g_{12}^2 + b_{12}^2};$$

$$M_p = \frac{2g_{11}g_{22} - g_{12}^2 + b_{12}^2}{g_{12}^2 + b_{12}^2};$$

$$N_p = 2\frac{g_{12}b_{12} - g_{22}b_{11}}{g_{12}^2 + b_{12}^2}.$$

Проинтегрировав обе части (15) по времени, получим расчетные потери электроэнергии за время $T_з$ (все обозначения даны на рис. 1):

$$\Delta W_{1-2}^{p}\left(T_з\right) = K_p \int_0^{T_з} U_1^2 dt + L_p \int_0^{T_з} I_1^2 dt + \left(M_p - 1\right)\int_0^{T_з} P_1 dt + N_p \int_0^{T_з} Q_1 dt =$$

$$= K_p B_{и\text{тер}}^{1p}\left(T_з\right) + L_p B_{i\text{тер}}^{1p}\left(T_з\right) + \left(M_p - 1\right)W_{1a}^{и}\left(T_з\right) + N_p W_{1p}^{и}\left(T_з\right). \qquad (16)$$

В (16) расчетные термические импульсы тока и напряжения $B_{и\text{тер}}^{1p}\left(T_з\right)$ и $B_{i\text{тер}}^{1p}\left(T_з\right)$, очевидно, не равны $B_{i\text{тер}}\left(T_з\right)$ и $B_{и\text{тер}}\left(T_з\right)$ из (8), (9) и отличаются от них на величину погрешности, вносимой неучетом токов, ответвляющихся в поперечную ветвь схемы замещения ЛЭП или трансформатора. Иными словами, в (16) пренебрегаем распределенным по длине ЛЭП характером утечек тока между фазами и на землю в этих объектах.

Методы и способы решения ИРЗ непрерывного определения потерь в электрической сети

Исходя из вышесказанного ИРЗ определения потерь в ЛЭП или трансформаторе на рис. 1 может быть решена двумя методами.

1-й метод – наиболее точный. Используется формула (16). В зависимости от того, в каких технических устройствах выполняются косвенные измерения потерь, метод подразделяется на способы 1а и 1б.

Способ 1а. Параметры схемы замещения – коэффициенты K_p, L_p, M_p, N_p – должны быть введены в ПУ, если производитель согласится организовать и поддерживать данную функцию, что потребует нового программного обеспечения, встроенного в счетчик, и увеличения памяти микропроцессора. Все косвенные измерения выполняются в ПУ и передаются на верхний уровень SCADA в соответствии с согласованным трафиком («псевдо онлайн», каждые 15 мин, 30 мин, каждый час и пр.). На верхнем уровне, представляющем собой аппаратно-программный комплекс, установленный в пункте оперативно-технологического управления электрической сетью сетевой компании, производится расчетное определение потерь за требуемые учетные интервалы (месяц, квартал, год).

Способ 1б. Определение потерь по (16) осуществляется в SCADA верхнего уровня, где хранятся коэффициенты K_p, L_p, M_p, N_p и выполняются расчеты $B_{i\text{тер}}\left(T_з\right)$ и $B_{и\text{тер}}\left(T_з\right)$ на основании интегрирования полученных от ПУ или от датчиков телеизмерений U_1^2 и I_1^2 за интервалы времени Δt_i по формулам (10) – (13), в том числе и за принятые учетные интервалы.

2-й метод – приближенный, менее точный, чем способ 1, но дающий вполне удовлетворительные результаты, в особенности для сетей 20–0,4 кВ. Используются формулы (8), (9) и результаты расчета потерь в ПУ. В настоящее время функция расчета потерь поддерживается многими производителями ПУ[1]. Задача упрощается, если активные потери XX трансформаторов принимаются постоянными, не зависящими от напряжения и частоты. Все косвенные измерения выполняются в ПУ, обмен данными с верхним уровнем SCADA – как в способе 1б. В рамках данного метода возможно применение специальных счетчиков «ампер-квадрат-часов» [5], которые, однако, не нашли распространения в современной практике коммерческого и технического учета электроэнергии. Измерение тепловых импульсов тока по мгновенным значениям важно также для определения температуры кабеля при коротком замыкании, что позволяет контролировать срок службы его изоляции и является составной частью системы непрерывной диагностики кабельных линий. Определение температуры провода при КЗ в воздушных линиях на основе тепловых импульсов связано с гораздо более сложными моделями, так как в данном случае некорректно допущение об адиабатичности соответствующего теплового процесса.

Любой из вышеперечисленных методов и способов требует внедрения в SCADA верхнего уровня специального модуля расчета потерь в охватываемом этой системой районе контроля и управления (кластере). Следует особо подчеркнуть, что ИРЗ должна быть реализована тем или иным образом на *всех* объектах электросетевого хозяйства электрической сети, так же как и на верхнем уровне в целом, потому что только в этом случае имеет смысл *непрерывное автоматическое или автоматизированное определение потерь* для их планирования и анализа в целях тарифного регулирования, бухгалтерского и управленческого учета, а также оперативного управления режимами сети и расчета небалансов.

Важнейшим условием практической реализации предложенных методов является оснащение электросетевого района минимально необходимыми средствами измерений для решения поставленной задачи. Назовем это свойство сети *наблюдаемостью в отношении потерь электроэнергии*[2]. Как уже отмечалось выше, на каждой ЛЭП (хотя бы с одной стороны), на каждом силовом трансформаторе необходимо установить ПУ с возможностью измерения действующих значений токов и напряжений и (или) определения потерь с помощью тепловых импульсов в продольных и поперечных проводимостях их моделей с передачей оперативной информации на верхний уровень SCADA. Паллиативным, менее точным решением может быть непрерывная передача телеинформации о действующих значениях тока и напряжения с уже установленных устройств телемеханики. Погрешность измерения в таком случае будет выше, что объясняется более высоким классом точности интеллектуальных приборов учета, а также их возможностью производить интегрирование потерь непосредственно в микропроцессоре прибора и пересылать уже обобщенную за интервалы учета информацию на верхний уровень системы управления. Желательно широко практико-

[1] В частности, к таким ПУ относятся: измерители показателей качества электроэнергии (ПКЭ) ТЕ3000, BINOM3; многофункциональные счетчики ПСЧ-4ТМ.06Т, Меркурий 350, Меркурий 234 ARTM, ЦЭ6850М-Ш31, НЕВА МТ 314, НЕВА СТ412 138 (139) ВСРІО22 и др.

[2] Наблюдаемость системы характеризует возможность определить ее информационное состояние для решения тех или иных задач, например определения параметров установившихся или переходных режимов. В данном случае мы применяем этот термин в отношении достаточности информации для решения задачи непрерывного расчета потерь.

вать установку таких средств измерений на реклоузерах и внедрять ПКУ[1], в особенности на ответвлениях от ЛЭП. Принцип обеспечения наблюдаемости в отношении потерь в пределах выделенного кластера иллюстрируется рис. 3.

На данном рисунке учтено, что ПУ в МКД и ОЗ устанавливаются на обоих вводах во вводно-распределительные устройства (ВРУ). Это особенно важно в петлевой схеме, показанной на рис. 3. В случае если данные приборы не относятся по своим функциям к интеллектуальным (с передачей информации в энергосбытовую и (или) электросетевую компанию), то неизмеряемые токи в линиях 0,4 кВ, отходящих от ВРУ, должны быть заменены расчетными токами на основании измеренных или расчетных токов на головных участках линий на подстанциях и расчетных коэффициентов распределения токов. В последнем случае коэффициенты определяются в модуле SCADA известными методами моделей постоянного тока [1–4].

Традиционно учитываемые составляющие потерь в измерительных трансформаторах, в ошиновке, в ПУ, в разрядниках и пр. [1–4] в случае необходимости также следует рассчитывать на верхнем уровне систем контроля и управления и включать в состав общего баланса за заданный период учета.

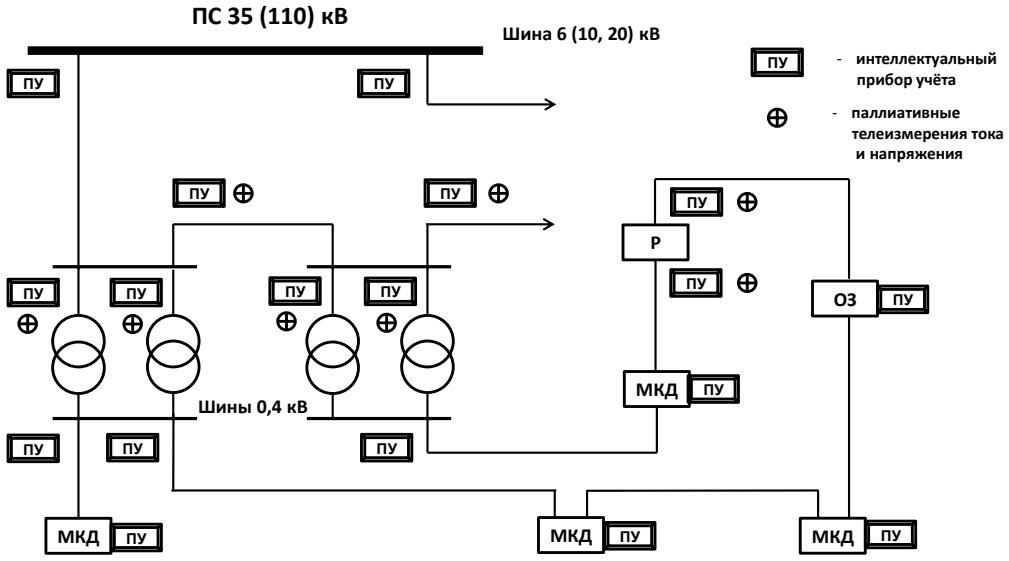


Рис. 3. Иллюстрация обеспечения принципа наблюдаемости в отношении определения потерь для кластера распределительной электрической сети. Обозначения: МКД – многоквартирный жилой дом; ОЗ – общественное здание; Р – реклоузер

Модуль непрерывного инструментально-расчетного определения потерь может быть интегрирован во все существующие SCADA (например, SCADA «ЭНТЕК» компании ООО «Энтелс», продукты компаний НПФ «КРУГ», ГК

[1] Современные ПКУ по своим габаритам и стоимости при необходимости вполне доступны для установки не только на воздушных линиях, но и в трансформаторных подстанциях, в распределительных пунктах, во ВРУ МКД и ОЗ, если их компоновки, первичные схемы или оборудование не предусматривают необходимого числа штатных трансформаторов тока и напряжения для подключения ПУ.

«РТСофт» и др.) с несущественной модернизацией их программного обеспечения.

Как уже отмечалось, наилучшим решением поставленной ИРЗ в распределительных сетях является оснащение каждой ЛЭП и каждого силового трансформатора интеллектуальным ПУ с функцией расчета потерь согласно Постановлению Правительства РФ от 19 июня 2020 г. № 890 «О порядке предоставления доступа к минимальному набору функций интеллектуальных систем учета электрической энергии (мощности)»[1]. Об этом упоминается и в стандартах организации ПАО «Россети» [13].

Однако достижение такой целевой наблюдаемости в отношении потерь во всем распределительном сетевом комплексе России требует большого времени и значительных затрат. Поэтому задача должна решаться поэтапно, путем внедрения на первых этапах паллиативных смешанных моделей, которые потребуют значительных расчетно-аналитических ресурсов на верхних уровнях SCADA. Очевидно, что для валидации полномасштабного подхода к непрерывному определению потерь в распределительной сети электросетевой организации целесообразно вначале внедрение измерительно-расчетных методов в составе систем контроля и управления на базе наиболее подготовленных отдельных кластеров (сетевых районов).

Выводы

1. В настоящее время имеются все организационные условия и технические возможности для внедрения в распределительном электросетевом комплексе России непрерывного определения потерь электроэнергии за любой промежуток времени, вплоть до режима, близкого к онлайн, на основе концепции тепловых импульсов, то есть путем расчетов тепловых импульсов в каждом сетевом элементе с помощью имеющихся интеллектуальных приборов учета или датчиков телемеханики с последующим умножением их на значения продольных активных сопротивлений или поперечных активных проводимостей. Это поможет максимально эффективно решать задачи тарифного регулирования (бухгалтерского и управленческого учета, в том числе планирования и учета годовых потерь, потерь за иные учетные периоды), а также оперативного управления режимами сети и расчета небалансов с целью выявления очагов коммерческих и технических потерь.

2. Предложены методы уточненного и приближенного (с допустимыми контролируемыми погрешностями) инструментально-расчетного определения потерь в ЛЭП и силовых трансформаторах, основанные на концепции измерения или расчета тепловых импульсов токов и напряжений как для их мгновенных, так и для действующих значений. Тепловые импульсы тока, определенные путем интегрирования квадратов мгновенных значений тока, позволяют также контролировать термическую стойкость кабелей при коротких замыканиях.

3. Обеспечение необходимой наблюдаемости сети в отношении непрерывного определения потерь в электросетевых элементах, то есть возможности получить необходимую и достаточную измерительную информацию для решения этой задачи, обеспечивается установкой на каждой ЛЭП и трансформаторе интеллектуальных ПУ с функцией расчета потерь. При отсутствии таких ПУ при-

[1] Постановление Правительства требует, в частности, чтобы в состав информации о количестве и иных параметрах электрической энергии входила «*величина потерь электрической энергии в объектах электросетевого хозяйства на участке сети от физического места установки прибора учета (далее – точка учета) до точки поставки*».

меняются паллиативные (иные доступные, но менее точные) средства измерений соответствующих действующих значений токов и напряжений, например датчики телеизмерений. Информационное обеспечение расчетов в конкретной сети проектируется при разработке соответствующих модулей SCADA. Другие составляющие потерь, предусмотренные существующими нормативными документами и методиками, рассчитываются непрерывно и централизованно известными способами.

4. Вся информационная, расчетная и аналитическая часть комплексной задачи непрерывного определения потерь реализуется в специальном модуле SCADA на верхнем уровне иерархии контроля и управления электросетевой компании.

5. С учетом огромных объемов электросетевого хозяйства каждой компании, недостаточности и неоднородности информационного обеспечения электрических сетей задача должна решаться поэтапно, путем применения на первых этапах паллиативных смешанных моделей, которые требуют значительных расчетно-аналитических ресурсов на верхних уровнях SCADA.

6. Для валидации измерительно-расчетных моделей, организационного и технологического подхода к непрерывному определению потерь в сети электросетевой компании целесообразно вначале внедрение рекомендуемых методов в составе систем контроля и управления наиболее подготовленных отдельных кластеров (сетевых районов).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Воротницкий В.Э., Могиленко А.В.* Снижение потерь электроэнергии в распределительных электрических сетях. М.: Инфра-Инженерия, 2023. 308 с.
2. *Савина Н.В.* Системный анализ потерь электроэнергии в распределительных электрических сетях в условиях неопределенности: автореф. дис. … д-ра техн. наук: 05.14.02. Амурский гос. ун-т. Иркутск, 2010. 49 с. EDN: QGXEZZ
3. *Воротницкий В.Э.* Потери электроэнергии в электрических сетях: анализ и опыт снижения. М.: НТФ «Энергопрогресс», 2003. 104 с.
4. *Воротницкий В.Э., Комкова Е.В., Туркина О.В., Апряткин В.Н.* Методы и средства выявления безучетного потребления электрической энергии при наличии приборов учета. М.: Диалогэлектро, 2006. 48 с. EDN: QMJKGB
5. *Осика Л.К.* Расчетные модели интеллектуальных измерений (Smart Metering) в задачах учета и сбережения электроэнергии: практ. пособие. М.: МЭИ, 2013. 422 с.
6. *Вострокнутов Н.Г.* Электрические счетчики и их эксплуатация. 6-е изд., перераб. М.–Л.: Госэнергоиздат, 1959.
7. *Андреева Л.В., Осика Л.К., Тубинис В.В.* Коммерческий учет электроэнергии на оптовом и розничном рынках / Под ред. Л.К. Осики. М.: АВОК, 2010.
8. *Кангин В.В., Кангин М.В., Ямолдинов Д.Н.* Разработка SCADA-систем: учеб. пособие. М.: Инфра-Инженерия, 2023. 564 с.
9. *Горелик Т.Г., Кумец И.Е.* Внедрение SCADA-систем для реализации цифровой трансформации сети // Известия НТЦ Единой энергетической системы. 2019. № 1 (80). С. 57–62. EDN: OOJTQD
10. СТО 34.01-3.1-002-2016. Типовые технические решения подстанций 6–110 кВ. Стандарт организации.
11. *Панащатенко А.В., Яблоков А.А. и др.* Современные средства для организации интеллектуального учета электроэнергии в сетях 6 (10) кВ // Электроэнергия. Передача и распределение. № 6 (63). 2020.
12. *Атабеков Г.И.* Основы теории цепей: учебник для вузов. 8-е изд., стер. СПб.: Лань, 2024. 424 с.
13. СТО 34.01-21.1-001-2017. Распределительные электрические сети напряжением 0,4–110 кВ. Требования к технологическому проектированию. СТО 34.01-5.1-009-2021. Приборы учета электроэнергии. Общие технические требования.

Статья поступила в редакцию 15.03.2025

doi: 10.14498/tech.2025.1.7

THE POSSIBILITIES OF ORGANIZING CONTINUOUS INSTRUMENTAL AND COMPUTATIONAL DETERMINATION OF ELECTRICITY LOSSES IN DISTRIBUTION NETWORKS OF 20–0.4 kV BASED ON THE CONCEPT OF THERMAL CURRENT AND VOLTAGE PULSES

L.K. Osika[1]

National Research University «Moscow Power Engineering Institute» (MPEI)
14, bld. 1, Krasnokazarmennaya st., Moscow, 111250, Russian Federation

E-mail: osikalk@yandex.ru

Abstract. *The state of determining electricity losses in the electrical networks of the distribution grid complex of the Russian Federation based on the readings of electric energy meters is analyzed. It has been established that there are all organizational and technological prerequisites for the continuous calculation of losses in power transmission lines and transformers according to energy meters and current and voltage measuring instruments. An instrumental and computational approach to determining losses is proposed, based on the concept of thermal pulses of current and voltage, which can be implemented in intelligent metering devices and at the upper level of SCADA.*

Keywords: *electrical energy losses, continuous calculation of losses, thermal pulses of voltage current, power transmission line, transformer, power grid facility, calculation models of power transmission lines and transformers, SCADA.*

REFERENCES

1. *Vorotnickij V.E., Mogilenko A.V.* Snizhenie poter elektroenergii v raspredeli-telnyh elektricheskih setyah [Reduction of electricity losses in distribution electric networks]. M.: Infra-Inzheneriya, 2023. 308 p. (In Russian)
2. *Savina N.V.* Sistemnyj analiz poter' elektroenergii v raspredelitel'nyh elektricheskih setyah v usloviyah neopredelyonnosti [System analysis of electricity losses in distribution electric networks in conditions of uncertainty]: avtoref. dis. … d-ra tekhn. nauk: 05.14.02. Amurskij gos. un-t. Irkutsk, 2010. 49 p. (In Russian)
3. *Vorotnickij V.E.* Poteri elektroenergii v elektricheskih setyah: analiz i opyt snizheniya [Electric power losses in electric networks: analysis and experience of reduction]. M.: NTF «Eneroprogress», 2003. 104 p. (In Russian)
4. *Vorotnickij V.E., Komkova E.V., Turkina O.V., Apryatkin V.N.* Metody i sredstva vyyavleniya bezuchyotnogo potrebleniya elektricheskoj energii pri nalichii priborov uchyota [Methods and means of detecting unaccounted-for electric energy consumption in the presence of metering devices]. M.: Dialogelektro, 2006. 48 p. (In Russian)
5. *Osika L.K.* Raschyotnye modeli intellektual'nyh izmerenij (Smart Metering) v zadachah uchyota i sberezheniya elektroenergii: prakticheskoe posobie [Computational models of intelligent measurements (Smart Metering) in the tasks of accounting and saving electricity: a practical guide]. M.: MEI, 2013. 422 p. (In Russian)
6. *Vostroknutov N.G.* Elektricheskie schyotchiki i ih ekspluataciya [Electric meters and their operation]. 6-e izd., pererab. M.–L.: Gosenergoizdat, 1959. (In Russian)
7. *Andreeva L.V., Osika L.K., Tubinis V.V.* Kommercheskij uchyot elektroenergii na optovom i roznichnom rynkah [Commercial accounting of electricity in wholesale and retail markets] / Pod red. L.K. Osiki. M.: AVOK, 2010. (In Russian)

© The Author(s), 2025

[1] *Lev K. Osika (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor, Dept. of Electric Power Systems.*

8. *Kangin V.V., Kangin M.V., Yamoldinov D.N.* Razrabotka SCADA-sistem: ucheb. posobie [Development of SCADA systems: a textbook]. M.: Infra-Inzheneriya, 2023. 564 p. (In Russian)
9. *Gorelik T.G., Kumec I.E.* Vnedrenie SCADA-sistem dlya realizacii cifrovoj trans-formacii seti [Implementation of SCADA systems for the implementation of digital transformation of the network] // Izvestiya NTC Edinoj energeticheskoj sistemy. 2019. No. 1(80). Pp. 57–62. (In Russian)
10. STO 34.01-3.1-002-2016. Tipovye tekhnicheskie resheniya podstancij 6–110 kV. Standart organizacii [Standard Technical Solutions for 6–110 kV Substations. Corporate Standard]. (In Russian)
11. *Panashchatenko A.V., Yablokov A.A. i dr.* Sovremennye sredstva dlya organizacii intellektual'nogo ucheta elektroenergii v setyah 6 (10) kV [Modern Solutions for Smart Electricity Metering in 6 (10) kV Networks] // Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie. № 6 (63). 2020. (In Russian)
12. *Atabekov G.I.* Osnovy teorii cepej: uchebnik dlya vuzov [Fundamentals of the theory of circuits: a textbook for universities]. 8-e izd., ster. SPb.: Lan, 2024. 424 p. (In Russian)
13. STO 34.01-21.1-001-2017. Raspredelitelnye elektricheskie seti napryazheniem 0,4–110 kV. Trebovaniya k tekhnologicheskomu proektirovaniyu [Distribution Power Networks with Voltage of 0.4–110 kV. Requirements for Engineering Design. STO 34.01-5.1-009-2021]. STO 34.01-5.1-009-2021. Pribory ucheta elektroenergii. Obshchie tekhnicheskie trebovaniya [Electricity Metering Devices. General Technical Requirements.]. (In Russian)

Original article submitted 15.03.2025

doi: 10.14498/tech.2025.1.8
EDN: HSMQQB

УДК 621.18:004.942

МЕТОД МОДЕЛИРОВАНИЯ ВОДОГРЕЙНЫХ КОТЕЛЬНЫХ МАЛОЙ МОЩНОСТИ И ИХ ТЕПЛОВОЙ НАГРУЗКИ

***Л.П. Строкин, И.А. Данилушкин*[1]**

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

E-mail: strokin.samara@mail.ru, idanilushkin@mail.ru

Аннотация. *Представлен новый метод моделирования автономных водогрейных котельных малой мощности и их тепловой нагрузки. Предложенный подход основан на представлении основных элементов тепловой схемы (котел, теплообменник, потребители отопления и ГВС) в виде группы взаимодействующих тепловых масс и использовании системы дифференциальных уравнений для описания динамики теплообмена. Для определения коэффициентов теплопередачи между тепловыми массами применяется анализ установившегося режима с учетом граничных условий на внешние потоки энергии. Компьютерная реализация модели выполнена в среде MATLAB Simulink, параметры идентифицированы по реальным данным котельной станции с двумя котлами по 1 МВт и КПД 90 %. В вычислительном эксперименте проведены статичные и динамические тесты: прогрев котла при номинальной нагрузке и его остывание при отключенном теплоносителе. Результаты моделирования продемонстрировали высокую степень согласования с эксплуатационными данными (средняя абсолютная ошибка температур составила менее 0,5 °C), что подтверждает адекватность и надежность предложенного метода. Универсальность подхода позволяет масштабировать модель на различное оборудование и режимы работы без существенного роста вычислительной нагрузки. Предложенный метод может служить эффективным инструментом инженерного анализа, проектирования и последующей оптимизации систем теплоснабжения, обеспечивая сокращение затрат времени и ресурсов на опытную проверку.*

Ключевые слова: *моделирование, водогрейная котельная, тепловая масса, тепловой баланс, котел, теплообменный аппарат, динамическая модель, коэффициент теплопередачи, вычислительный эксперимент.*

Введение

Котельные широко используются для отопления и подачи горячей воды потребителям. В качестве топлива используются природный газ, уголь, мазут и другие энергоносители. В данном исследовании рассматривается моделирование работы автономной водогрейной котельной с нагрузкой в виде потребителей тепла и горячего водоснабжения. Автономные котельные обычно включают в себя один или несколько котлов, теплообменники, насосы, трубопроводную

© Автор(ы), 2025

[1] *Леонид Павлович Строкин, магистр.*
Иван Александрович Данилушкин, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автоматики и управления в технических системах.

арматуру и систему управления, которая выполняет функции регулирования температуры воды, подаваемой потребителю, управления котлами и аварийной защиты оборудования. Современные водогрейные котельные все чаще автоматизируются для повышения их надежности и энергоэффективности [1, 2]. При проектировании и оптимизации работы котельных применяются компьютерные и математические модели, которые используются для решения задач повышения их экономичности и эффективности [3, 4], а также снижения воздействия на окружающую среду [5].

Описание объекта и постановка задачи

Основной функцией котельной является нагрев воды и ее распределение по двум основным контурам: системе отопления и системе горячего водоснабжения (ГВС). Ее упрощенная схема представлена на рис. 1. Нагретая в группе котлов вода поступает к потребителям. В процессе прохождения по системе вода отдает тепло радиаторам в жилых помещениях или теплообменникам для подогрева воды в системе горячего водоснабжения. Остывшая вода, потерявшая часть своей тепловой энергии, возвращается по обратным трубопроводам в котельную для повторного нагрева.

Основной принцип функционирования котельной – это поддержание постоянной циркуляции теплоносителя по замкнутому контуру. Насосы обеспечивают движение воды по системе, создавая необходимое давление для того, чтобы теплоноситель достигал каждого потребителя. Для управления температурой используются трехходовые клапаны, которые позволяют смешивать потоки теплоносителя разной температуры для поддержания заданной температуры в системе.

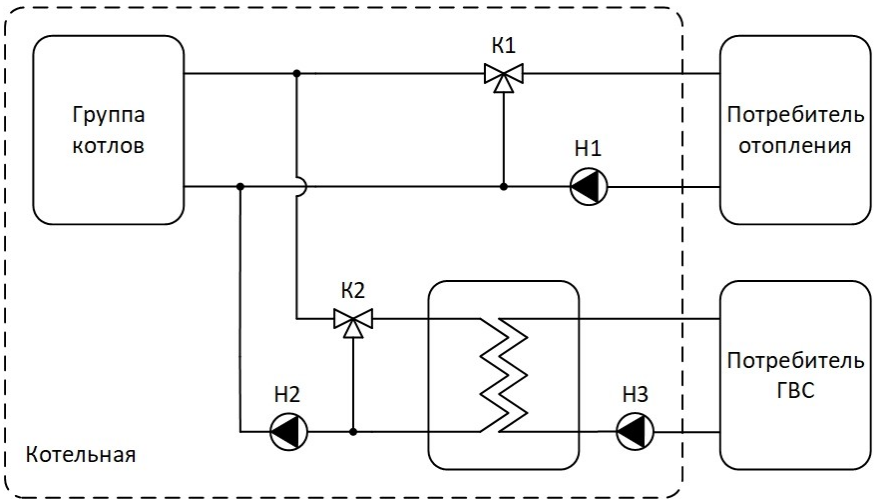


Рис. 1. Схема котельной: Н1, Н2, Н3 – группы насосов; К1, К2 – трехходовые клапаны

В данном исследовании разрабатывается математическая модель котельной, основанная на системе дифференциальных уравнений и предназначенная для анализа ее работы и последующей оптимизации. Такая модель позволяет с необходимой для задач автоматизации точностью описывать процессы, происходящие в различных узлах системы, и рассчитывать их поведение при изменении параметров.

Исследование тепловой схемы (см. рис. 1) как единой системы позволяет решить целый ряд вопросов:

– оценка правильности выбора оборудования котельной;

– определение динамических характеристик процессов тепломассопереноса и расчет оптимальных регуляторов систем автоматического управления;

– исследование различных режимов работы оборудования котельной и их влияния на динамические характеристики системы;

– сокращение затрат времени и ресурсов за счет выполнения расчетов вместо проведения экспериментальных испытаний.

Обзор методов моделирования

Общий подход к моделированию тепловых процессов предполагает представление процессов как системы трех уравнений: уравнения закона сохранения вещества, уравнения закона сохранения количества движения, уравнения закона сохранения энергии [6].

В случае моделирования котельных законы сохранения вещества и сохранения количества движения определяют гидравлическую модель потоков теплоносителя, закон сохранения энергии лежит в основе тепловых моделей. Динамическая модель гидравлической системы в данной работе не рассматривается, поскольку переходные процессы в ней затухают очень быстро и могут быть приняты безынерционными по сравнению с тепловыми. К тепловым объектам относятся котел, теплообменник, потребитель отопления и потребитель горячего водоснабжения (ГВС).

Методы моделирования тепловых объектов можно разделить на три группы: аналитические, экспериментальные и численные [7–9]. Аналитические методы основаны на построении математических моделей объекта с использованием фундаментальных законов физики [10]. К данным методам относятся модели с распределенными параметрами [11] и модели с сосредоточенными параметрами [12]. При этом для сосредоточенных моделей может применяться метод термоэлектрической аналогии [13].

Экспериментальные методы базируются на основе реальных измерений, полученных при эксплуатации объектов, которые используются для создания моделей. Статические модели могут быть построены при помощи регрессии и корреляции с установлением эмпирических зависимостей между входными и выходными величинами; динамические модели – при помощи процедур идентификации, когда параметры модели определяются посредством специально организованных экспериментов.

Численные методы применяются для решения нелинейных дифференциальных уравнений, описывающих тепловые и гидравлические процессы, с учетом сложной геометрии и временных характеристик объекта [14].

Для достижения высокой точности моделирования больше всего подходят численные методы. Высокая точность численных моделей чаще всего достигается за счет ресурсоемких вычислений, снижение вычислительных затрат достигается за счет внесения допущений в модель с учетом ограничений по желаемой точности. Аналитический метод, предполагающий получение замкнутых математических уравнений, не может быть применен для полного описания котельной станции ввиду ее высокой структурной и функциональной сложности, а экспериментальные методы дают высокую точность только в пределах наблюдаемой опытами области и сильно зависят от исходных данных.

В целом исследования по моделированию тепловых систем можно разделить на аналитические и эмпирические. Аналитические имеют высокую сложность и требуют серьезных исследований для применимости в каждом новом случае, эмпирические же более просты и широко применимы, но зависят от наличия и качества данных об объекте моделирования.

В современных исследованиях активно обсуждаются задачи моделирования процессов теплопередачи, производится поиск эффективных методов. Статья [15] посвящена разработке низкоразмерной динамической модели компактного пластинчатого теплообменника. Авторы используют теорию подобия Нуссельта для описания процессов конвекции и теплопроводности в каналах теплообменника, а также метод конечных объемов для пространственной дискретизации. Применяя метод, основанный на аппроксимированном стационарном решении исходных уравнений, авторы получили модель, которая требует меньшей вычислительной мощности и при этом точно представляет динамические процессы и нелинейности. В [16] для моделирования динамики теплообменных систем используется метод термоэлектрической аналогии. Подход, предложенный в [16], эффективен для описания динамики отдельных теплообменников или их компактных объединенных систем, где можно принять однородность температурного поля и линейность динамических процессов. Статьи [15, 16] посвящены моделированию конкретных тепловых процессов и не учитывают взаимодействие моделируемого объекта с окружающей средой.

Работа [17] посвящена построению агрегированных математических моделей прямоточного парового котла с помощью аппарата дифференциально-алгебраических уравнений в частных производных. В работе построены математические модели отдельных подсистем прямоточного парового котла, реализованные с использованием как сосредоточенных, так и распределенных параметров, а также алгебраические уравнения, отражающие гидравлические и энергетические балансы. Автор проводит анализ разрешимости дифференциально-алгебраических уравнений в частных производных, формулирует и доказывает теоремы существования и единственности решений. Предложенный подход обладает высокой математической сложностью, применение подхода требует тонкой настройки параметров и значительных вычислительных ресурсов. Подход может использоваться для описания агрегатов котельной, однако имеет все недостатки аналитических методов.

Представленный в статье [18] метод матричной формализации основывается на составлении системы уравнений баланса массы и энергии, решаемой методами математического программирования. Модель [18] описывает почти все подсистемы ТЭС, за исключением турбоустановки, и системы регенеративного подогрева питательной воды, что позволяет получить единое агрегированное математическое описание станции. Метод матричной формализации позволяет объединить расчеты различных подсистем станции в одну систему уравнений. В сравнении с распределенными моделями агрегированное матричное представление снижает вычислительную сложность и упрощает алгоритм расчета. Но объединение множества подсистем в единую модель приводит к утрате подробной динамики отдельных устройств, что снижает точность описания локальных процессов и общей модели. Для корректной работы модели требуется значительное количество экспериментально определяемых параметров, что затрудняет построение модели. Метод матричной формализации относится к эмпирическим

и подходит для упрощенного описания всей системы при наличии достаточного количества реальных данных с исследуемого объекта.

Математическая модель

Для построения модели котельной в данной работе будет использоваться разработанный метод, который относится к группе численных методов и основывается на законах сохранения энергии и сохранения масс. В основе данного метода лежит представление тепловых объектов в виде группы взаимодействующих тепловых масс.

Понятийно подход можно описать следующим образом. Тепловая масса – это вещество или материал, которые входят в состав теплового объекта и являются необходимым элементом для моделирования этого объекта. Количество элементов тепловой массы должно быть достаточным для моделирования всех ключевых процессов теплопередачи, которые описывают назначение теплового объекта, а также его взаимодействие с окружающей средой. Взаимодействие элементов тепловых масс происходит через передачу энергии от элемента с большей температурой к элементу с меньшей температурой; один элемент может обмениваться энергией с несколькими соседними элементами. Также тепловая масса может обмениваться энергией с окружающей средой, которая может как вносить, так и забирать энергию.

Каждая тепловая масса имеет свою массу и теплоемкость, а также главный параметр моделирования – температуру. Из уравнения теплового баланса [19] температура i-той тепловой массы определяется как

$$\frac{d}{dt}T_i(t)=\frac{1}{m_i c_i}\left(\sum_{j=1}^{N}q_{ij}(t)+Q_i(t)\right),\ i=\overline{1,N}, \tag{1}$$

где m_i – тепловая масса; c_i – ее удельная теплоемкость, N – количество тепловых масс объекта; $q_{ij}(t)$ – тепловой поток, приходящий от j-й тепловой массы; $Q_i(t)$ – количество тепла, привнесенное или убывшее от внешней среды.

Уравнение (1) можно записать в другой форме, используя алгебраизированный оператор дифференцирования $p=\frac{d}{dt}$ [20], а также выразив $T_i(t)$. Тогда уравнение примет вид

$$T_i(t)=\frac{1}{m_i c_i}\frac{1}{p}\left(\sum_{j=1}^{N}q_{ij}(t)+Q_i(t)\right),\ i=\overline{1,N}. \tag{2}$$

Тепловые потоки между тепловыми массами можно описать как

$$q_{ij}(t)=-\beta_{ij}(t)\left(T_i(t)-T_j(t)\right),\ i,j=\overline{1,N}, \tag{3}$$

где $\beta_{ij}(t)$ – приведенный коэффициент теплообмена между элементами. Для случая, когда коэффициенты теплообмена не зависят от времени, можно определить матрицу коэффициентов

$$\mathbf{B}=\left[\beta_{ij}\right]_{N\times N}. \tag{4}$$

Систему уравнений (2), (3) можно использовать для построения динамической модели процесса теплообмена. Для этого необходимо определить значения коэффициентов матрицы **B**. Эту задачу можно решить исходя из информации о состоянии объекта в установившемся режиме, который можно определить че-

рез типовые значения температур тепловых масс T_i^*. В матричном виде можно записать

$$\mathbf{T} = \left[T_i^* \right]_{N\times 1}, \tag{5}$$

где T_i^* – типичная температура i-той тепловой массы. Аналогично (5) можно представить поток $Q_i(t)$ для каждой тепловой массы в статике:

$$\mathbf{Q} = \left[Q_i^* \right]_{N\times 1}, \tag{6}$$

где Q_i^* – статичный приток или отток тепла i-той тепловой массы.

В установившемся режиме $\frac{dT}{dt} \equiv 0$, тогда из (1)

$$\left(\sum_{j=1}^{N} q_{ij} + Q_i^* \right) = 0,\ i = \overline{1,N}; \tag{7}$$

отсюда с учетом (3)

$$\sum_{j=1}^{N} \beta_{ij} \left(T_j^* - T_i^* \right) = -Q_i^*,\ i = \overline{1,N}. \tag{8}$$

С учетом (4) – (8) можно определить задачу расчета приведенных коэффициентов теплообмена в общем виде, при заданных типовых значениях температур и тепловых потоков для всех взаимодействующих тепловых масс:

$$\mathbf{B}\cdot\mathbf{T} - \mathrm{diag}(\mathbf{T})\cdot\mathbf{B}\cdot\mathbf{1} = -\mathbf{Q}, \tag{9}$$

где $\mathbf{1}$ – единичная матрица размером $N\times 1$. В общем виде данное уравнение решить нельзя, т. к. при четырех и более элементах группы система будет недоопределена. В таком случае решение может быть получено с помощью постановки задачи минимизации функционала диссипации, где система (9), дополненная рядом дополнительных условий (симметрия матрицы $\mathbf{B}$ и т. п.), будет выступать в виде ограничений. Но во множестве практически полезных случаев можно рассматривать группу тепловых масс с некоторыми ограничениями.

Первое ограничение накладывается на количество связей в системе и определяется как

$$N \geq E, \tag{10}$$

где N – количество тепловых масс; E – количество связей в группе. Второе ограничение относится к случаю, когда в одну тепловую массу приходят два или более потоков. Пусть D_k – множество тепловых масс, которые привносят энергию k-й тепловой массе, тогда

$$\frac{q_{ik}}{T_i^* - T_k^*} = C_k,\ i \in D_k, \tag{11}$$

где C_k – постоянная величина, $C_k > 0$, откуда следует

$$\beta_{ik} = C_k,\ i \in D_k. \tag{12}$$

Граничные условия описываются следующим образом: все N тепловых масс, описывающих объект, можно разделить на внешние и внутренние. Множество S внешних тепловых масс включает в себя два подмножества: S_{IN} – входные и S_{OUT} – выходные тепловые массы. Для внешних входных тепловых масс энергия, привнесенная извне, будет положительной:

$$Q_s > 0,\ s \in S_{IN}, \tag{13}$$

тогда сумма всей энергии, привнесенной извне,

$$Q_\Sigma = \sum_{s \in S_{IN}} Q_s\ . \tag{14}$$

Внешним выходным тепловым массам будет присущ отток энергии во внешнюю среду:

$$Q_s < 0,\ s \in S_{OUT}, \tag{15}$$

с учетом (14) распределение энергии во внешнюю среду определяется

$$Q_s = \gamma_s Q_\Sigma,\ s \in S_{OUT}, \tag{16}$$

где γ_s – доля суммарной привнесенной энергии, уходящая вовне от *s*-ной внешней выходной тепловой массы,

$$\sum_{s \in S_{OUT}} \gamma_s = 1. \tag{17}$$

Таким образом, вся энергия, привнесенная в систему через внешние входные тепловые массы, убывает через внешние выходные тепловые массы. Этот же баланс соблюдается и во внутренних тепловых массах. Для *v*-той внутренней тепловой массы, взаимодействующей со множеством тепловых масс R_v^{IN}, привносящих энергию, и отдающей энергию множеству тепловых масс R_v^{OUT}, справедливо

$$\sum_{i \in R_v^{IN}} \beta_{iv} \left(T_i^* - T_v^* \right) = - \sum_{i \in R_v^{OUT}} \beta_{vi} \left(T_i^* - T_v^* \right). \tag{18}$$

Энергия может поступать в группу тепловых масс и убывать из нее двумя способами. Первый способ предполагает обмен энергией вследствие теплопередачи от более горячей к более холодной тепловой массе. При втором способе приток или отток энергии может происходить из-за замещения вещества, принятого за одну из тепловых масс модели. Когда в объекте моделирования присутствует проходящий через него теплоноситель, в качестве тепловой массы принимается его постоянный объем, находящийся непосредственно во взаимодействии с остальными тепловыми массами объекта моделирования. В этом случае необходимо учитывать замену теплоносителя в этом объеме (модель идеального вытеснения) и его температуру на входе. Из этого следует, что типичное значение температуры тепловой массы теплоносителя на выходе, используемое для определения коэффициентов β_{ij}, можно рассчитать по формуле

$$T_W^* = \frac{F_W^* c_W T_{IN}^* + Q_W^*}{F_W^* c_W}, \tag{19}$$

где T_W^* – типичная температура тепловой массы-теплоносителя; F_W^* – расход теплоносителя в статике; T_{IN}^* – температура замещающего теплоносителя в статике; c_W – удельная теплоемкость; Q_W^* – энергия, приходящая или уходящая на тепловую массу-теплоноситель, т. к. тепловая масса, принятая за теплоноситель с расходом, всегда будет являться внешней тепловой массой. Отнесение внешней тепловой массы-теплоносителя к входной или выходной будет зависеть от конкретного объекта моделирования и роли теплоносителя в нем.

Решая систему из уравнений (8), составленных для каждой тепловой массы системы в статике, с учетом граничных условий (13), (14), (17) и ограничений

(10), (12), а также баланса для внешних (17) и внутренних (18) тепловых масс можно однозначно определить все коэффициенты β_{ij}.

Предложенный подход к построению математической модели позволяет описывать различные элементы котельной. При расчете коэффициентов в статике направления тепловых потоков известны и взаимодействие тепловых масс для каждого элемента может быть описано направленным графом. В динамике взаимодействия между тепловыми массами происходят в направлениях, которые определяются температурами тепловых масс.

Моделирование тепловых объектов котельной

Водогрейный котел. Основное назначение котла – это нагрев теплоносителя. Передача тепла к теплоносителю осуществляется от металла тепловоспринимающих поверхностей котла, которые, в свою очередь, нагреваются от продуктов сгорания топлива. В процессе работы часть тепла уходит на нагрев кожуха котла, который, в свою очередь, отдает тепло окружающей среде. Тепловые массы модели котла и тепловые потоки между ними изображены на рис. 2. Для расчета приведенных коэффициентов теплообмена между тепловыми массами можно использовать оценочные и типичные значения температур для каждой тепловой массы. При этом первая тепловая масса является внешней входной, т. к. на нее поступает энергия от горелки, а вторая и третья – внешними выходными, причем распределение выходных потоков зависит от КПД котла. Поток тепла к поверхностям нагрева определяется комбинацией воздействий: излучения пламени и теплопередачи от продуктов сгорания. При этом температура продуктов сгорания на порядок выше, чем температура металла поверхностей нагрева. Поэтому при расчете принято, что тепловой поток Q_1 не зависит от разности температур и определяется мощностью горелки, зависящей от расхода топлива.

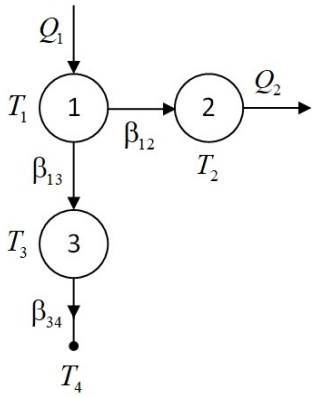


Рис. 2. Представление котла: 1 – металл тепловоспринимающих поверхностей; 2 – теплоноситель; 3 – кожух; $T_1 - T_3$ – температуры соответствующих тепловых масс; T_4 – температура окружающей среды

Тепловой поток Q_2 определяется расходом теплоносителя через котел, соответствующим номинальному режиму работы котла; температура теплоносителя на выходе котла в номинальном режиме оценивается по формуле (19). Окружа-

ющая среда фактически выступает тепловой массой с бесконечно большой теплоемкостью, и ее температура T_4 не изменяется, сколько бы тепла на нее ни поступило.

Теплообменный аппарат. Функция теплообменника – обмен тепла между греющим и нагреваемым теплоносителями. Теплоносители не взаимодействуют напрямую друг с другом, они передают тепло стенке, разделяющей потоки. Эксперименты показали, что повысить точность модели теплообменника позволяет представление стенки, разделяющей потоки, в виде двух взаимодействующих тепловых масс, обменивающихся энергией друг с другом и с внешней поверхностью, которая отдает тепло вовне. Тепловые массы модели теплообменника и тепловые потоки между ними изображены на рис. 3. Привнесение энергии в систему происходит через первую тепловую массу (объем греющего теплоносителя), а отток – через четвертую (объем нагреваемого теплоносителя) и пятую (внешнюю поверхность теплообменника, взаимодействующую с внешней средой). В модели теплообменника наблюдается полная аналогия с моделью котла: распределение выходных потоков зависит от КПД теплообменника, окружающая среда выступает тепловой массой с бесконечно большой теплоемкостью.

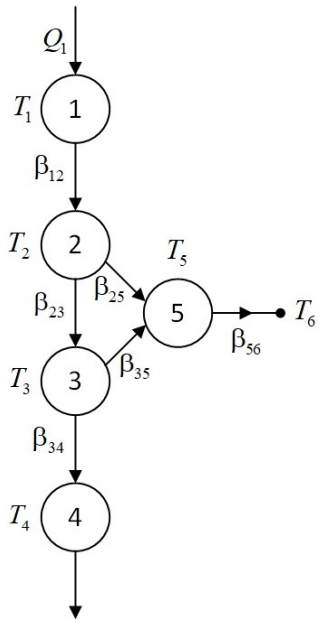


Рис. 3. Представление теплообменника:
1 – греющий теплоноситель; 2 – металл греющего теплоносителя; 3 – металл нагреваемого теплоносителя; 4 – нагреваемый теплоноситель; 5 – внешняя поверхность; $T_1 - T_5$ – температуры соответствующих тепловых масс; T_6 – температура окружающей среды

Представление ***потребителей отопления и ГВС*** в виде графа имеет линейный вид: тепло, привносимое в систему теплоносителем полностью (по цепочке), переходит в последующие тепловые массы потребителей. Для потребителя отопления важен нагрев воздуха в помещениях с помощью радиаторов, отток же теп-

ла происходит через стены помещений во внешнюю среду. Таким образом, модель потребителя отопления представляется цепочкой тепловых масс, взаимодействующих только с соседними тепловыми массами: теплоноситель, металл радиаторов, воздух в помещении, стены помещений, окружающая среда.

Для моделирования потребителя ГВС достаточно меньшего количества тепловых масс. Основной отбор тепла осуществляется за счет отбора некоторого объема теплоносителя и замещения его холодной водой.

Вычислительный эксперимент

Для оценки предложенного подхода была реализована компьютерная модель в пакете MATLAB Simulink. Параметры Simulink-модели идентифицировались по реальным данным эксплуатации котельной, состоящей из двух котлов мощностью в 1 МВт каждый, с КПД 90 %, подключенных параллельно; каждый котел имеет собственную систему управления температурой теплоносителя на выходе. Она представлена в виде двухступенчатого регулятора, управляющего мощностью горелки (0 %, 70 %, 100 %). Выбор количества работающих котлов реализован в виде отдельной подсистемы управления. Пластинчатый противоточный теплообменник, используемый в котельной, имеет мощность 600 кВт и КПД 90 %. Моделируемая нагрузка – это 5700 м² кирпичных жилых помещений и 3300 м² панельных жилых помещений, находящихся в умеренно-континентальном регионе. Необходимые затраты на отопление [21] при температуре теплоносителя 95 °С и температуре наружного воздуха –35 °С составляют 70 и 100 Вт/м² для кирпичных и панельных помещений соответственно. На данных площадях находятся около 180 квартир.

Гидравлическая система для данной котельной станции представлена в виде функций, реализующих моментальные перераспределения потоков при изменении положений трехходовых клапанов, управление которыми происходит с помощью релейных регуляторов и по отклонению от заданных значений температур. Для отопления температура воды на потребителя определяется погодным графиком, для контура ГВС температура на выходе из котельной фиксирована и составляет 55 °С. Расход теплоносителя в гидравлической системе определяется насосами и составляет 50 т/ч для потребителя отопления и 20 т/ч для внутреннего контура ГВС. Расход воды на потребителя ГВС принят постоянным и составляет 10 т/ч. Общий объем теплоносителя для контура потребителя отопления составляет 30 м³, для контура ГВС – 10 м³.

В качестве примера результатов моделирования котла рассматривается его нагрев и остывание при отсутствии расхода теплоносителя. На рис. 4 приведены температуры тепловых масс модели котла (см. рис. 2), горелка была включена на полную мощность в течение 370 с, после чего выключена.

При включенной горелке быстрее всего нагревался металл поверхностей нагрева котла, теплоноситель и кожух нагревались медленнее, после отключения горелки температура металла достаточно быстро снижается из-за постоянного теплообмена с теплоемким теплоносителем. После 800 с температура металла становится меньше температуры теплоносителя. Видно, что теплоноситель постепенно остывает, взаимодействуя с остывающим металлом поверхностей нагрева, которые, в свою очередь, остывают от оттока тепла к кожуху котла. Кожух котла взаимодействует с внешней средой – воздухом внутри котельной с температурой 25 °С.

Остывание котла, изображенное на рис. 4, длится около 24 ч, что соответствует реальным данным по температуре теплоносителя после остановки котла мощностью 1 МВт.

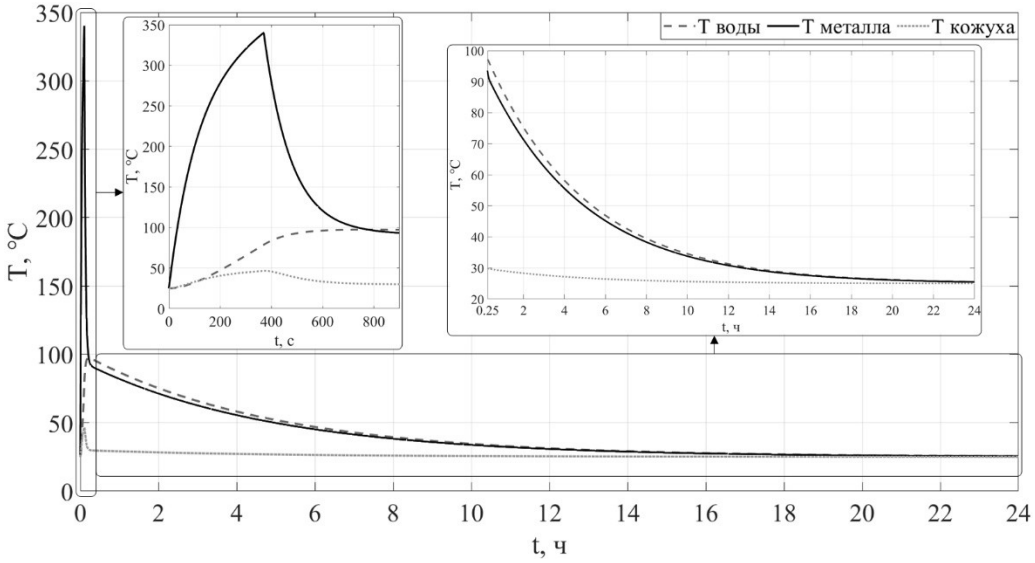


Рис. 4. Нагрев и остывание котла

Результаты моделирования котельной вместе с ее тепловой нагрузкой представлены на рис. 5, 6. Исходные данные представляют собой четыре фрагмента разной продолжительности. Для проведения эксперимента фрагменты были соединены в один с ограничением на скорость изменения температур в 1 °С/ч. На рис. 6 для наглядности представлен период, когда работал один котел и проводилась беспрерывная запись параметров котельной. При моделировании учитывалось изменение температуры наружного воздуха, которая влияла на потребление тепла на отопление.

Графики (см. рис. 5, 6) свидетельствуют о корректности построения моделей ввиду соблюдения тепловой нагрузки и динамики реальной системы, а также верной реализации системы управления. Точность моделирования определялась как средняя абсолютная ошибка (MAE) и максимальная абсолютная ошибка (MaxAE) между модельными и реальными данными (см. таблицу). Полученное значение средней абсолютной ошибки соизмеримо с погрешностью датчиков, использующихся в реальной системе.

Оценка точности модели

Параметр	MAE		MaxAE	
	16 суток	6 суток	16 суток	6 суток
T подачи к потребителю контура отопления, °С	0,4743	0,3890	5,9820	4,2910
T возврата от потребителя контура отопления, °С	0,2564	0,1929	2,3605	1,4354

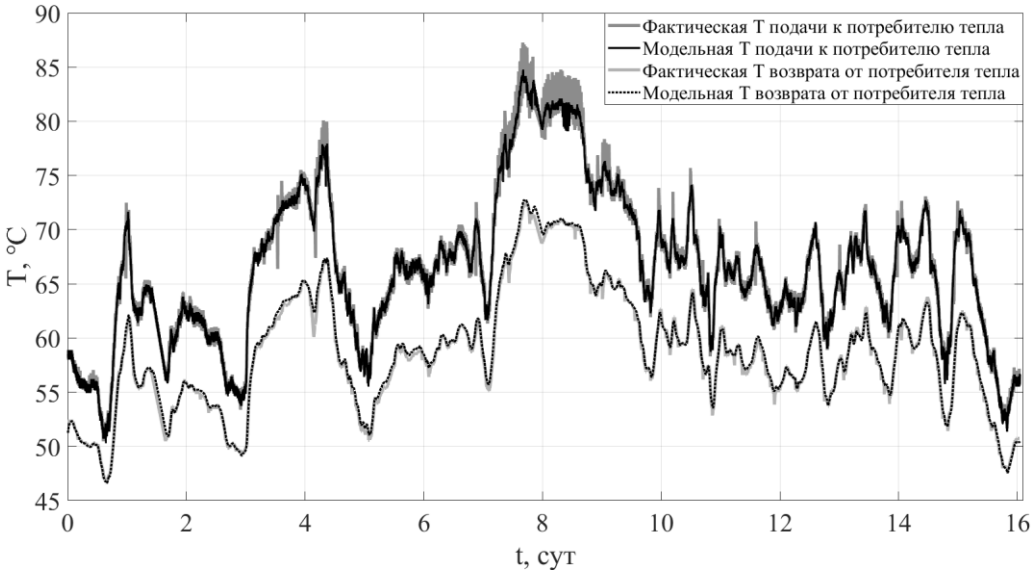


Рис. 5. Моделирование за 16 суток

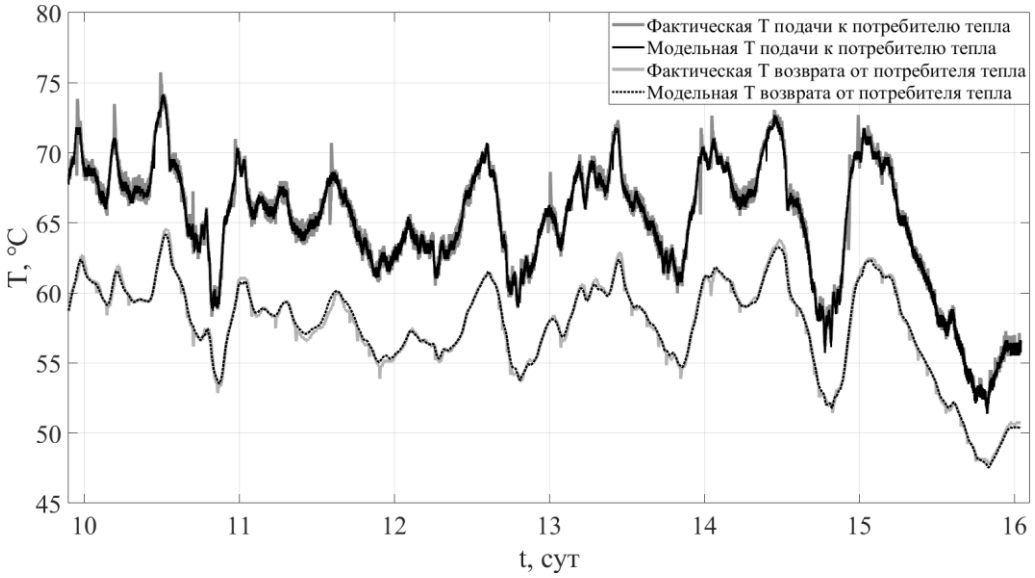


Рис. 6. Моделирование за 6 суток

На графиках (см. рис. 5, 6) наблюдаются кратковременные расхождения (выбросы) между поведением реальной системы и модели, которые могут быть объяснены в первую очередь недостаточной точностью моделирования потребления в контуре ГВС: увеличение потребления в утренние и вечерние часы. Разработка более точной модели потребления ГВС имеет смысл только для решения задачи оптимизации локальной автоматической системы поддержания температуры подачи теплоносителя в контуре ГВС и в данной работе не рассматривалась.

Заключение

Разработанный метод моделирования водогрейных котельных малой мощности на основе тепловых масс позволяет получить адекватное описание тепловых процессов с учетом взаимодействия элементов между собой и с окружающей средой. Предложенная математическая постановка обеспечивает универсальность и масштабируемость модели, а также возможность ее применения к различным элементам тепловой схемы, включая котлы, теплообменники и потребителей тепла. Применение численного подхода на базе законов сохранения массы и энергии позволило избежать чрезмерной математической сложности, характерной для аналитических моделей, сохранив при этом необходимую точность описания и обеспечив возможность реализации динамической модели системы.

Результаты моделирования, полученные в пакете MATLAB Simulink, показали высокую степень соответствия с реальными эксплуатационными данными котельной, что подтверждается малыми значениями среднеквадратичной абсолютной ошибки температур теплоносителя. Проведенный вычислительный эксперимент подтвердил возможность применения модели для задач анализа, оптимизации и прогнозирования работы котельных установок. Таким образом, предложенный метод может быть рекомендован в качестве инженерного инструмента для проектирования и совершенствования автономных систем теплоснабжения без необходимости привлечения ресурсоемких вычислительных средств или сложных экспериментальных исследований.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Милевская Т.А.* Анализ технологий, повышающих энергоэффективность котельных // Научно-исследовательский центр «Technical Innovations». 2021. № 5. С. 215–219. EDN: SRMSBM
2. *Глухова А.В., Трускова Е.В.* Анализ основных направлений развития системы теплоснабжения в Кузбассе // Россия молодая: Сб. материалов XIV Всерос. науч.-практ. конф. с межд. участием, Кемерово, 19–21 апр. 2022 г. Кемерово: КузГТУ им. Т.Ф. Горбачева, 2022. С. 21206.1–21206.5. EDN: RBTTVO
3. *Babadi K.A. et al*. Numerical simulations and an experimental study for optimal design of a 1500 kW water-tube condensing boiler // Energy. 2024. Vol. 307. P. 132675. DOI: 10.1016/j.energy.2024.132675. EDN: PKCKFB
4. *Якупова К.Р.* Исследование эффективности теплообмена при изменении форм поперечного сечения конвективных труб газового котла КВГА-0,8 // Инновационные науч. исследования. 2021. № 5–1(7). С. 54–62. DOI: 10.5281/zenodo.5007206. EDN:XRISEX
5. *Arowoiya V.A., Moehler R.C., Fang Y.* Digital twin technology for thermal comfort and energy efficiency in buildings: A state-of-the-art and future directions // Energy and Built Environment. 2024. Vol. 5, № 5. Pp. 641–656. DOI: 10.1016/j.enbenv.2023.05.004. EDN: GMTKEU
6. *Пащенко Ф.Ф., Пикина Г.А.* Основы моделирования энергетических объектов. М.: Физматлит, 2011. 464 с. EDN: UGPDPP
7. *Аветисян А.Р., Пащенко А.Ф., Пащенко Ф.Ф. и др.* Теплогидравлические модели оборудования электрических станций. М.: Физматлит, 2013. 448 с. EDN: UGLECL
8. *Hosain M.L.* Fluid flow and heat transfer simulations for complex industrial applications: from Reynolds averaged Navier-Stokes towards smoothed particle hydrodynamics: дис. ... канд. техн. наук. Mälardalen Univ., 2018.
9. *Патанкар С.* Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. М.: Машиностроение, 1984.
10. *Кудинов А.А.* Математическое моделирование теплового и термонапряженного состояний элементов конструкций теплогенерирующих установок: дис. ... д-ра техн. наук. Казань, 1999. 474 с. EDN: QDALTF
11. *Раппопорт Э.Я.* Структурное моделирование объектов и систем управления с распределенными параметрами: учеб. пособие. М.: Высшая школа, 2003. 302 с.

12. *Ramallo-González A.P., Eames M.E., Coley D.A.* Lumped parameter models for building thermal modelling: An analytic approach to simplifying complex multi-layered constructions // Energy and Buildings. 2013. Vol. 60. Pp. 174–184. DOI: 10.1016/j.enbuild.2013.01.014
13. *Фокин В.М., Бойков Г.П., Видин Ю.В.* Основы технической теплофизики. М.: Машиностроение-1, 2004. EDN: QJMPQB
14. *Кузнецов В.А.* Математическое моделирование процессов тепло- и массообмена для перспективных технологий энергетического использования угольного топлива: дис. ... канд. техн. наук. Красноярск, 2019. 125 с. EDN: ZKECKC
15. *Michel A., Kugi A.* Accurate low-order dynamic model of a compact plate heat exchanger // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2013. Vol. 61. Pp. 323–331. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.01.072
16. *He K.-L. et al.* A transient heat current model for dynamic performance analysis and optimal control of heat transfer system // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2019. Vol. 145. P. 118767. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118767
17. *Нгуен Х.Д.* Моделирование теплоэнергетических установок на основе теории дифференциально-алгебраических уравнений в частных производных: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.13.18. Иркутск, 2014. 22 с. EDN: ZPNXBH
18. *Барочкин А.Е., Жуков В.П., Барочкин Е.В., Ледуховский Г.В.* Матричное представление модели тепловой схемы электрической станции // Вестник ИГЭУ. 2018. № 6. С. 66–72. DOI: 10.17588/2072-2672.2018.6.066-072. EDN: VPQIQN
19. *Лыков А.В.* Теория теплопроводности. М., 1967.
20. *Бесекерский В.А., Попов Е.П.* Теория систем автоматического регулирования. 3-е изд. М.: Наука, 1975. 768 с. EDN: WGDAWV
21. СНиП 23-02-2003. Тепловая защита зданий / Госстрой России. Изд. офиц. М.: ФГУП ЦПП, 2004. 26 с.

Статья поступила в редакцию 29.04.2025

doi: 10.14498/tech.2025.1.8

MODELING METHOD FOR LOW-CAPACITY HOT WATER BOILER PLANTS AND THEIR THERMAL LOADS

L.P. Strokin, I.A. Danilushkin[1]

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

E-mail: strokin.samara@mail.ru, idanilushkin@mail.ru

Abstract. *The paper presents a novel method for modeling autonomous low-capacity hot water boiler plants and their thermal loads. The proposed approach is based on representing the main elements of the thermal circuit (boiler, heat exchanger, heating, and domestic hot water consumers) as a group of interacting thermal masses and on using a system of differential equations to describe the heat transfer dynamics. The heat transfer coefficients between thermal masses are determined through steady-state analysis, taking into account boundary conditions on external energy flows. The computational implementation of the model was carried out in the MATLAB Simulink environment, with parameter identification based on real operational data from a boiler plant with two 1 MW boilers and 90% efficiency. In the computational experiment, both steady-state and dynamic tests were performed: heating of the boiler under nominal load and cooling after shutting off the heat carrier flow. The modeling results demonstrated a high degree of agreement with operational data (mean absolute temperature error was less than 0.5 °C), confirming the adequacy and reliability of the proposed method. The universality of the approach allows the model to be scaled to various equipment types and operating modes without significant increase in computational load. The proposed method can serve as an effective tool for engineering analysis, design, and subsequent optimization of heat supply systems, providing reductions in time and resource expenditures for experimental verification.*

Keywords*: modeling, hot water boiler plant, thermal mass, thermal balance, boiler, heat exchanger, dynamic model, heat transfer coefficient, computational experiment.*

REFERENCES

1. *Milevskaya T.A.* Analiz tekhnologij povyshayushchih energoeffektivnost kotelnyh [Analysis of Technologies Increasing the Energy Efficiency of Boiler Houses] // Nauchno-issledovatelskij centr «Technical Innovations». 2021. No. 5. Pp. 215–219. (In Russian).
2. *Gluhova A.V., Truskova E.V.* Analiz osnovnyh napravlenij razvitiya sistemy teplo-snabzheniya v Kuzbasse [Analysis of the Main Directions for the Development of the Heat Supply System in Kuzbass] // Rossiya molodaya: Sb. materialov XIV Vseros. nauch.-prakt. konf. s mezhd. uchastiem, Kemerovo, 19–21 apr. 2022 g. Kemerovo: KuzGTU im. T.F. Gorbacheva, 2022. Pp. 21206.1–21206.5. (In Russian).
3. *Babadi K.A. et al*. Numerical simulations and an experimental study for optimal design of a 1500 kW water-tube condensing boiler // Energy. 2024. Vol. 307. P. 132675. DOI: 10.1016/j.energy.2024.132675
4. *Yakupova K.R.* Issledovanie effektivnosti teploobmena pri izmenenii form poperechnogo secheniya konvektivnyh trub gazovogo kotla KVGA-0,8 [Study of the Heat Exchange Efficiency with Changing the Cross-sectional Shape of the Convective Tubes of a Gas Boiler KVGA-

[1] *Leonid P. Strokin, Master.*
Ivan A. Danilushkin (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor, Dept. of Automation and Control in Technical Systems.

0.8] // Innovacionnye nauch. issledovaniya. 2021. No. 5–1 (7). Pp. 54–62. DOI: 10.5281/zenodo.5007206. (In Russian).
5. *Arowoiya V.A., Moehler R.C., Fang Y.* Digital twin technology for thermal comfort and energy efficiency in buildings: A state-of-the-art and future directions // Energy and Built Environment. 2024. Vol. 5, No. 5. Pp. 641–656. DOI: 10.1016/j.enbenv.2023.05.004.
6. *Pashchenko F.F., Pikina G.A*. Osnovy modelirovaniya energeticheskih obektov [Fundamentals of Modeling of Energy Facilities]. M.: Fizmatlit, 2011. 464 p. (In Russian).
7. *Avetisyan A.R., Pashchenko A.F., Pashchenko F.F. i dr.* Teplogidravlicheskie modeli oborudovaniya elektricheskih stancij [Thermohydraulic Models of Power Plant Equipment]. M.: Fizmatlit, 2013. 448 p. (In Russian).
8. *Hosain M.L.* Fluid flow and heat transfer simulations for complex industrial applications: from Reynolds averaged Navier-Stokes towards smoothed particle hydrodynamics: дис. ... канд. техн. наук. Mälardalen Univ., 2018.
9. *Patankar S.* Chislennye metody resheniya zadach teploobmena i dinamiki zhidkosti [Numerical Heat Transfer and Fluid Flow]. M.: Mashinostroenie, 1984. (In Russian).
10. *Kudinov A.A.* Matematicheskoe modelirovanie teplovogo i termonapryazhennogo sostoyanij elementov konstrukcij teplogeneriruyushchih ustanovok [Mathematical Modeling of Thermal and Thermally Stressed States of Heat-Generating Plant Elements]: dis. ... d-ra tekhn. nauk. Kazan, 1999. 474 p. (In Russian).
11. *Rappoport E.Ya.* Strukturnoe modelirovanie obektov i sistem upravleniya s raspredelyonnymi parametrami: ucheb. posobie [Structural Modeling of Objects and Control Systems with Distributed Parameters]. M.: Vysshaya shkola, 2003. 302 p. (In Russian).
12. *Ramallo-González A.P., Eames M.E., Coley D.A.* Lumped parameter models for building thermal modelling: An analytic approach to simplifying complex multi-layered constructions // Energy and Buildings. 2013. Vol. 60. Pp. 174–184. DOI: 10.1016/j.enbuild.2013.01.014
13. *Fokin V.M., Bojkov G.P., Vidin Yu.V.* Osnovy tekhnicheskoj teplofiziki [Fundamentals of Technical Thermophysics]. M.: Mashino-stroenie-1, 2004. (In Russian).
14. *Kuznecov V.A.* Matematicheskoe modelirovanie processov teplo- i massoobmena dlya perspektivnyh tekhnologij energeticheskogo ispolzovaniya ugolnogo topliva [Mathematical Modeling of Heat and Mass Transfer Processes for Promising Technologies of Energy Use of Coal Fuel]: dis. ... kand. tekhn. nauk. Krasnoyarsk, 2019. 125 p. (In Russian).
15. *Michel A., Kugi A.* Accurate low-order dynamic model of a compact plate heat exchanger // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2013. Vol. 61. Pp. 323–331. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.01.072
16. *He K.-L. et al.* A transient heat current model for dynamic performance analysis and optimal control of heat transfer system // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2019. Vol. 145. P. 118767. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118767
17. *Nguen H.D.* Modelirovanie teploenergeticheskih ustanovok na osnove teorii differencial'no-algebraicheskih uravnenij v chastnyh proizvodnyh [Modeling of Thermal Power Plants Based on the Theory of Differential-Algebraic Equations in Partial Derivatives]: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.13.18. Irkutsk, 2014. 22 p. (In Russian).
18. *Barochkin A.E., Zhukov V.P., Barochkin E.V., Leduhovskij G.V.* Matrichnoe predstavlenie modeli teplovoj skhemy elektricheskoj stancii [Matrix Representation of the Thermal Scheme Model of a Power Plant] // Vestn. IGEU. 2018. No. 6. Pp. 66–72. DOI: 10.17588/2072-2672.2018.6.066-072. (In Russian).
19. *Lykov A.V.* Teoriya teploprovodnosti [Theory of Heat Conduction]. M., 1967. (In Russian).
20. *Besekerskij V.A., Popov E.P.* Teoriya sistem avtomaticheskogo regulirovaniya [Theory of Automatic Control Systems]. 3-e izd. M.: Nauka, 1975. 768 p. (In Russian).
21. SNiP 23-02-2003. Teplovaya zashchita zdanij [Thermal Protection of Buildings]. Gosstroj Rossii. Izd. ofic. M.: FGUP CPP, 2004. 26 p. (In Russian).

Original article submitted 29.04.2025