



ISSN 1991-8542 (Print)

ISSN 2712-8938 (Online)

ВЕСТНИК САМАРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Серия
«ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ»

2025. Т. 33, № 3

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. № 3

Учредитель – ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»

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

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

Редакционная коллегия:

А.М. Абакумов (д.т.н., проф.)

В.И. Батищев (д.т.н., проф.)

С.Ю. Боровик (д.т.н., проф.)

Ю.В. Зубков (д.т.н., проф.)

Л.С. Казаринов (д.т.н., проф.)

Ю.Б. Казаков (д.т.н., проф.)

О.С. Колосов (д.т.н., проф.)

П.К. Кузнецов (д.т.н., проф.)

В.И. Лачин (д.т.н., проф.)

М.Ю. Лившиц (д.т.н., проф.)

С.П. Орлов (д.т.н., проф.)

Л.Д. Певзнер (д.т.н., проф.)

Э.Я. Рапопорт (д.т.н., проф.)

А.В. Стариков (д.т.н., проф.)

Е. Вааке (проф., Германия)

S. Luri (проф., Италия)

B. Nасke (проф., Германия)

M. Forzan (проф., Италия)

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

Вестник Самарского государственного технического университета
Серия «Технические науки» (2025. Том 33. № 3)

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

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

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

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

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

Подписано в печать 30.10.25
Выход в свет 12.11.25

Формат 70 × 108 ¹/₁₆.
Усл. печ. л. 22,79 п.л.
Уч.-изд. л. 22,79 п.л.
Тираж 500 экз. Рег. № 178/25
Заказ № 365

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 3

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 . Z a g r e b i n a
Compiled and typeset by O . S . A f a n a s e v a

The Editorial Board Address:

Samara State Technical University

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

Phone: +7(846) 337 04 43

E-mail: vest_teh@samgtu.ru

Printed at the Samara State Technical University Press

The journal is included in the Russian Science Citation Index.

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

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

The subscription index in Ural-Press catalogue 18106

ISSN 1991-8542

СОДЕРЖАНИЕ

Информационные технологии и коммуникации

<i>Казаринов А.В.</i> Разработка методики системного анализа и многофакторной оценки эффективности технологий пиролиза метана.....	7
<i>Баданис К.Е.</i> Обоснование оперативности автоматизированного метода мониторинга дорожного покрытия на основе сигналов акселерометра и аппарата нечеткой логики	30
<i>Степанов М.Ф., Степанов А.М., Степанова О.М.</i> Решение задачи робастной стабилизации неопределенного объекта в декларативной постановке.....	50

Энергетика и электротехника

<i>Антоненко Л.О., Проталинский О.М., Ягупова Ю.Ю., Феткуллин Т.Р., Андриюшин А.В., Берредэм Х.И.</i> Идентификация дефектов паровой турбины на основе нейросетевых моделей	65
<i>Зубков Ю.В., Галочкин А.Н., Тарутин Н.А.</i> Расчет основных размеров двухроторной электрической машины с магнитоэлектрическим возбуждением.....	81
<i>Осика Л.К.</i> Принципы решения проблемы зарядки электромобилей от электрозарядных станций, интегрированных в действующие системы электроснабжения общественных зданий и многоквартирных жилых домов.....	93
<i>Фролов К.В., Инаходова Л.М.</i> Алгоритмическая обработка акустических сигналов для выявления предаварийных и аварийных состояний комплектных распределительных устройств.....	111

CONTENTS

Information Technologies and Communications

<i>Kazarinov A.V.</i> Development of a Methodology for Systems Analysis and Multi-factor Efficiency Assessment of Methane Pyrolysis Technologies ...	27
<i>Badanis K.E.</i> Substantiation of the Efficiency of an Automated Method for Monitoring He Road Surface Based on Accelerometer Signals and Fuzzy Logic Apparatus	47
<i>Stepanov M.F., Stepanov A.M., Stepanova O.M.</i> Solving the Declarative Set Problem of Robust Stabilization of an Uncertain Plant.....	63

Power Engineering and Electrical Engineering

<i>Antonenko L.O., Protalinsky O.M., Yagupova Yu.Yu., Fetkullin T.R., Andriushin A.V., Berredem H.I.</i> Steam Turbine Fault Identification Based on Neural Network Models	79
<i>Zubkov Yu.V., Galochkin A.N., Tarutin N.A.</i> Calculation of the Two-Rotor Basic Dimensions Electric Machine with Magnetolectric Excitation	91
<i>Osika L.K.</i> Principles of Solving the Problem of EV Charging from Electric Charging Stations Integrated into Existing Power Supply Systems of Public Buildings and Apartment Buildings.....	109
<i>Frolov K.V., Inakhodova L.M.</i> Algorithmic Processing of Acoustic Signals for Detecting Pre-Emergency and Emergency States of Complete Switch-gear	119

Информационные технологии и коммуникации

УДК 661.961:007.51

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА И МНОГОФАКТОРНОЙ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИЙ ПИРОЛИЗА МЕТАНА

А.В. Казаринов¹

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

E-mail: artemrus987@gmail.com

Аннотация. Глобальный энергетический переход и стремление к декарбонизации экономики ставят перед научным сообществом задачу разработки и внедрения эффективных технологий производства водорода. Пиролиз метана является одной из перспективных технологий для производства низкоуглеродного водорода, однако многообразие его технологических реализаций существенно затрудняет их объективный сравнительный анализ и выбор наиболее эффективных решений для промышленного внедрения.

Каждый вариант реализации процесса характеризуется специфическим набором ключевых особенностей и показателей, отличающихся по физико-химическим механизмам, конструктивным схемам установок, условиям протекания процесса и получаемому углеродному продукту. Такое разнообразие делает невозможным использование упрощенных методов анализа и требует применения системного подхода, позволяющего комплексно учитывать взаимосвязи между подсистемами и факторами процесса.

В качестве методологической основы для разработки методики системного анализа принят структурно-функциональный подход с иерархической декомпозицией и итеративной обратной связью. Он позволяет рассматривать процесс пиролиза как целостную систему, включающую взаимосвязанные подсистемы, с учетом взаимодействия с внешней средой и возможностью формирования входных и выходных параметров, используемых на последующих этапах DEA-анализа. Разработанная на основе этого подхода методика системного анализа технологии пиролиза метана включает 12 этапов, сгруппированных в три взаимосвязанных блока: 1) описание и анализ подсистем; 2) оценка технико-экономических и экологических характеристик; 3) интеграция данных и многофакторная DEA-оценка с последующей поддержкой управленческих решений.



© Автор(ы), 2025

¹ Артём Витальевич Казаринов, аспирант кафедры управления и системного анализа теплоэнергетических и социотехнических комплексов.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема No FSSE-2024-0014) в рамках государственного задания Самарского государственного технического университета.

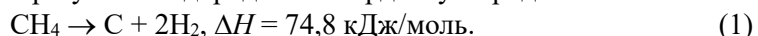
Разработанная методика отличается комплексным рассмотрением объекта, обеспечивающим объединение технологических, экономических и экологических факторов; прямой интеграцией со статистическим и DEA-анализом; учетом динамической деградации катализатора; итеративным контуром анализа; ориентацией на масштабирование и выявлением направлений возможной оптимизации.

Ключевые слова: *пиролиз метана, системный анализ, методика, многофакторная оценка, производство водорода, декарбонизация, Data Envelopment Analysis, DEA.*

Введение

В условиях глобального энергетического перехода и декарбонизации мировой экономики водород рассматривается как один из ключевых энергоносителей будущего. В настоящее время применяется широкий спектр технологий его получения, каждая из которых имеет свои преимущества и ограничения. Наиболее распространенной в промышленности технологией остается паровая конверсия метана, обеспечивающая основную долю мирового производства водорода, однако данный процесс сопровождается значительными выбросами CO₂. Развитие других безуглеродных способов, таких как электролиз воды с использованием возобновляемых источников энергии, пока ограничено их высокой себестоимостью.

Пиролиз метана рассматривается как одна из наиболее перспективных технологий получения низкоуглеродного водорода, составляющих фундамент для перехода к водородной энергетике. Процесс пиролиза основан на реакции разложения метана CH₄ при высоких температурах без доступа кислорода, в результате которой образуются водород H₂ и твердый углерод:



В основе пиролиза метана лежит последовательное расщепление C–H связей в молекуле CH₄. Полное разложение метана на элементарные компоненты предполагает отщепление всех четырех атомов водорода и образование углерода в виде твердой фазы [1].

Различают множество технологических подходов к реализации процесса пиролиза метана в зависимости от агрегатного состояния среды, в которой реализуется процесс. В настоящее время исследуются разнообразные способы реализации пиролиза метана: газофазный пиролиз, пиролиз в жидком металле, пиролиз в эвтектических расплавах солей и плазменный пиролиз. Несмотря на существенные различия физических условий протекания реакции пиролиза все перечисленные подходы нацелены на получение «бирюзового» водорода [2, 3].

Каждый из этих вариантов характеризуется уникальным набором физико-химических механизмов, технологических параметров, конструктивных решений и свойств получаемых продуктов. Такое многообразие существенно затрудняет сравнительный анализ и выбор наиболее эффективных решений. Упрощенные методы оценки не способны учесть сложные взаимосвязи технологических, экономических и экологических факторов. Отсутствие комплексного подхода создает риск принятия неэффективных решений и замедляет развитие технологии.

В связи с этим целью настоящей работы является создание универсальной методики системного анализа и многофакторной оценки эффективности технологий пиролиза метана. Предлагаемый подход опирается на структурно-функциональное описание процесса с иерархической декомпозицией и итеративной обратной связью и предусматривает прямую интеграцию с методом

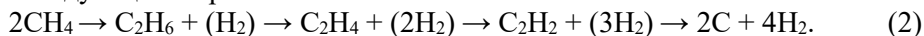
DEA (Data Envelopment Analysis). Данная методика должна стать инструментом объективного сопоставления существующих подходов и выявления потенциалов для их совершенствования, а также для поддержки принятия научно обоснованных управленческих решений.

Способы реализации пиролиза метана

Основные подходы и технологические схемы реализации процесса пиролиза метана различаются по типу реакционной среды, способу подвода энергии и особенностям протекания каталитических реакций.

Газофазный пиролиз (ГФ) осуществляет разложение метана в горячей газовой среде (с каталитическими поверхностями или без них) при высоких температурах. При стандартных условиях для осуществления реакции (1) требуются затраты энергии ≈ 75 кДж/моль ($\approx 37,5$ кДж на 1 моль H_2). Метан относится к числу наиболее химически стабильных органических соединений (прочность связи C–H составляет 439 ± 2 кДж/моль), поэтому его термическое разложение без использования катализаторов происходит при очень высоких (1000–1300 °C) температурах.

Теоретически установлено, что метан при нагревании склонен образовывать более крупные молекулы углеводородов, которые затем дегидрируются до все более богатых углеродом соединений. В отсутствие катализатора основной процесс пиролиза проходит через стадию образования двухатомных молекул: сначала образуется этан C_2H_6 , далее он дегидрируется до этилена C_2H_4 , затем до ацетилена C_2H_2 , и уже из ацетилена выделяется твердый углерод [4, 5]. Обобщенные реакции выглядят следующим образом:



Наличие катализатора позволяет резко снизить необходимую для реализации реакции температуру – вплоть до $\sim 600\text{--}900$ °C – благодаря разрыву связей CH_4 на активной поверхности. Наличие катализатора в реакционной зоне позволяет существенно снизить энергию активации и многократно ускорить реакцию, однако катализатор нужно непрерывно очищать от накопленного углерода, иначе его каталитическая активность может существенно снизиться и даже вовсе прекратиться [6–8].

Основной путь реализации каталитического пиролиза метана – это использование в качестве катализаторов дешевых твердых металлов/оксидов или расплавленных сред, откуда углерод удаляется физическим путем. Для поддержания работы катализатора необходимо принимать меры против коксообразования: проводить регенерацию катализатора (например, сжигание отложенного углерода в отдельных аппаратах, что приводит к выделению CO_2) либо использовать специальную конструкцию реактора (двойной циркулирующий реактор, подвижный или кипящий слой), где катализатор постоянно обновляется, а накопленный углерод выводится. Каталитический пиролиз позволяет проводить процесс при более низких температурах и затратах энергии, однако усложняется необходимостью наличия схем замены катализатора и мер против его отравления [1, 6].

Пиролиз в жидких металлических расплавах (ЖМР) предусматривает барботирование метана через расплавленный металл и взаимодействие с катализатором, в результате чего он подвергается разложению внутри расплава, находящегося при температуре 600–1200 °C. Жидкий металл в данном случае играет двойную роль: он является эффективным высокотемпературным теплоносителем, а также выступает «жидким катализатором» при наличии в его составе активных компонентов [9]. Наибольшее применение в качестве жидких катализаторов находят

расплавы олова (Sn), свинца (Pb), висмута (Bi) и их сплавы, например эвтектический сплав Ni–Bi. В пузырьковой колонне метан барботируется через слой расплава: пузырьки газа проходят через расплавленный металл, нагреваются до рабочей температуры ~900–1100 °С, и в их объеме протекает реакция пиролиза. Выделяющийся углерод не прилипает к стенкам, как в твердом каталитическом слое, а диспергируется в жидком металле и благодаря меньшей плотности всплывает на поверхность расплава в виде пены или твердых хлопьев. Это позволяет выводить углерод из реактора непрерывно, без остановки процесса. Без добавок каталитически активных веществ расплавы инертных металлов (например, чистое олово) служат лишь средой для подвода тепла, но не ускоряют реакцию. При этом высокие температуры на уровне 1000 °С также необходимы для высокой конверсии в таких системах [9–13].

Пиролиз в расплавах солей – это процесс, в котором в качестве альтернативы жидкому металлу применяется солевой эвтектический раствор, а углерод образуется и удерживается в дисперсном состоянии. Метан пропускается через расплавленные соли, играющие роль теплоносителя и реакционной среды [14–16]. В настоящее время, в частности, исследуются галогенидные расплавы: хлориды калия, натрия (например, эвтектическая смесь NaCl–KCl), бромиды и др., а также их смеси с солями переходных металлов (FeCl₂, MnCl₂). Принцип реализации технологии аналогичен пиролизу в ЖМР: метан барботируется через слой расплава соли, нагретого до высоких температур (900–1000 °С). Соли обладают высокой удельной теплоемкостью, что позволяет им накапливать большое количество тепловой энергии и затем эффективно передавать ее газу. Углерод, выделяющийся при разложении метана, может частично оставаться в расплаве в дисперсном состоянии или всплывать на поверхность (в зависимости от плотности и смачиваемости углеродных частиц расплавом). Чистые расплавы солей, как правило, не обладают каталитической активностью для пиролиза метана. Добавление даже небольшого количества растворенных катализаторов может ускорить реакцию. В частности, небольшая добавка Fe (в виде хлорида) в расплав NaCl–KCl существенно увеличивает конверсию метана. К преимуществам солевых расплавов следует отнести возможность подбора низкоплавких эвтектических составов по сравнению с металлическими расплавами, а также регулируемое физико-химическое воздействие ионного состава расплава на зарождение и рост углерода. Недостатками являются высокая коррозионность, необходимость тщательной отмывки углеродного продукта для предотвращения солевых примесей и сравнительно невысокая каталитическая эффективность без активаторов [14–16].

Плазменный пиролиз – это способ реализации процесса, при котором энергия для разрыва молекул метана подводится не через нагретые стенки или массу расплава, а посредством высокоэнергетической плазмы [17]. Существует множество типов плазменных реакторов: дуговой термический плазмотрон, микроволновая плазма, барьерный разряд (неравновесная «холодная» плазма) и др. В технологиях промышленного получения водорода наибольшее распространение получила дуговая плазма – электрическая дуга, генерируемая между электродами или плазмотроном, которая нагревает проходящий метан до экстремально высоких температур (≈ 2000–3000 °С и выше в ядре дуги). Метан мгновенно диссоциирует на углерод и водород, причем скорость реакции ограничена только временем пребывания газа в зоне плазмы. При достаточной подаче энергии можно достичь практически полной конверсии CH₄. Однако если газ покидает зону реакции слишком быстро (с целью снижения энергозатрат), возможно образование промежуточных

продуктов – ацетилена C_2H_2 , этилена C_2H_4 и др. [18, 19]. Для полной глубины протекания реакции пиролиза требуется либо более длительное время в горячей зоне, либо последующая доводка реакции. Плазменный метод обладает важным преимуществом, заключающимся в его электрической природе: подвод тепловой энергии осуществляется непосредственно за счет энергии электрического разряда, минуя теплопередачу через твердые стенки реактора. Если электричество генерируется из возобновляемых источников, плазменный пиролиз обеспечивает практически безуглеродный цикл получения водорода. Плазменные технологии, несмотря на высокий уровень технологической готовности и активное продвижение в направлении коммерческого применения, характеризуются значительной энергоемкостью и предъявляют повышенные требования к электросиловому и управлению оборудованию [17]. Кроме того, масштабирование производства на основе плазменных технологий реализуется, как правило, путем мультипликации большого числа индивидуальных плазмотронов, каждый из которых обладает ограниченной единичной мощностью. Такая схема масштабирования существенно усложняет архитектуру установки и приводит к росту капитальных затрат при увеличении общей производственной мощности.

Этапы технологического процесса пиролиза

Все рассмотренные технологические варианты реализации процесса пиролиза метана в различных реакционных средах включают ряд общих этапов. На рис. 1 представлена разработанная обобщенная схема этапов реализации и системной оценки технологического процесса пиролиза метана [1–7].

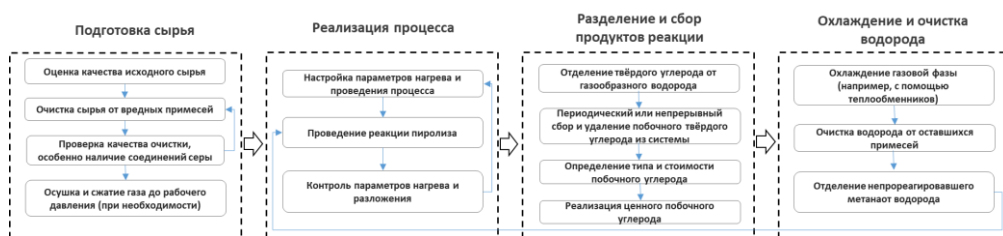


Рис. 1. Обобщенная схема этапов технологического процесса пиролиза

1. Подготовка сырья. На данном этапе осуществляется очистка метана (природного газа или биогаза) от примесей, в первую очередь соединений серы, которые способны вызывать дезактивацию катализаторов.

2. Нагрев и разложение метана. Подвод тепловой энергии к метану реализуется различными способами: через стенки реактора, с использованием горячего теплоносителя или посредством плазменного разряда. При достижении высоких температур происходит эндотермическое разложение CH_4 с образованием водорода (H_2) и твердого углерода (C).

3. Разделение и сбор продуктов реакции. На данном этапе осуществляется выделение твердого углерода из газовой фазы. В газофазных реакторах это реализуется методами фильтрации или гравитационного осаждения сажи; в жидкометаллических и солевых расплавах частицы углерода всплывают на поверхность; в плазменных установках улавливание углерода производится в специальных камерах-осадителях. Побочный углерод может удаляться непрерывно или периодически, в зависимости от конструкции установки.

4. Охлаждение и очистка водорода. Газообразный поток охлаждается, после чего проводится очистка водорода от примесей (остаточного метана, побочных углеводородов и др.) различными методами. Наиболее распространенным является метод адсорбции при переменном давлении (PSA, Pressure Swing Adsorption), позволяющий достигать уровня чистоты водорода не ниже 99,99 % по объему.

Параметры технологических режимов пиролиза метана

Варианты реализации пиролиза метана могут существенно различаться по ряду технологических параметров. Ключевые из них, определяющие кинетику и термодинамику процесса, представлены ниже с указанием характерных интервалов их значений.

Температура. Является главным фактором, определяющим скорость и полноту разложения метана. Для процесса без использования катализаторов требуются экстремально высокие температуры: равновесная конверсия метана при атмосферном давлении превышает 90 % лишь при $T > 1000$ °С. На практике термический пиролиз проводят при более высоких температурах. Катализаторы позволяют снизить рабочую температуру вплоть до 700–900 °С при сохранении высокой степени превращения. Например, при использовании никелевого катализатора степень превращения метана может достигать порядка 60 % уже при 600 °С, а при повышении температуры до 800 °С достигается степень разложения метана, близкая к термодинамическому равновесию. Однако длительное поддержание такого режима затруднено вследствие деградации активной поверхности катализатора и его термической деактивации. Расплавленные теплоносители (металлические и солевые среды) демонстрируют высокую эффективность при проведении пиролиза метана в температурном диапазоне 800–1100 °С. Плазменные технологии обеспечивают локальные области с экстремально высокими температурами (до нескольких тысяч градусов). При выборе температурного режима процесса необходимо учитывать термостойкость конструкционных материалов реактора. Дополнительно существенным фактором является энергетическая эффективность: повышение температуры сопровождается ростом удельных энергозатрат, что оказывает влияние на технико-экономические показатели процесса [1, 2, 4–9, 14].

Давление. Пиролиз, как правило, проводят при атмосферном или пониженном давлении. Низкое давление термодинамически выгодно для смещения равновесия в сторону образования продуктов разложения. Кроме того, при пониженном давлении облегчается селективное отделение водорода (сниженное парциальное давление инертного метана уменьшает степень разбавления водородного потока). В некоторых процессах применяют умеренно повышенное давление для увеличения производительности аппарата, но это требует использования более прочного оборудования. В жидкометаллических реакторах давление влияет на объем газа в пузырьках и время их пребывания: повышение давления уменьшает размер пузырьков, увеличивая поверхность контакта, но при этом увеличивается растворимость газа в расплаве и может замедляться выделение углерода [1, 2, 4, 6].

Время реакции (время контакта). Для достижения высокой конверсии метана необходим определенный минимальный контакт газа с горячей средой. Время пребывания газа в трубчатых реакторах регулируют скоростью потока и длиной трубы (обычно это время не превышает секунды). В кипящих слоях время реакции определяется высотой слоя и скоростью газа. В пузырьковых расплавах время реакции зависит от высоты столба жидкости и скорости барботажа. Плазма

благодаря высокой энергии позволяет существенно сократить время реакции – до долей секунды, однако достижение равновесной конверсии требует либо очень высокой температуры, либо повторного пропуска непрореагировавшего метана. Поэтому большинство промышленных схем предусматривает рециркуляцию метана, не вступившего во взаимодействие [1, 2, 4, 5].

Конверсия метана и выход водорода. В идеальном процессе пиролиза при полном превращении 1 моль CH_4 дает 2 моля H_2 (8 г H_2 на 16 г CH_4). На практике степень превращения зависит от режима. Термический пиролиз метана при температурах 1200–1300 °С позволяет достичь степени конверсии более 95 % при его однократном прохождении через реакционную зону без рециркуляции непрореагировавших компонентов, что соответствует значениям, близким к термодинамическому равновесию. Однако при более низкой температуре или недостаточном времени пребывания реагентов в реакционной зоне эффективность процесса существенно снижается. Каталитические процессы позволяют получить высокую конверсию даже при умеренных температурах, но только пока катализатор активен. В схемах с непрерывной регенерацией можно добиться стабильной конверсии ~70–80 %. Жидкометаллические реакторы с катализаторами позволяют получить до 90 % конверсии за счет хорошего теплообмена. В чистых расплавах солей без катализаторов степень конверсии значительно ниже (5–20 %), поэтому предполагается использовать каскад реакторов или добавлять катализатор. Выход водорода в процессе пиролиза метана, как правило, выражается в виде отношения количества моль полученного водорода к числу моль исходного метана либо в процентах от его теоретического значения, соответствующего стехиометрии реакции полного разложения ($\text{CH}_4 \rightarrow \text{C} + 2\text{H}_2$). Часто приводят показатель выхода водорода по отношению к содержанию водорода в сырье. Например, если из CH_4 извлечено 75 % возможного водорода (1,5 моля H_2 из 2), говорят о 75%-м выходе H_2 . В термокаталитических процессах реальный выход H_2 за один проход метана через реакционную зону составляет обычно 50–80 %, но многоразовая рециркуляция позволяет приблизиться к 100 % [1, 2].

Характеристика углеродного продукта. Форма и свойства твердого углерода зависят от способа пиролиза и катализатора. Газофазный пиролиз обычно дает аморфную сажу – мелкодисперсный порошок черного цвета (удельная поверхность >50 м²/г). При каталитическом пиролизе могут образовываться углеродные наноматериалы: например, на никелевых катализаторах часто наблюдается формирование углеродных нанотрубок (при определенных условиях), на железе – графитовых пластин или волокон. Эти продукты имеют высокую добавленную стоимость, хотя их целенаправленное получение требует тонкого контроля условий и не всегда совместимо с максимальным выходом водорода. При пиролизе в расплавленных средах углерод, как правило, осаждается в виде смеси мелкодисперсных частиц и укрупненных образований, которые могут содержать включения остатков металла или компонентов соли. Его можно дополнительно очищать (промывкой кислотой для удаления металлов) [7, 8, 12, 22, 25].

Углеродные продукты процесса пиролиза метана

В отличие от традиционной технологии паровой конверсии пиролиз метана не образует прямых выбросов CO_2 , поэтому получаемый водород считается условно «чистым», но возможны косвенные выбросы, величина которых зависит от множества факторов. Данные выбросы возникают не в самом процессе пиролиза, а на сопутствующих этапах жизненного цикла технологии, таких как добыча

и транспортировка метана, производство энергии для нагрева реактора, изготовление оборудования и катализаторов и другие [1, 20].

В виде побочного продукта выделяется твердый углерод, который можно улавливать и использовать в промышленности, избегая выбросов CO_2 в атмосферу. Таким образом, при пиролизе метана образуется не только водород, но и побочный продукт – твердый углерод, который можно использовать в промышленности (на 1 кг водорода образуется около 3 кг углерода). Ценность углерода как побочного продукта определяется его видом. Качество и форма углерода зависят от технологических параметров проведения процесса: температуры, типа катализатора, давления, скорости подачи метана и др. [7, 8, 12, 22, 25].

При обеспечении оптимальных условий реализации процесса пиролиза метана его можно рассматривать не только как способ получения чистого водорода, но и как источник практически всех видов ценных углеродных материалов, востребованных в высокотехнологичных отраслях: аморфного, графитоподобного и наноуглерода. Реализация побочного твердого углерода, генерируемого в ходе высокотемпературного пиролиза метана, позволяет существенно снизить удельные издержки на получение молекулярного водорода. Уровень себестоимости такого водорода по показателю LCOH (Levelised Cost of Hydrogen) приближается к экономическим метрикам «серой» паровой конверсии метана без улавливания CO_2 .

Дополнительные преимущества пиролиза зависят от агрегатного состояния побочного продукта: твердый углерод характеризуется химической инертностью, отсутствием фазовых переходов и не нуждается в криогенном охлаждении или использовании компрессоров [1, 23–25]. Такая физико-химическая стабильность существенно упрощает логистику, складирование и последующее промышленное использование материала, устраняя необходимость в капиталоемкой инфраструктуре, обязательной при обращении с газообразными потоками (CO_2 , CO , CH_4) на компрессорных станциях, в магистральных трубопроводах высокого давления и системах мониторинга утечек.

Процесс пиролиза метана как объект системного анализа

Из проведенного анализа следует, что пиролиз метана представляет собой не одну конкретную технологию, а совокупность технологических подходов к реализации процесса, основанных на общей химической реакции разложения метана (CH_4) с образованием водорода (H_2) и твердого углерода (C). При этом каждый из технологических подходов позволяет осуществить данную реакцию на технологических стадиях, принципиально отличающихся по физико-химическим основам протекающих процессов, условиям их проведения, конструктивным решениям, особенностям технической реализации и типам используемых энергоносителей.

Таким образом, процесс пиролиза метана можно рассматривать как сложно-организованный объект системного и мультифизического анализа, включающий множество взаимосвязанных стадий, последовательность и режимы проведения которых определяют специфику соответствующего технологического подхода. Совокупность этих стадий определяет эффективность, устойчивость и воспроизводимость технологии в целом. При этом каждая стадия характеризуется физико-химической природой протекающих процессов тепло- и массообмена, каталитических превращений, плазменного воздействия, взаимодействия с расплавами и др. Для структурированного описания объекта исследования каждая из этих

стадий может быть представлена в виде подсистемы, имеющей собственные входные и выходные параметры, определяющие ее эффективность. Например, каталитический пиролиз предполагает наличие отдельной подсистемы обращения катализатора, включающей его замену или регенерацию. Плазменный пиролиз требует наличия подсистемы электроснабжения, обеспечивающей подачу высоковольтной энергии для генерации тепловой плазмы и поддержания устойчивого разряда.

В рамках системного подхода важно учитывать возможность комбинирования различных технологических решений. В перспективе возможна разработка гибридных схем, таких как пиролиз в жидкометаллическом расплаве с микроволновой или индукционной поддержкой нагрева или комбинации каталитического газофазного пиролиза с применением солнечного способа нагрева. Это еще более усложняет структуру объекта исследования, поскольку различные варианты пиролиза могут использовать разные типы энергоносителей (электроэнергию, природный газ и др.) и иметь целевые продукты, различающиеся по назначению, качеству и стоимости, например углерод в форме углеродных наноструктур (нанотрубок, нанотрубок) или технической сажи.

В связи с этим технология пиролиза метана рассматривается как сложный многостадийный процесс, характеризующийся вариативностью состава катализаторов, широким диапазоном технологических режимов и многообразием возможных конечных продуктов. В рамках настоящего исследования основное внимание сосредоточено на трех ключевых компонентах: типах катализаторов, параметрах технологических режимов и составе продуктов реакции. Элементы реализации процесса, такие как конструкция реактора, системы нагрева или иные технические средства, не входят в предмет данного анализа и не рассматриваются. Однако особое внимание уделяется тому, что каждая конкретная рассматриваемая технология пиролиза допускает множественные варианты реализации, обусловленные выбором конкретных технических решений, включая выбор катализаторов и диапазон рабочих параметров.

Катализаторы, являющиеся ключевыми элементами технологической схемы пиролиза метана, оказывают определяющее влияние на эффективность процесса и условия его реализации. Они позволяют снижать температуру процесса, повышать степень конверсии метана и регулировать форму и качество образующегося углерода. Каждый тип катализатора имеет специфические особенности, влияющие на технологические характеристики процесса, экономическую эффективность и экологичность.

Технологические режимы проведения процесса пиролиза метана имеют решающее значение для его эффективности и определяются комбинацией параметров, представленных выше в п. «Углеродные продукты процесса пиролиза метана».

Продуктами пиролиза метана являются водород и углерод, характеристики и чистота которых зависят от выбранных режимов и условий процесса:

- водород (H_2) – основной энергетический продукт процесса, характеризующийся высокой степенью чистоты (обычно более 99 %). Высокая чистота позволяет использовать получаемый водород непосредственно для технологических целей или энергетических применений без существенной дополнительной очистки;

- образующийся углерод (C) может иметь различную морфологию и качество, включая такие формы, как аморфная сажа, графитоподобные структуры, углеродные нанотрубки и волокна. Структура и свойства углеродного продукта в значительной степени зависят от природы используемого катализатора, а также от параметров технологического режима, включая температуру, давление и состав

газовой фазы. Применение катализаторов на основе переходных металлов чаще всего приводит к образованию структурированных углеродных материалов, обладающих высокой добавленной стоимостью.

Изучение технологии пиролиза метана показывает, что данный процесс представляет собой множество взаимосвязанных компонентов и условий:

- исходное сырье (метан, газовые смеси);
- катализатор (тип, состав, физико-химические свойства);
- технологические параметры (температура, давление, соотношение расходов газов, скорость потока и др.);
- продукты реакции (водород и углерод в различных формах).

Указанные компоненты формируют единую взаимосвязанную систему, требующую многофакторного анализа в рамках системного подхода. Структурная схема приведена на рис. 2. Взаимодействие компонентов определяет совокупную эффективность и экологичность процесса пиролиза метана.



Рис. 2. Структурная схема системы пиролиза метана

Представленная структура отражает технологическую сложность и многофакторную природу реализации пиролиза метана, что подчеркивает необходимость применения системного подхода при проведении многофакторного анализа эффективности технологии.

Постановка задачи системного анализа процесса пиролиза метана

Как показано ранее, пиролиз метана следует рассматривать не как единую технологию, а как совокупность различных вариантов ее реализации, отличающихся по физико-химическим механизмам, конструктивным схемам установок и условиям протекания процесса. Такое разнообразие делает невозможным использование упрощенных методов анализа и требует применения системного подхода, позволяющего комплексно учитывать взаимосвязи между подсистемами и факторами процесса. В рамках системного анализа цель исследования заключается не только в оценке эффективности существующих решений, но и в выявлении направлений их возможной оптимизации и масштабирования.

Переход к системному анализу технологии пиролиза метана требует формализованной постановки задачи, для чего необходимо определить объект анализа, выделить его структурные элементы и зафиксировать ключевые параметры, подлежащие оценке. Сложность анализа процесса проявляется и в том, что его эффективность зависит от разнородных термодинамических, кинетических, конструктивных и эколого-экономических факторов. Поэтому решение задачи системного анализа должно включать формирование моделей, которые обеспечат сопоставимость различных вариантов реализации пиролиза,

учитывая взаимосвязи различных показателей, и позволят количественно оценивать эффективность по заданным критериям.

При разработке системных подходов к оценке эффективности пиролиза метана необходимо четко определить цели анализа, сформулировать конкретные исследовательские задачи и задать критерии, по которым будет оцениваться результативность технологии. Для этого требуется формализация исходных условий процесса, уточнение факторов, подлежащих учету (технологических, экономических, энергетических и экологических), а также установление системы показателей, позволяющих провести сопоставление различных вариантов реализации пиролиза на количественном уровне.

Предлагаемая методика основана на структурно-функциональном подходе и включает последовательное рассмотрение технологических, энергетических, экономических и экологических аспектов процесса с их последующей интеграцией в рамках многофакторной оценки.

В ходе системного анализа решаются следующие задачи:

- выявление ключевых факторов, определяющих эффективность пиролиза метана (температура, давление, время контакта, расход сырья, свойства и стабильность катализатора, конструктивные особенности реактора и др.), и количественная оценка их влияния;
- сопоставление различных технологических схем пиролиза (газофазного, жидкометаллического, плазменного и др.) по совокупности технико-экономических и экологических показателей;
- оценка и ранжирование катализаторов по активности, стабильности и сроку службы с формулированием направлений для их совершенствования;
- формирование системы критериев, обеспечивающих интегральную оценку эффективности различных вариантов реализации пиролиза;
- определение направлений оптимизации параметров процесса и возможностей интеграции побочных продуктов в промышленные технологические цепочки;
- анализ масштабируемости различных вариантов пиролиза и выявление факторов, влияющих на их переход от лабораторного уровня к демонстрационным и промышленным установкам.

Таким образом, системный анализ процесса пиролиза метана рассматривается как многоуровневая исследовательская задача, обеспечивающая основу для дальнейшей многофакторной количественной оценки эффективности технологических схем пиролиза. Для решения поставленных задач необходимо определить ключевые показатели эффективности, которые будут использоваться при анализе, сравнении и оптимизации. Основные показатели, предлагаемые для оценки пиролиза метана, представлены в таблице.

Определив основные показатели, можно приступить к формализации задачи многофакторной оценки эффективности процесса пиролиза метана, это позволит минимизировать субъективность принятия решений. Каждое технологическое решение или вариант реализации процесса характеризуется вектором показателей, перечисленных в таблице (конверсия, выход, энергозатраты, стоимость и т. д.). Необходимо разработать методику, позволяющую либо свести эти показатели к совокупному интегральному критерию, либо сравнивать разные варианты по отдельным критериям. В работе предлагается сформулировать целевые критерии качества, определяемые наборами основных параметров и характеризующие в совокупности общую эффективность процесса. Часть параметров подлежит

минимизации (затраты, энергопотребление, расход сырья, время на потоке), а часть в случае возможности – максимизации (выход, конверсия CH_4 , ресурс катализатора) с учетом действующих технологических ограничений и допустимых диапазонов технологических параметров.

Ключевые показатели эффективности

Показатель	Цель оптимизации	Единица измерения
Конверсия CH_4	max	%
Селективность по H_2	max	%
Производительность катализатора	max	Выход H_2 на 1 г кат., (л/ч)/г
Срок службы катализатора ($t_{1/2}$ активности)	max	минуты
Рыночная цена производимого твердого С	max	\$/т
Технологическая готовность (TRL – от 1 до 9)	max	балл
Удельные энергозатраты на H_2	min	кВт·ч/кг H_2
Себестоимость H_2 (LCOH)	min	€/кг H_2
Углеродный след (GWP)	min	кг CO_2 -экв/кг H_2

При постановке и решении задач многофакторного анализа и оптимизации следует учитывать влияние каждого из перечисленных в таблице показателей на технологию пиролиза метана, совершенствование которой имеет следующие цели:

1. Максимальный выход водорода – один из ключевых целевых ориентиров при разработке технологии пиролиза метана. В идеальном случае процесс должен обеспечивать практически полное превращение CH_4 в H_2 с выходом, близким к стехиометрическому (2 моль H_2 на 1 моль CH_4). Таким образом, целевыми параметрами являются достижение конверсии метана на уровне порядка 99 % и селективности по водороду, стремящейся к 100 %. Неполная конверсия сопровождается остаточным содержанием метана в продуктах, что ведет к потерям сырья и снижению экономической эффективности процесса.

2. Повышение эффективности и устойчивости катализатора – критически важная задача для каталитических способов пиролиза метана. Особое внимание уделяется увеличению срока службы катализатора за счет предотвращения его деградации, в первую очередь связанной с коксованием активной поверхности. Целевым ориентиром является минимизация потери каталитической активности (например, снижение активности не более чем на 10 % в течение 10 часов непрерывной работы), что позволяет сократить частоту замены катализатора и, соответственно, снизить эксплуатационные затраты. Важным показателем эффективности также выступает удельная продуктивность катализатора, выражаемая количеством водорода, получаемого на 1 г катализатора в единицу времени (моль $\text{H}_2 \cdot \text{г}^{-1} \cdot \text{ч}^{-1}$).

3. Минимизация побочных продуктов – одно из приоритетных направлений оптимизации процессов пиролиза метана. В идеализированном случае целевая реакция ($\text{CH}_4 \rightarrow \text{C} + 2\text{H}_2$) должна обеспечивать образование исключительно водорода и твердого углерода. Однако на практике в газовой фазе протекают побочные реакции, приводящие к образованию промежуточных углеводородов

(этан, этилен, ацетилен) и ароматических соединений, особенно характерных для высокотемпературных и плазменных режимов. Наличие побочных продуктов снижает селективность по водороду и усложняет технологическую схему вследствие необходимости дополнительной очистки газового потока. Для подавления нежелательных реакций разрабатываются специальные приемы, включая введение в реакционную смесь небольшого количества водорода, что способствует ингибированию образования углеводородных побочных соединений и, как следствие, увеличивает чистый выход H_2 .

4. Снижение удельных энергозатрат – один из ключевых факторов повышения общей эффективности процессов пиролиза метана. Поскольку данный процесс является эндотермическим, он требует значительного подвода тепловой энергии для протекания реакции разложения метана. В качестве основных критериев эффективности рассматриваются удельный расход энергии, выражаемый в киловатт-часах на 1 кг полученного водорода ($kВт\cdot ч/кг H_2$), и тепловой коэффициент полезного действия (КПД), отражающий степень использования внутренней энергии метана. Целевым ориентиром является минимизация энергозатрат и приближение их к термодинамическому пределу, равному $\sim 37,5$ $кДж/моль H_2$, с учетом неизбежных технологических потерь. В практических условиях ориентирами считаются: для плазменных технологий – удельные затраты на уровне 10–15 $кВт\cdot ч/кг H_2$, что позволяет конкурировать с электролизом, а для термического пиролиза – тепловой КПД выше 50 % за счет рационального использования энергии, содержащейся в метане.

5. Экономическая эффективность и масштабируемость – определяющие аспекты при оценке перспектив промышленного внедрения технологии пиролиза метана. Интегральным показателем в данном контексте выступает себестоимость производства водорода, выражаемая в €/кг или \$/кг H_2 (либо в руб/нм³ H_2 для сопоставления с отечественной практикой). Системный подход к оценке эффективности требует построения модели, учитывающей совокупные затраты на энергообеспечение, амортизацию оборудования, расход катализатора, а также издержки, связанные с утилизацией или, напротив, коммерческим использованием твердого углерода как побочного продукта. Целевым ориентиром промышленной реализации может считаться достижение себестоимости менее 2 €/кг H_2 , что соответствует современным международным конкурентоспособным ориентирам по ценам «чистого» водорода. Дополнительно необходимо учитывать капиталоемкость и масштабируемость технологии, определяющие возможность увеличения производительности без непропорционального роста капитальных затрат. Особое значение имеет сравнение технологических схем, допускающих линейное масштабирование за счет параллельного расширения (например, плазменных установок), с централизованными системами, требующими строительства крупногабаритных реакторов с существенно более высокой капиталоемкостью.

6. Экологические показатели – неотъемлемая часть системной оценки эффективности пиролиза метана. Несмотря на то, что сам процесс пиролиза не сопровождается прямыми выбросами диоксида углерода, полноценный системный анализ должен учитывать весь жизненный цикл, включая косвенные выбросы при производстве электроэнергии для нагрева, утечки метана при добыче и транспортировке сырья, а также способы утилизации или использования твердого углерода. Целевым экологическим ориентиром является минимизация углеродного следа, выражаемого в килограммах CO_2 -эквивалента на килограмм

произведенного водорода. Для технологий бирюзового водорода выброс парниковых газов не должен превышать 2 кг CO₂-экв/кг H₂. В рамках экологической оценки также рассматриваются другие факторы воздействия, включая безопасность обращения с углеродной пылью, потенциальные выбросы оксидов азота (NO_x) в плазменных установках и другие аспекты промышленной и экологической безопасности.

Перечисленные целевые ориентиры служат основой для формулирования критериев эффективности, позволяющих осуществлять сопоставление различных вариантов реализации процесса пиролиза метана. В этом контексте задача системного анализа формализуется как задача многокритериальной сравнительной оценки: требуется определить такие сочетания параметров процесса (температура T, давление P, расход и время контакта, тип и количество катализатора, способ подвода энергии и др.), при которых обеспечивается достижение максимальных значений показателей полезного результата (конверсия CH₄, выход H₂, селективность процесса) при одновременно минимизированном уровне затрат и побочных эффектов. При этом анализ проводится в условиях жестких технологических ограничений, включающих допустимые диапазоны материальных и энергетических ресурсов, устойчивость рабочего режима и техническую реализуемость процесса. Таким образом, системный анализ направлен на выявление наиболее рациональных направлений развития и масштабирования технологии пиролиза метана на основе многофакторной оценки ее эффективности.

Данный системный подход позволяет, во-первых, сравнить альтернативные технологии пиролиза по унифицированным показателям, а во-вторых, выявить узкие места и резервы улучшения каждого из вариантов. Для обеспечения корректности и достоверности системного анализа на следующем этапе выполняется статистическая обработка экспериментальных данных, которая позволяет уточнить количественные зависимости между основными показателями, проверить их значимость и сформировать итоговый набор показателей для многофакторной оценки эффективности.

Разработка методики системного анализа процессов пиролиза метана

Основываясь на анализе технологий пиролиза метана, представленном ранее, предлагается методика их системного анализа. В качестве исходных данных используются технологические регламенты опытных и промышленных установок; схемы установок и реакторов; отчетные и экспериментальные данные; БД лабораторных испытаний и опросные листы; экологические требования и нормативы; ТЭО, CAPEX/OPEX, цены энергоресурсов; базы данных IEA (Международного энергетического агентства), публикации, патенты; схемы информационных и управляющих потоков.

В связи с многоуровневой организацией процессов пиролиза метана и необходимостью интеграции технико-экономических, энергетических и экологических показателей для разработки методики системного анализа был выбран *структурно-функциональный системный подход с иерархической декомпозицией и итеративной обратной связью*. Структурно-функциональный системный подход представляет собой метод анализа, позволяющий рассматривать объект одновременно с двух позиций: через его структуру (совокупность элементов и их взаимосвязей) и через выполняемые ими функции, обеспечивающие целостность и устойчивость системы. В контексте исследования

пиролиз метана трактуется как сложная система, включающая ряд взаимосвязанных подсистем – реактор, катализатор, систему подачи метана, блоки отвода и разделения продуктов, подсистемы теплообеспечения и контроля. Такой подход позволяет не только описать структуру процесса, но и проанализировать роль каждого элемента, а также его влияние на ключевые показатели функционирования.

В рамках анализа учитываются как внутренние факторы (тип и характеристики катализатора, технологические параметры – температура, давление, скорость потока метана, время контакта и др.), так и внешние условия и ограничения (отсутствие выбросов CO₂, величина углеродного следа, образование вторичных побочных продуктов). Целевыми продуктами реакции выступают водород и твердый углерод, а также сопутствующие вещества. Структурно-функциональное представление позволяет проследить, как изменения в отдельных элементах или параметрах системы отражаются на общей эффективности и устойчивости процесса пиролиза метана.

Ключевыми особенностями разработанной методики системного анализа пиролиза метана являются:

- *комплексное рассмотрение объекта*: пиролиз метана анализируется как многоуровневая система, включающая технологические, энергетические, экологические и экономические подсистемы. При этом учет делается не только на уровне реактора или катализатора, но и на уровне обращения с конечными целевыми и побочными продуктами;

- *прямая интеграция с DEA-анализом*: входные и выходные параметры процесса (энергия, сырье, катализатор, выход H₂, стоимость, экологический след) формализованы таким образом, чтобы они могли быть непосредственно перенесены в матрицы входных и выходных параметров DEA-моделей. Это обеспечивает прозрачность перехода от качественного системного анализа к количественной многофакторной оценке;

- *учет динамической деградации катализатора*: в отличие от большинства методик, где катализатор рассматривается как статический элемент, в данной методике вводятся показатели стабильности, скорости зауглероживания и восстановления активности катализатора, что позволяет оценивать динамику эффективности катализатора во времени;

- *итеративный контур анализа*: реализован замкнутый цикл «ранжирование → уточнение режимов → верификация → повторное ранжирование», что обеспечивает адаптацию методики к изменению состава сырья, режимов или структуры побочных продуктов;

- *интеграция экономических и экологических показателей*: себестоимость H₂, рыночная стоимость твердого углерода, уровень TRL и углеродный след объединяются в многокритериальные модели. Такой подход позволяет выявлять не только технически эффективные, но и *рыночные / экологически устойчивые* варианты;

- *интеграция статистических методов*: предварительный корреляционный анализ данных позволяет исключить нерелевантные переменные, а анализ чувствительности обеспечивает проверку устойчивости результатов при варьировании входных данных в допустимых пределах;

- *ориентация на масштабирование*: методика учитывает сценарии увеличения производительности (модульное масштабирование, линейное расширение установок, укрупненные реакторы), что позволяет оценивать не

только эффективность текущих установок, но и перспективность их промышленного внедрения.

Такая методика обеспечивает как необходимую научную глубину системного анализа, так и практическую применимость результатов для промышленного внедрения низкоуглеродного пиролиза метана с возможностью масштабирования.

На рис. 3 представлена структурно-функциональная схема методики системного анализа процесса пиролиза метана, отражающая последовательность и содержание ее основных этапов. Разработанная методика системного анализа процессов пиролиза метана включает 12 последовательных этапов, сгруппированных в три логических блока: 1) структурно-функциональное описание и анализ подсистем; 2) оценка технико-экономических и экологических характеристик; 3) многофакторная DEA-оценка эффективности с последующей поддержкой управленческих решений.

1. Структурно-функциональное описание и анализ подсистем

1. *Анализ технологической структуры процесса.* Систематизация исходных данных, описание входных и выходных потоков, построение структурных и технологических схем различных вариантов пиролиза (газофазный, ЖМР, плазменный пиролиз и др.), разработка структурных схем установок и отдельных технологических блоков и узлов, определение ключевых технологических параметров.

2. *Анализ подсистем очистки реактора и регенерации катализатора.* Оценка влияния зауглероженности и дезактивации катализатора на снижение конверсии метана, анализ затрат на регенерацию и восстановление активности катализатора.

3. *Анализ взаимосвязей подсистем и качества информации.* На данном этапе проводится исследование внутренней структуры процесса пиролиза метана с акцентом на взаимодействие подсистем и характеристик качества информации. Для этого решаются следующие задачи:

- *построение моделей потоков ресурсов, энергии и информации.* Формализуются материальные, энергетические и информационные потоки между подсистемами (реактор, катализатор, система подачи сырья, система отвода и разделения продуктов, блоки теплообеспечения и др.), фиксируются направления потоков и их интенсивности;

- *анализ функций отклика на ключевые параметры.* Для каждого элемента системы определяются зависимости выходных характеристик от изменения входных условий (температуры, давления, состава сырья, активности катализатора и др.), что позволяет оценить чувствительность подсистем к вариациям параметров;

- *статистический анализ связей параметров и выходов.* Проводится исследование взаимозависимостей между входными и выходными параметрами процесса с использованием методов корреляционного и регрессионного анализа. Это позволяет количественно подтвердить наличие или отсутствие статистически значимых зависимостей (например, влияние температуры на конверсию CH_4 и выход H_2 , устойчивость работы катализатора и др.);

- *проверка полноты и достоверности данных.* Выполняется верификация информации о подсистемах: проводится сопоставление экспериментальных и расчетных данных, проверяется их согласованность и актуальность, выявляются пробелы в данных и возможные искажения;

– *синтез критериев оценки эффективности.* На основе выявленных связей и анализа качества информации формируется набор критериев эффективности (технологических, энергетических, экономических, экологических), обеспечивающих целостное описание функционирования системы. Если данные недостаточны для полной многокритериальной модели, производится выбор наиболее информативных критериев с обоснованием их приоритета.

II. Анализ и оценка технико-экономических и экологических показателей

4. *Анализ энергетической эффективности.* Оценка энергетических затрат на проведение процесса пиролиза, включая потребление тепловой и электрической энергии, расчет удельных энергозатрат на производство водорода, определение резервов их снижения при оптимизации режимов.

5. *Анализ ценных побочных углеродных материалов.* Идентификация видов получаемого твердого углерода (аморфный, графитоподобный, наноструктурированный), оценка их потенциальной коммерческой стоимости и влияния на себестоимость H_2 .

6. *Анализ уровня экологической безопасности.* Анализ побочных выбросов CO_2 , оценка рисков применения отдельных технологий (например, ЖМР – в случае разливов жидкого металла), учет потенциального вреда для экологии.

7. *Финансово-экономический анализ.* Оценка капитальных и эксплуатационных затрат, себестоимости H_2 , влияния варианта технологии на структуру и объем расходов, анализ окупаемости с учетом побочной продукции.

8. *Анализ уровня технологической готовности (TRL) и надежности.* Оценка надежности компонентов установки, систем автоматизации и управления, расчет вероятности отказов основных технологических блоков и элементов, сопоставление стадий коммерциализации технологий.

III. Многофакторная оценка эффективности и поддержка принятия решений

9. *Сравнительный многофакторный анализ эффективности.* Применение метода DEA для сопоставления различных схем пиролиза по совокупности технико-экономических, энергетических и экологических показателей, выявление эталонных (наиболее эффективных и перспективных) объектов сравнения на основе сформулированных критериев комплексной оценки эффективности.

10. *Формирование рекомендаций.* Разработка предложений по дальнейшей оптимизации режимов, повышению эффективности систем автоматизации и снижению экологических рисков.

11. *Верификация и повторная оценка.* Проверка достигнутых эффектов после внедрения рекомендованных изменений с использованием повторного DEA-анализа. При существенных расхождениях выполняется корректировка набора показателей и/или спецификации модели с последующей повторной оценкой до получения согласованных и воспроизводимых результатов.

12. *Поддержка управленческих решений.* Разработка регламентов внедрения наиболее эффективных и перспективных режимов, формирование рекомендаций по масштабированию, обновление базы данных и итеративное повторение анализа при поступлении новых данных.

В итоге разработанный структурно-функциональный подход обеспечивает целостный многофакторный анализ процесса пиролиза метана. Методика позволяет рассматривать установку одновременно на уровне ее структуры и функций, выявлять взаимосвязи между подсистемами, учитывать технологические, экономические и экологические характеристики. Такой

системный взгляд обеспечивает полноту анализа и делает возможным сопоставление различных вариантов реализации пиролиза на основе унифицированных критериев эффективности.

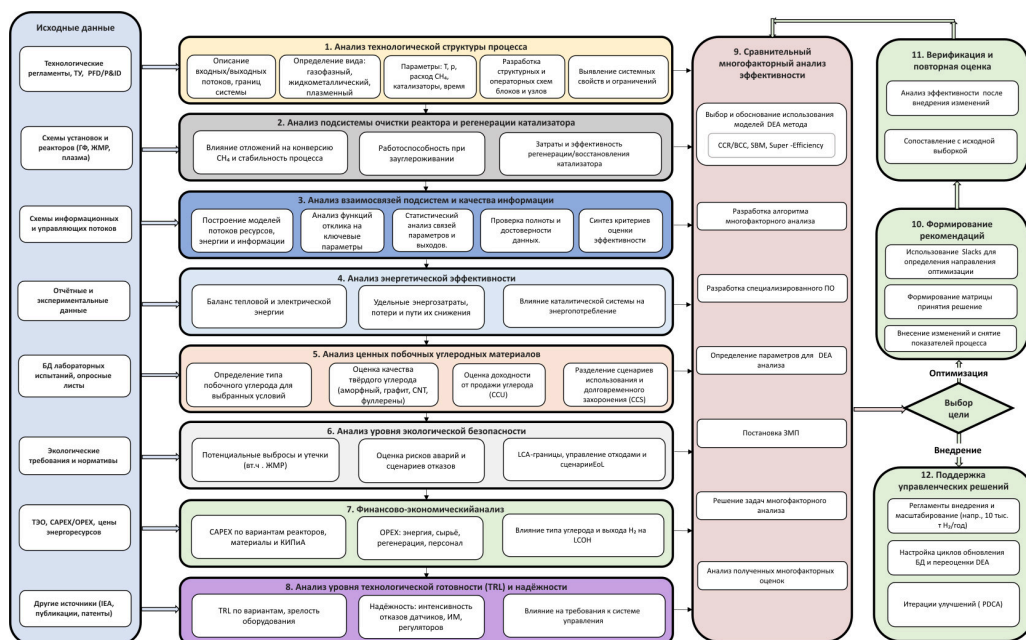


Рис. 3. Структурно-функциональная схема методики системного анализа процесса пиролиза метана

Особенностью предложенной методики является ее универсальность и адаптивность. Включение новых вариантов технологии пиролиза сводится к добавлению их параметров в базу данных и повторному проведению анализа, что позволяет оперативно оценить их положение относительно границы эффективности и определить потенциал для дальнейшего развития. Благодаря этому системный подход демонстрирует гибкость и расширяемость, обеспечивая практическую применимость результатов как для сравнительной научной оценки, так и для поддержки управленческих решений о масштабировании и промышленном внедрении технологии.

Ожидаемым результатом применения разработанной методики является формирование матрицы (карты) принятия решений по условиям эффективности технологий пиролиза метана. Такой инструмент задает диапазоны параметров, в пределах которых конкретное технологическое решение демонстрирует наибольшую результативность. Например, при низкой стоимости электроэнергии и высокой потребности в высокодисперсных углеродных материалах целесообразен плазменный пиролиз; при высокой стоимости электроэнергии и спросе на массовый углерод – каталитический пиролиз с выпуском аморфного углерода. Для децентрализованных производств (например, на АЗС) предпочтительны модульные плазменные установки, тогда как для крупнотоннажных комплексов – реакторные системы с жидкометаллическим расплавом, интегрируемые в существующие производственные цепочки. Подобные решения возможны лишь при одновременном системном учете технических, экономических и экологических факторов.

Выводы

Разработана методика системного анализа технологий пиролиза метана, представляющая собой универсальный инструмент для их комплексной оценки. В качестве методологической основы принят структурно-функциональный подход с иерархической декомпозицией и итеративной обратной связью. Он позволяет рассматривать процесс пиролиза как целостную систему со множеством подсистем, учитывая ее связь с внешней средой и возможность формирования входных и выходных параметров для использования в дальнейшем в DEA-анализе. Предложенная методика системного анализа включает три логических блока: 1) описание и анализ подсистем; 2) оценка технико-экономических и экологических характеристик; 3) интеграция данных и многофакторная DEA-оценка с последующей поддержкой управленческих решений.

Применение методики позволяет не только ранжировать существующие технологические решения по интегральной эффективности, но и выявлять узкие места, определять резервы для оптимизации и оценивать потенциал масштабирования. Такой комплексный подход обеспечивает объективность анализа, снижает влияние субъективных экспертных предположений и позволяет обосновывать рациональный выбор технологических схем и режимов пиролиза. Практическая значимость разработанной методики состоит в том, что ее применение создает основу для масштабирования и промышленного внедрения пиролиза метана как конкурентоспособной и экологически чистой технологии производства водорода.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Moghaddam A.L., Hejazi S., Fattahi M., Kibria M.G., Thomson M.J., AlEisa R., Khan M.A.* Methane Pyrolysis for Hydrogen Production: Navigating the Path to a Net Zero Future // *Energy & Environmental Science*. 2025. Vol. 18. P. 2747–2790. DOI: 10.1039/D4EE06191H.
2. *Schneider S., Bajohr S., Graf F., Kolb T.* State of the Art of Hydrogen Production via Pyrolysis of Natural Gas // *ChemBioEng Reviews*. 2020. Vol. 7, No. 5. Pp. 150–158. DOI: 10.1002/cben.202000014.
3. International Renewable Energy Agency (IRENA). Making the breakthrough: Green hydrogen policies and technology costs. – Abu Dhabi: IRENA, 2021. URL: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Nov/IRENA_Green_Hydrogen_breakthrough_2021.pdf (дата обращения: 03.09.2025).
4. *Abbas H.F., Wan Daud W.M.A.* Hydrogen production by methane decomposition: A review // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2010. Vol. 35. Pp. 1160–1190. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2009.11.036.
5. *Schneider S., Bajohr S., Graf F., Kolb T.* Verfahrensübersicht zur Erzeugung von Wasserstoff durch Erdgas-Pyrolyse // *Chemie Ingenieur Technik*. 2020. Vol. 92. No. 8. Pp. 1023–1032. – DOI: 10.1002/cite.202000021.
6. *Kudinov I.V., Kosareva E.A., Dolgikh V.D. et al.* Hydrogen Production by Thermocatalytic Decomposition of Methane: Modern Achievements (A Review) // *Petroleum Chemistry*. 2025. Vol. 65. Pp. 10–34. DOI: 10.1134/S0965544124080176.
7. *Mirkarimi R., Bensaid S., Negro V., Chiamonti D.* Review of methane cracking over carbon-based catalyst for energy and fuels // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2023. Vol. 187. Art. 113747. DOI: 10.1016/j.rser.2023.113747.
8. *McConnachie M., Konarova M., Smart S.* Literature review of the catalytic pyrolysis of methane for hydrogen and carbon production // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2023. Vol. 48. No. 66. Pp. 25660–25682. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2023.03.123.
9. *Кудинов И.В., Великанова Ю.В., Ненашев М.В., Амиров Т.Ф., Пименов А.А.* Пиролиз метана в расплавленных средах для получения водорода: обзор современных достижений // *Нефтехимия*. 2023. Т. 63. № 5. С. 627–639. DOI: 10.31857/S0028242123050015.
10. *Leal Pérez B.J., Medrano Jiménez J.A., Bhardwaj R., Goetheer E., Sint Annaland M., Gallucci F.* Methane pyrolysis in a molten gallium bubble column reactor for sustainable hydrogen

- production: Proof of concept & techno-economic assessment // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2021. Vol. 46, No. 7. Pp. 4917–4935. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2020.11.079.
11. Geißler T., Abánades A., Heinzel A. et al. Hydrogen production via methane pyrolysis in a liquid metal bubble column reactor with a packed bed // *Chemical Engineering Journal*. 2016. Vol. 299. Pp. 192–200. DOI: 10.1016/j.cej.2016.04.066.
 12. Upham D.C., Agarwal V., Khechfe A., Snodgrass Z.R., Gordon M.J., Metiu H., McFarland E.W. Catalytic molten metals for the direct conversion of methane to hydrogen and separable carbon // *Science*. 2017. Vol. 358. No. 6365. Pp. 917–921. DOI: 10.1126/science.aah5641.
 13. Sánchez-Bastardo N., Schlögl R., Ruland H. Methane Pyrolysis for Zero-Emission Hydrogen Production: A Potential Bridge Technology from Fossil Fuels to a Renewable and Sustainable Hydrogen Economy // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2021. Vol. 60. No. 30. Pp. 11855–11881. DOI: 10.1021/acs.iecr.1c01679.
 14. Palmer C., Tarazkar M., Metiu H., Gordon M., McFarland E. Methane pyrolysis in low-cost, alkali-halide molten salts at high temperatures // *Sustainable Energy & Fuels*. 2021. Vol. 5. No. 23. DOI: 10.1039/D1SE01408K.
 15. Kang D., Palmer C., Mannini D., Rahimi N., Gordon M., Metiu H., McFarland E. Catalytic Methane Pyrolysis in Molten Alkali Chloride Salts Containing Iron // *ACS Catalysis*. 2020. Vol. 10. No. 13. Pp. 7032–7042. DOI: 10.1021/acscatal.0c01262.
 16. Parkinson B., Patzschke C.F., Nikolis D., Raman S., Dankworth D.C., Hellgardt K. Methane pyrolysis in monovalent alkali halide salts: kinetics and pyrolytic carbon properties // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2021. Vol. 46. Pp. 6225–6238. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2020.11.150.
 17. Fulcheri L., Rohani V.-J., Wyse E., Hardman N., Dames E. An energy-efficient plasma methane pyrolysis process for high yields of carbon black and hydrogen // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2023. Vol. 48. No. 8. Pp. 2920–2928. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2022.10.144.
 18. Водопьянов А.В., Мансфельд Д.А., Синцов С.В., Корнев Р.А., Преображенский Е.И., Чекамаев Н.В., Ремез М.А. Плазмоллиз метана при помощи высокочастотного плазмотрона // *Письма в журнал технической физики*. 2022. Т. 48. Вып. 23. С. 34–37. DOI: 10.21883/PJTF.2022.23.53950.19383.
 19. Wnukowski M. Methane Pyrolysis with the Use of Plasma: Review of Plasma Reactors and Process Products // *Energies*. 2023. Vol. 16, No. 18. Art. 6441. DOI: 10.3390/en16186441.
 20. International Energy Agency (IEA). *Global Hydrogen Review 2024: Hydrogen production*. Paris: IEA, 2024. URL: <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2024/hydrogen-production> (дата обращения: 03.09.2025).
 21. Perreault P., Boruntea C.-R., Dhawan Yadav H., Portela Soliño I., Kummamuru N.B. Combined Methane Pyrolysis and Solid Carbon Gasification for Electrified CO₂-Free Hydrogen and Syngas Production // *Energies*. 2023. Vol. 16. No. 21. Art. 7316. DOI: 10.3390/en16217316.
 22. Lang Z., Zhu Y., Xu S., Cao G., Duan H. A Mini-Review on Hydrogen and Carbon Production from Methane Pyrolysis by Molten Media // *Energy & Fuels*. 2024. Vol. 38. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.4c03860.
 23. Holler J., Vine D. Methane Pyrolysis for Hydrogen Production: Closer Look brief. Arlington, VA: Center for Climate and Energy Solutions (C2ES), September 2025. 38 p. URL: <https://www.c2es.org/wp-content/uploads/2025/09/methane-pyrolysis-for-hydrogen-production.pdf> (дата обращения: 03.09.2025).
 24. Pudukudy M., Yaakob Z. Methane decomposition over Ni, Co and Fe based monometallic catalysts supported on sol-gel derived SiO₂ microflakes // *Chemical Engineering Journal*. 2015. Vol. 262. Pp. 1009–1021. DOI: 10.1016/j.cej.2014.10.077.
 25. Pudukudy M., Yaakob Z., Mazuki M.Z., Takriff M.S., Jahaya S.S. One-pot sol-gel synthesis of MgO nanoparticles supported nickel and iron catalysts for undiluted methane decomposition into CO_x-free hydrogen and nanocarbon // *Applied Catalysis B: Environmental*. 2017. Vol. 218. Pp. 298–316. DOI: 10.1016/j.apcatb.2017.04.070.

Статья поступила в редакцию 08.10.2025

DEVELOPMENT OF A METHODOLOGY FOR SYSTEMS ANALYSIS AND MULTI-FACTOR EFFICIENCY ASSESSMENT OF METHANE PYROLYSIS TECHNOLOGIES

A.V. Kazarinov¹

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

E-mail: artemrus987@gmail.com

Abstract. *The global energy transition and the drive to decarbonize the economy have set the scientific community the task of developing and implementing effective hydrogen production technologies.*

Methane pyrolysis is one of the promising technologies for producing low-carbon hydrogen, but the diversity of its technological implementations makes it difficult to conduct an objective comparative analysis and select the most effective solutions for industrial implementation.

Each implementation option is characterized by its own set of key features and indicators, differing in physicochemical mechanisms, reactor and plant design, process conditions, and the carbon product obtained. This diversity precludes simplified evaluation and necessitates a systems approach that captures interdependencies among process subsystems and factors. The developed systems analysis methodology is based on a structural-functional approach with hierarchical decomposition and an iterative feedback loop. It allows us to consider the pyrolysis process as a holistic system with multiple subsystems, taking into account its connection with the external environment and the possibility of forming input and output parameters for further use in Data Envelopment Analysis (DEA). The methodology for the systematic analysis of methane pyrolysis technology developed on the basis of this approach includes 12 stages grouped into three interrelated blocks: 1) description and analysis of subsystems, 2) assessment of technical, economic, and environmental characteristics, 3) data integration and a multi-factor DEA-based efficiency assessment, followed by managerial decision support.

The developed methodology provides a comprehensive treatment of the subject, explicitly integrates statistical analysis and DEA, accounts for catalyst deactivation dynamics, incorporates an iterative analysis loop, and is oriented toward scale-up and the identification of optimization opportunities.

Keywords: *methane pyrolysis, systems analysis, methodology, multi-factor efficiency assessment, hydrogen production, decarbonization, Data Envelopment Analysis, DEA.*



© The Author(s), 2025

¹ Artyom V. Kazarinov, Postgraduate Student, Dept. of Management and System Analysis of Thermal Power and Sociotechnical Complexes.

This work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Project No. FSSE-2024-0014) as part of the state assignment of Samara State Technical University.

REFERENCES

1. *Moghaddam A.L., Hejazi S., Fattahi M., Kibria M.G., Thomson M.J., AlEisa R., Khan M.A.* Methane Pyrolysis for Hydrogen Production: Navigating the Path to a Net Zero Future // *Energy & Environmental Science*. 2025. Vol. 18. P. 2747–2790. DOI: 10.1039/D4EE06191H.
2. *Schneider S., Bajohr S., Graf F., Kolb T.* State of the Art of Hydrogen Production via Pyrolysis of Natural Gas // *ChemBioEng Reviews*. 2020. Vol. 7, No. 5. Pp. 150–158. DOI: 10.1002/cben.202000014.
3. International Renewable Energy Agency (IRENA). Making the breakthrough: Green hydrogen policies and technology costs. – Abu Dhabi: IRENA, 2021. URL: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Nov/IRENA_Green_Hydrogen_breakthrough_2021.pdf (Accessed 03.09.2025).
4. *Abbas H.F., Wan Daud W.M.A.* Hydrogen production by methane decomposition: A review // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2010. Vol. 35. Pp. 1160–1190. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2009.11.036.
5. *Schneider S., Bajohr S., Graf F., Kolb T.* Verfahrenübersicht zur Erzeugung von Wasserstoff durch Erdgas-Pyrolyse // *Chemie Ingenieur Technik*. 2020. Vol. 92. No. 8. Pp. 1023–1032. – DOI: 10.1002/cite.202000021.
6. *Kudinov I.V., Kosareva E.A., Dolgikh V.D. et al.* Hydrogen Production by Thermocatalytic Decomposition of Methane: Modern Achievements (A Review) // *Petroleum Chemistry*. 2025. Vol. 65. Pp. 10–34. DOI: 10.1134/S0965544124080176.
7. *Mirkarimi R., Bensaid S., Negro V., Chiaramonti D.* Review of methane cracking over carbon-based catalyst for energy and fuels // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2023. Vol. 187. Art. 113747. DOI: 10.1016/j.rser.2023.113747.
8. *McConnachie M., Konarova M., Smart S.* Literature review of the catalytic pyrolysis of methane for hydrogen and carbon production // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2023. Vol. 48. No. 66. Pp. 25660–25682. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2023.03.123.
9. *Kudinov I.V., Velikanova Yu.V., Nenashev M.V., Amirov T.F., Pimenov A.A.* Piroliz metana v rasplavlennykh sredakh dlya polucheniya vodoroda: obzor sovremennykh dostizhenij [Methane Pyrolysis in Molten Media for Hydrogen Production: A Review of Modern Achievements] // *Neftekhimiya*. 2023. Vol. 63. No. 5. Pp. 627–639. DOI: 10.31857/S0028242123050015. (In Russian)
10. *Leal Pérez B.J., Medrano Jiménez J.A., Bhardwaj R., Goetheer E., Sint Annaland M., Gallucci F.* Methane pyrolysis in a molten gallium bubble column reactor for sustainable hydrogen production: Proof of concept & techno-economic assessment // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2021. Vol. 46, No. 7. Pp. 4917–4935. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2020.11.079.
11. *Geißler T., Abánades A., Heinzel A. et al.* Hydrogen production via methane pyrolysis in a liquid metal bubble column reactor with a packed bed // *Chemical Engineering Journal*. 2016. Vol. 299. Pp. 192–200. DOI: 10.1016/j.cej.2016.04.066.
12. *Upham D.C., Agarwal V., Khechfe A., Snodgrass Z.R., Gordon M.J., Metiu H., McFarland E.W.* Catalytic molten metals for the direct conversion of methane to hydrogen and separable carbon // *Science*. 2017. Vol. 358. No. 6365. Pp. 917–921. DOI: 10.1126/science.aah5641.
13. *Sánchez-Bastardo N., Schlögl R., Ruland H.* Methane Pyrolysis for Zero-Emission Hydrogen Production: A Potential Bridge Technology from Fossil Fuels to a Renewable and Sustainable Hydrogen Economy // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2021. Vol. 60. No. 30. Pp. 11855–11881. DOI: 10.1021/acs.iecr.1c01679.
14. *Palmer C., Tarazkar M., Metiu H., Gordon M., McFarland E.* Methane pyrolysis in low-cost, alkali-halide molten salts at high temperatures // *Sustainable Energy & Fuels*. 2021. Vol. 5. No. 23. DOI: 10.1039/D1SE01408K.
15. *Kang D., Palmer C., Mannini D., Rahimi N., Gordon M., Metiu H., McFarland E.* Catalytic Methane Pyrolysis in Molten Alkali Chloride Salts Containing Iron // *ACS Catalysis*. 2020. Vol. 10. No. 13. Pp. 7032–7042. DOI: 10.1021/acscatal.0c01262.
16. *Parkinson B., Patzschke C.F., Nikolis D., Raman S., Dankworth D.C., Hellgardt K.* Methane pyrolysis in monovalent alkali halide salts: kinetics and pyrolytic carbon properties // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2021. Vol. 46. Pp. 6225–6238. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2020.11.150.
17. *Fulcheri L., Rohani V.-J., Wyse E., Hardman N., Dames E.* An energy-efficient plasma methane pyrolysis process for high yields of carbon black and hydrogen // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2023. Vol. 48. No. 8. Pp. 2920–2928. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2022.10.144.

18. *Vodopyanov A.V., Mansfeld D.A., Sincov S.V., Kornev R.A., Preobrazhenskij E.I., Chekmarev N.V., Remez M.A.* Plazmoliz metana pri pomoshchi vysokochastotnogo plazmotrona [Methane Plasmatron Using a High-Frequency Plasmatron] // *Pisma v zhurnal tekhnicheskoy fiziki*. 2022. Vol. 48. No. 23. Pp. 34–37. DOI: 10.21883/PJTF.2022.23.53950.19383. (In Russian)
19. *Wnukowski M.* Methane Pyrolysis with the Use of Plasma: Review of Plasma Reactors and Process Products // *Energies*. 2023. Vol. 16, No. 18. Art. 6441. DOI: 10.3390/en16186441.
20. International Energy Agency (IEA). Global Hydrogen Review 2024: Hydrogen production. Paris: IEA, 2024. URL: <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2024/hydrogen-production> (дата обращения: 03.09.2025).
21. *Perreault P., Boruntea C.-R., Dhawan Yadav H., Portela Soliño I., Kummamuru N.B.* Combined Methane Pyrolysis and Solid Carbon Gasification for Electrified CO₂-Free Hydrogen and Syngas Production // *Energies*. 2023. Vol. 16. No. 21. Art. 7316. DOI: 10.3390/en16217316.
22. *Lang Z., Zhu Y., Xu S., Cao G., Duan H.* A Mini-Review on Hydrogen and Carbon Production from Methane Pyrolysis by Molten Media // *Energy & Fuels*. 2024. Vol. 38. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.4c03860.
23. *Holler J., Vine D.* Methane Pyrolysis for Hydrogen Production: Closer Look brief. Arlington, VA: Center for Climate and Energy Solutions (C2ES), September 2025. 38 p. URL: <https://www.c2es.org/wp-content/uploads/2025/09/methane-pyrolysis-for-hydrogen-production.pdf> (Accessed 03.09.2025).
24. *Pudukudy M., Yaakob Z.* Methane decomposition over Ni, Co and Fe based monometallic catalysts supported on sol-gel derived SiO₂ microflakes // *Chemical Engineering Journal*. 2015. Vol. 262. Pp. 1009–1021. DOI: 10.1016/j.cej.2014.10.077.
25. *Pudukudy M., Yaakob Z., Mazuki M.Z., Takriff M.S., Jahaya S.S.* One-pot sol-gel synthesis of MgO nanoparticles supported nickel and iron catalysts for undiluted methane decomposition into CO_x-free hydrogen and nanocarbon // *Applied Catalysis B: Environmental*. 2017. Vol. 218. Pp. 298–316. DOI: 10.1016/j.apcatb.2017.04.070.

Original article submitted 08.10.2025

УДК 656.11.004.14

ОБОСНОВАНИЕ ОПЕРАТИВНОСТИ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО МЕТОДА МОНИТОРИНГА ДОРОЖНОГО ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ СИГНАЛОВ АКСЕЛЕРОМЕТРА И АППАРАТА НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ

К.Е. Баданис¹

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

E-mail: badanis@bsuedu.ru

Аннотация. Рассматривается вопрос повышения оперативности метода мониторинга состояния дорожного покрытия городской агломерации. Рассмотрен комплексный подход, основанный на использовании опытного образца, включающего в себя акселерометр и GPS-устройство и установленного на общественном транспорте. Целью исследования является обоснование критерия оперативности комплексного метода мониторинга состояния дорожного покрытия на основе сигналов акселерометра и аппарата нечеткой логики, обеспечивающего ежедневный анализ динамики изменений состояния дорожного покрытия и повышающего оперативность принятия решений по его ремонту в г. Белгороде. Предложенный метод позволяет ежедневно анализировать динамику изменений дорожного покрытия и своевременно принимать решения, связанные с ремонтными мероприятиями. Для классификации состояния дорог используется аппарат нечеткой логики, что обеспечивает объективную оценку по пяти категориям: от «очень плохого» состояния дорожного покрытия до «очень хорошего». Сравнительный анализ с традиционными методами (визуальные осмотры, лазерное сканирование) показал преимущества нового метода: более высокая частота проверок (ежедневно), полный охват маршрута и отсутствие необходимости в специальных дорожных условиях (например, перекрытие полос движения). Одним из критериев эффективности метода является оперативность, который позволяет вычислить безразмерный коэффициент эффективности. Результаты исследования демонстрируют, что предложенный метод высокоэффективен и может быть интегрирован в систему умного города, ГИС, а также системы планирования ремонтных работ. Метод перспективен для применения в условиях ограниченных бюджетов и необходимости контроля качества дорожного покрытия.

Ключевые слова: городские дороги, транспортно-эксплуатационное состояние дорог, дорожное покрытие, состояние дорожного покрытия, мониторинг, метод мониторинга, GPS-датчик, акселерометр, методы диагностики, краудсорсинг.



© Автор(ы), 2025

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

Введение

Состояние дорожного покрытия напрямую влияет на безопасность дорожного движения, уровень износа транспортных средств (ТС) и экономику городской агломерации [1, 2]. Традиционные методы диагностики, такие как визуальные осмотры, использование мобильных лабораторий и лазерных профилометров [3, 4], обладают высокой точностью, но требуют значительных временных и финансовых ресурсов, а также специальных дорожных условий (например, перекрытия полос движения). Кроме того, существующие государственные стандарты [5–7] предполагают проведение инструментальных измерений один раз в месяц или реже, что не позволяет оперативно реагировать на изменение состояния дорог. В связи с этим возникает необходимость в более эффективных и экономически целесообразных методах мониторинга.

Целью данного исследования является обоснование критерия оперативности комплексного метода мониторинга состояния дорожного покрытия на основе сигналов акселерометра и аппарата нечеткой логики [8], обеспечивающего ежедневный анализ динамики изменений состояния дорожного покрытия и повышающего оперативность принятия решений по его ремонту в г. Белгороде.

Задачами исследования являются:

- проведение сравнительного анализа оперативности предложенного метода и традиционных подходов;
- обоснование возможности применения разработанного метода в условиях городской среды для ежедневного мониторинга состояния дорожного покрытия.

Среди существующих похожих решений выделим краудсорсинговую систему мониторинга дорожной поверхности (Crowdsourcing-Based Road Surface Monitoring System – CRSM), предложенную в [9]. Данное решение позволяет обнаруживать дорожные выбоины по экспериментальной выборке участков дорог длиной x метров с точностью до 90 %. Данная система внедрена на 100 стоянках такси в Шэньчжэне. CRSM может обнаруживать дорожные выбоины и оценивать уровень неровности дорожного покрытия с помощью аппаратных модулей, установленных на распределенных ТС. Эти модули используют недорогие акселерометры и GPS-устройства для получения данных о характере вибрации, местоположении неровности и скорости ТС.

Однако специфика автомобильных дорог Белгородской области ставит под сомнение данный процент точности. В отличие от CRSM метод мониторинга состояния дорожного покрытия позволяет обнаруживать дорожные выбоины с точностью не менее 93 %, практически без ложных срабатываний. Также стоит отметить сложность внедрения краудсорсингового подхода [10] для мониторинга состояния дорожного покрытия как в нашем регионе, как и в стране в целом.

Метод мониторинга состояния дорожного покрытия основан на использовании данных акселерометра и GPS-устройства, установленных на общественном транспорте [11, 12]. Сигналы акселерометра фильтруются с целью устранения шумов с помощью низкочастотного и медианного фильтров, а также путем применения экспоненциального сглаживания. Далее используется аппарат нечеткой логики для классификации состояния дорожного покрытия по пяти категориям:

- «очень плохое – требуется внеплановый капитальный ремонт»;
- «плохое – требуется капитальный ремонт»;
- «среднее – требуется комплексный текущий ремонт»;
- «хорошее – требуется выборочный текущий ремонт»;
- «очень хорошее – наблюдение».

Классификация проводится с использованием триангулярных функций принадлежности и дефаззификации по методу центра масс (*Centroid Method*) [13]. Предлагаемый метод реализован программно [14], а также был апробирован путем использования авторской имитационной модели [15].

Также следует отметить, что в отличие от существующих решений [9] предложенный метод обладает рядом принципиальных отличий, обеспечивающих его научную новизну, а именно:

- предложена оригинальная интеграция аппарата нечеткой логики с потоковой обработкой данных, полученных от акселерометра, что позволяет осуществлять непрерывную классификацию состояния дорожного покрытия (в том числе в реальном времени);

- разработана новая комбинированная стратегия фильтрации сигналов, включающая последовательное применение низкочастотного, медианного фильтров и экспоненциального сглаживания, адаптированная под условия движения общественного транспорта (разгон, торможение, повороты);

- предложен безразмерный коэффициент эффективности, основанный на линейной комбинации точности и оперативности, что позволяет количественно сравнивать различные методы мониторинга в единой шкале, что особенно актуально для систем управления городской инфраструктурой.

Таким образом, предлагаемый подход представляет собой не просто адаптацию существующих технологий, а оригинальную методологию комплексного мониторинга, сочетающую аппаратные, алгоритмические и аналитические компоненты в единую автоматизированную подсистему мониторинга состояния дорожного покрытия [16].

Методология

Пусть $\alpha(t)$ – исходный сигнал ускорения, полученный от акселерометра. Для удаления шумов, вызванных динамикой движения ТС, применяется трехэтапная фильтрация. Для исключения вибрационных частот используется низкочастотный фильтр Баттерворта (*Butterworth Low-Pass Filter*) 4-го порядка с частотой среза $f_c = 1$ Гц [17]. Для каждой оси (X , Y , Z) применяется следующее рекуррентное уравнение:

$$y[n] = \alpha \cdot x[n] + (1 - \alpha) \cdot y[n-1], \quad (1)$$

где $x[n]$ – входной сигнал (текущее значение ускорения) в момент времени n ; $y[n]$ – отфильтрованный выходной сигнал в момент времени n ; $y[n-1]$ – предыдущее отфильтрованное значение; α – коэффициент сглаживания. Коэффициент сглаживания рассчитывается следующим образом:

$$\alpha = \frac{2\pi f_c \Delta t}{1 + 2\pi f_c \Delta t}, \quad (2)$$

где $\Delta t = \frac{1}{f_s}$ – интервал дискретизации (f_s – частота дискретизации); f_c – частота среза фильтра.

Фильтр нижних частот реализован и настроен с помощью параметров, таких как частота среза (f_c) и частота дискретизации (f_s). В данном случае выбраны значения $f_c = 1$ Гц и $f_s = 100$ Гц, что обеспечивает оптимальный баланс между

подавлением шума и сохранением полезного сигнала [18]. Общая формула для вычисления выходного сигнала $y[n]$ имеет вид

$$y[n] = \sum_{k=0}^{N-1} h[k] \cdot x[n-k], \quad (3)$$

где $y[n]$ – значение выходного сигнала в момент времени n ; $x[n]$ – входной сигнал; $h[k]$ – коэффициенты фильтра (импульсная характеристика); N – порядок фильтра (количество коэффициентов).

С целью устранения шумов, вызванных внешними помехами (например, изношенной подвеской ТС), используется медианный фильтр (*Median Filter*) [18]. Для каждого элемента массива данных берется окно размером (w) и выбирается медианное значение:

$$y[i] = \text{Median} \left(x \left[i - \frac{w}{2}, i + \frac{w}{2} \right] \right), \quad (4)$$

где $\text{Median}(\cdot)$ – функция, вычисляющая медиану набора чисел; w – размер окна фильтра.

Далее для уменьшения высокочастотных компонентов шума в данных ускорений акселерометра используется метод экспоненциального сглаживания (*Exponential Smoothing*) [19]. Математическая формула вычисления экспоненциального сглаживания выглядит следующим образом:

$$S_t = \alpha \cdot X_t + (1 - \alpha) \cdot S_{t-1}, \quad (5)$$

где S_t – сглаженное значение в момент времени t ; X_t – исходное значение в момент времени t ; α – коэффициент сглаживания.

Коэффициент α может быть настроен для достижения баланса между чувствительностью к изменениям и подавлением шума. В данном случае выбран малый коэффициент ($\alpha = 0.01$), что обеспечивает высокую чувствительность к изменениям состояния дорожного покрытия при сохранении устойчивости к шуму [20].

На заключительном этапе предобработки сигналов акселерометра проводится расчет пороговых значений для каждого компонента ускорения (X , Y , Z) на основе медианных значений и стандартного отклонения данных ускорений:

- «очень плохое – внеплановый капитальный ремонт»: точки функции: ($0.5 * xThreshold$, $1.0 * xThreshold$, $1.5 * xThreshold$);
- «плохое – капитальный ремонт»: точки функции: ($0.5 * yThreshold$, $1.0 * yThreshold$, $1.5 * yThreshold$);
- «среднее – комплексный текущий ремонт»: точки функции: ($0.5 * zThreshold$, $1.0 * zThreshold$, $1.5 * zThreshold$) с коэффициентом усиления 1.5 для повышения чувствительности к средним неровностям;
- «хорошее – выборочный текущий ремонт»: точки функции: (0 , $0.5 * xThreshold$, $1.0 * xThreshold$);
- «очень хорошее – наблюдение»: точки функции: (0 , 0 , $0.5 * xThreshold$).

Выбранное значение коэффициента, равное 0.5, позволяет уменьшить нижнюю границу на 50 % от порогового значения, что позволяет сделать функцию принадлежности более широкой.

Далее для выполнения классификации на основе полученных и обработанных данных от акселерометра необходимо вычислить значения дефазификации:

$$\text{Def}_{\text{Value}} = \frac{\sum_{i=1}^n (\mu_i \cdot o_i)}{\sum_{i=1}^n \mu_i}, \quad (6)$$

где μ_i – степень принадлежности; o_i – выходные значения (0, 1, 2, 3, 4), а также значения принадлежности:

$$\mu(x, a, b, c) = \begin{cases} 0, & \text{если } x \leq a \text{ или } x \geq c; \\ (x - a) / (b - a), & \text{если } a < b < c; \\ (c - x) / (c - b), & \text{если } b < x < c; \\ 1, & \text{если } x = b, \end{cases} \quad (7)$$

которые выполняются на основе предварительно определенных правил, что делает процесс детерминированным и быстрым. На рис. 1 представлена блок-схема алгоритма процесса классификации состояния дорожного покрытия на основе обработанных сигналов акселерометра.

Нормативные требования к периодичности диагностики дорожного покрытия и их ограничения в контексте оперативного мониторинга

Вопрос о периодичности проведения диагностики и инструментальных измерений состояния дорожного покрытия регулируется как федеральными стандартами, так и региональными нормативными актами, что позволяет адаптировать требования к специфике климатических условий и интенсивности транспортных потоков. Общие требования и порядок проведения диагностических работ на автомобильных дорогах регламентируются ГОСТ 33388-2015 [21].

Состав, объемы и периодичность диагностики определяются владельцами автодорог применительно к различным категориям: федеральным трассам общего пользования, региональным и межмуниципальным дорогам, местным автодорогам, а также частным автодорожным сетям.

Диагностика автомобильных дорог, выполняемая систематически в течение всего срока их эксплуатации, классифицируется в зависимости от условий и целей проведения:

- полная диагностика направлена на всестороннюю оценку всех заданных параметров и характеристик состояния дороги. Ее цель – установить фактический технический уровень и эксплуатационное состояние дорожного покрытия, а затем сравнить полученные данные с нормативными требованиями. Этот вид диагностики особенно важен для формирования базовых показателей при вводе дороги в эксплуатацию или после значительных изменений;

- приемочная диагностика проводится при сдаче автомобильных дорог в эксплуатацию после завершения ремонтных или строительных работ. В рамках этого этапа определяются все установленные параметры для подтверждения соответствия объекта проектной документации и нормативным стандартам;

- плановая диагностика фокусируется на анализе только переменных характеристик дорожного покрытия, таких как продольная ровность, коэффициент сцепления, повреждения дорожного покрытия (трещины, выбоины и т. д.), а также прочность дорожной конструкции. Исследования могут быть выборочными, если предварительный анализ выявил участки, требующие ремонта или временного ограничения движения. Основная задача – оценить текущее эксплуатационное состояние дороги и определить потребность в проведении ремонтных мероприятий, а также обновить базу данных о состоянии дорожной сети;

– специализированная диагностика применяется для углубленного анализа конкретных параметров и характеристик дороги, когда необходимо выявить причины их несоответствия нормативным требованиям. Этот вид диагностики рекомендуется выполнять на участках, запланированных для ремонта, капитального ремонта или реконструкции.

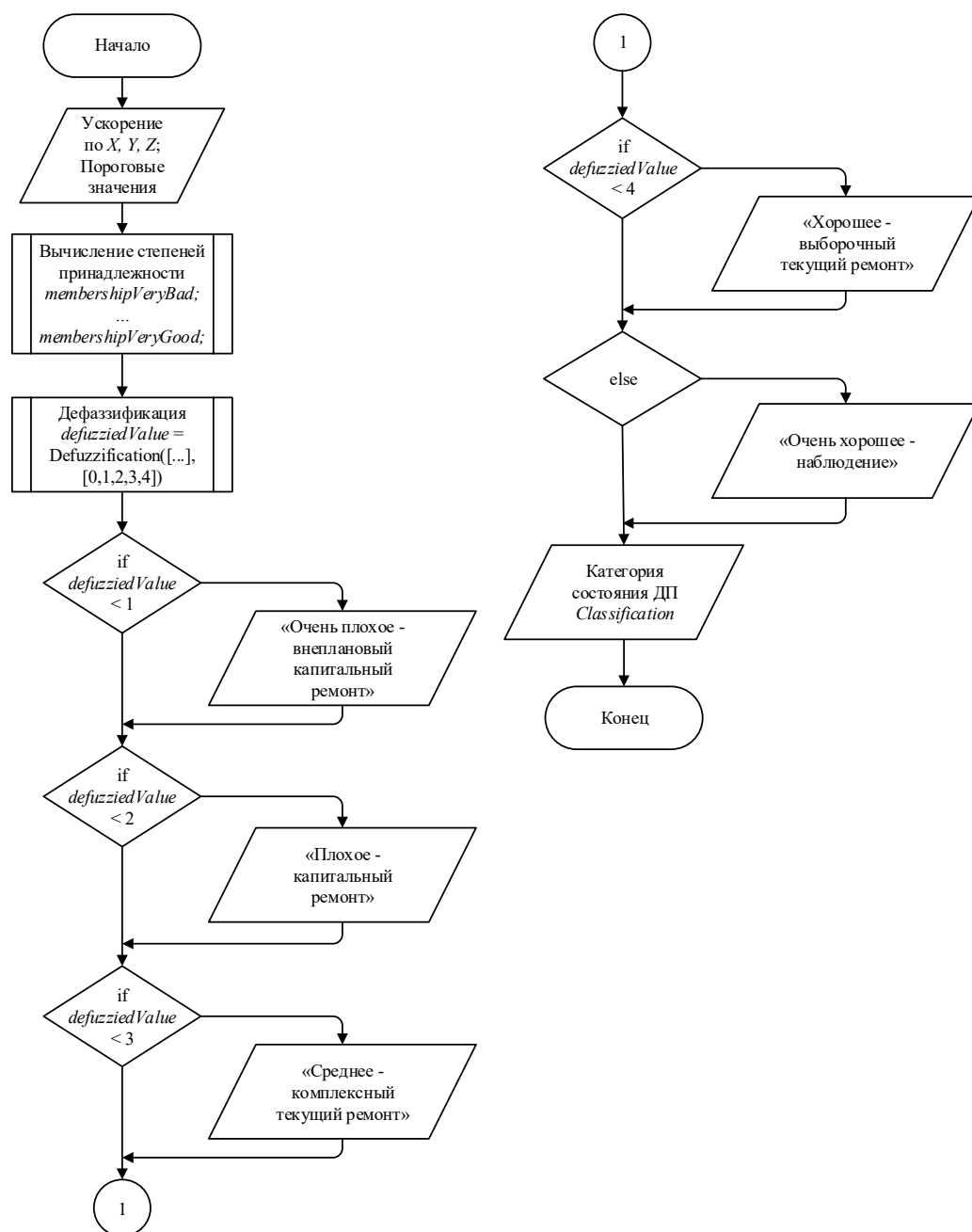


Рис. 1. Блок-схема алгоритма процесса классификации состояния ДПП на основе данных ускорений акселерометра

Отдельно стоит отметить случаи выполнения специализированной диагностики по индивидуальному заданию. Она проводится, когда требуется установить причины ухудшения качества дорожных элементов (например, при концентрации дорожно-транспортных происшествий – ДТП), определить параметры для реализации проектов реконструкции или капитального ремонта, а также оценить возможность проезда ТС с тяжелыми или крупногабаритными грузами. Такой вид диагностики также актуален при необходимости актуализации информации о текущем транспортно-эксплуатационном состоянии (ТЭС) дороги.

Согласно анализу источника [21] типы диагностики автодорог, а также условия и рекомендуемая частота ее проведения систематизированы в табл. 1.

Собранные в процессе диагностики автомобильных дорог данные классифицируются на две основные категории:

- информация, поступающая из внешних источников, таких как технические паспорта объектов, базы дорожных данных, проектная и рабочая документация, а также другие релевантные материалы;
- данные, полученные в ходе полевых исследований, которые собираются непосредственно на участках дорог с использованием специализированного оборудования и методик.

Таблица 1

Типы диагностики автодорог, условия и рекомендуемая частота проведения

Тип диагностики автодорог	Цель проведения диагностики	Рекомендуемая частота проведения диагностики
Полная	Для установления исходного фактического технического уровня и эксплуатационного состояния автомобильной дороги	Единовременно: при передаче дороги от одного владельца другому; при отсутствии данных предыдущей полной диагностики; при необходимости актуализации информации по всему комплексу параметров и характеристик состояния дороги. Частота проведения таких работ регламентируется категорией дороги: для дорог I-III категорий – не реже одного раза в пять лет, для дорог IV-V категорий – один раз в десять лет
Приемочная	При вводе автомобильной дороги в эксплуатацию после завершения строительства, реконструкции, капитального ремонта или текущего ремонта	Единовременно на участках, где проводились работы
Плановая	Для оценки показателей эксплуатационного состояния дорог	Для дорог I-III категорий – ежегодно; для дорог IV-V категорий – один раз в три года (при этом проверка продольной ровности и выявление дефектов дорожного покрытия проводятся ежегодно)

Специализированная	Специализированная диагностика выполняется по индивидуальному заданию в случаях, требующих углубленного анализа состояния дороги. Это может быть связано с необходимостью: – выявления причин снижения параметров и характеристик элементов дороги (например, при анализе зон концентрации ДТП); – определения параметров при реализации проектов реконструкции, капитального ремонта или других дорожных мероприятий; – оценки возможности движения ТС с тяжелыми или крупногабаритными грузами; – актуализации данных о ТЭС дороги в иных специфических ситуациях	Перечень измеряемых показателей формируется в зависимости от задач, которые необходимо решить в рамках данного вида диагностики
--------------------	--	---

На федеральном уровне периодичность мониторинга устанавливается ГОСТ Р 50597-2017 «Автомобильные дороги и улицы. Требования к эксплуатационному состоянию» [22]. Согласно данному документу, визуальный осмотр дорожного покрытия должен проводиться не реже одного раза в месяц для всех категорий дорог. Инструментальный контроль, включающий измерение параметров ровности, шероховатости и других характеристик, осуществляется не реже одного раза в год. Особое внимание уделяется участкам с высокой интенсивностью движения, где частота осмотров может быть увеличена.

Дополнительные рекомендации содержатся в своде правил СП 34.13330.2012 «Автомобильные дороги. Актуализированная редакция СНиП 2.05.02-85» [23]. Данный документ дифференцирует периодичность осмотров в зависимости от категории дороги. Для дорог I-II категорий (магистральные дороги) предусмотрено проведение осмотров ежемесячно, тогда как для дорог III-V категорий (местные дороги) – один раз в квартал. Кроме того, внеочередные осмотры обязательны при возникновении аварийных ситуаций или после воздействия неблагоприятных погодных условий, таких как сильные осадки, гололедица или снегопады.

На региональном уровне в г. Белгороде действуют дополнительные нормативы, учитывающие местные условия эксплуатации дорог. Постановление Правительства Белгородской области № 123-пп от 20.03.2019 «Об утверждении порядка содержания автомобильных дорог общего пользования» [24] устанавливает следующие требования:

- визуальный осмотр: проводится ежемесячно для всех дорог, находящихся в пределах городской черты;
- инструментальный контроль: выполняется один раз в полугодие для дорог местного значения и ежеквартально для дорог с повышенной интенсивностью движения.

Особое внимание уделяется участкам, расположенным в зонах повышенной аварийности или на подъездных путях к социально значимым объектам, таким как больницы, школы и промышленные предприятия. Внеочередные осмотры предусмотрены при возникновении чрезвычайных ситуаций, связанных с разрушением дорожного покрытия или его деформацией.

На уровне муниципального управления в г. Белгороде действует Приказ Департамента городского хозяйства № 45-од от 15.02.2020, регламентирующий порядок содержания дорог [25]. Согласно данному документу периодичность осмотров определяется следующим образом:

- визуальный осмотр: осуществляется ежемесячно для всех дорог;
- инструментальный контроль: проводится один раз в полугодие для дорог местного значения и ежеквартально для магистральных дорог.

Кроме того, документ предусматривает использование современных технологий, таких как лазерные сканеры и спутниковые системы мониторинга, что позволяет повысить точность и оперативность оценки состояния дорожного покрытия.

Для обоснования оперативности метода мониторинга состояния дорожного покрытия необходимо сосредоточиться на ключевых этапах алгоритма, которые обеспечивают ежедневную обработку данных и принятие решений, связанных с ремонтом дорожного покрытия. Оперативность метода обоснована с точки зрения частоты проведения мониторинга. Оперативность (O) измеряется в обратной пропорциональности к времени выполнения одного цикла мониторинга.

Экспериментальные исследования

Метод позволяет проводить мониторинг состояния дорожного покрытия ежедневно, тогда $O = \frac{1}{24}$. Также метод предполагает использование установленного в общественный транспорт (автобус) опытного образца [16] (рис. 2) для регистрации вибраций и ускорений, вызванных неровностями дорожного покрытия, а также времени фиксации и местоположения.

В качестве примера выбран автобусный маршрут № 111У (г. Белгород), движущийся от остановки «Дубовое центр» до «Шопино». Протяженность маршрута составляет 19 км. Время движения по маршруту – 47 минут. Маршрут проходит через Белгород, Северный, Дубовое и охватывает несколько самых оживленных дорожных артерий города [26].

Основными участками дороги являются:

- улица Щорса (ровное дорожное покрытие, небольшой износ);
- пересечение улиц Щорса и Богдана Хмельницкого (интенсивное движение, локальные просадки асфальтового покрытия, колеи);
- улица Богдана Хмельницкого (местами трещины и деформации).

В табл. 2 представлено обоснование оперативности метода с точки зрения сравнения предлагаемого метода с существующими традиционными методами мониторинга состояния дорожного покрытия.

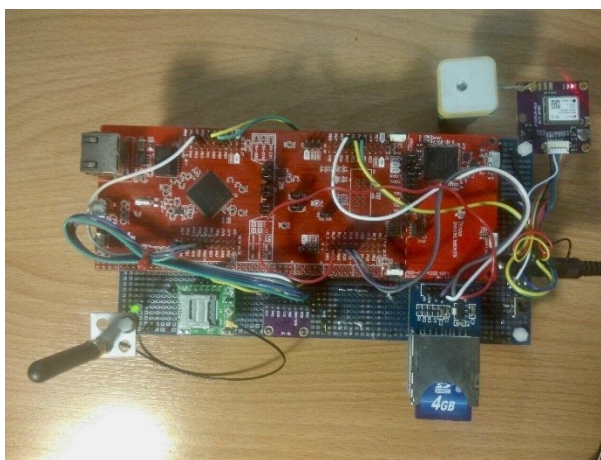


Рис. 2. Опытный образец

Таблица 2

Обоснование оперативности предлагаемого метода

Критерий	Традиционные методы (визуальные инспекции, лазерное сканирование)	Предлагаемый метод
Частота проверки	Раз в месяц, раз в 3 месяца, раз в полгода, раз в год	Постоянно (каждый рейс автобуса)
Скорость сбора данных	Требуется спецтехника и возможна остановка или ограничение движения	В реальном времени (данные записываются на ходу)
Охват	Точечные проверки	Весь маршрут (включая труднодоступные места)
Реакция на изменения	Задержка в выявлении новых дефектов	Мгновенное обнаружение (например, после зимнего сезона)
Стоимость	Высокая стоимость оборудования (бригады)	Низкая

На рис. 3 представлена архитектура метода мониторинга состояния дорожного покрытия. Предполагается, что после завершения рабочего дня водитель автобуса передает собранные за день данные с флеш-карты на центральный обработчик данных (ЦОД), расположенный на конечной автобусной станции. Далее данные обрабатываются и затем могут быть переданы в органы дорожного управления с целью дальнейшего анализа собранной и обработанной информации и принятия решений, связанных с проведением ремонтных работ на дорогах.



Рис. 3. Архитектура метода мониторинга состояния дорожного покрытия

Результаты обработки сигналов (время фиксации, местоположение и категории состояния дорожного покрытия) записываются в выходной csv-файл. Также результаты обработки могут быть при необходимости визуализированы путем использования программы визуализации [27]. На рис. 4 представлено результирующее окно программы, которое состоит из следующих элементов:

- график состояния дорожного покрытия, который показывает изменение уровня состояния дорожного покрытия во времени. Для этого используются числовые значения от 0 до 4 для классификации. График позволяет увидеть: как менялось состояние дорожного покрытия на протяжении всего пройденного маршрута; какие участки требуют ремонта; когда именно произошли изменения состояния дорожного покрытия;
- круговая диаграмма, которая показывает общее распределение категорий состояния дорожного покрытия;
- таблица с данными, которая содержит время фиксации, местоположение ТС, классификацию дорожного покрытия и числовое значение дефазификации, характеризующее степень повреждений дорожного покрытия.

Как было отмечено ранее, традиционные методы мониторинга дорожного покрытия часто требуют ручной обработки данных или использования сложных и дорогостоящих инструментов, таких как лазерные профилометры. В отличие от них, предложенный метод:

- позволяет произвести ежедневное покрытие всего маршрута без привлечения дополнительных ресурсов;
- минимизирует влияние субъективной оценки на принятие решений о проведении ремонтных работ (снижение зависимости от человеческого фактора);
- дает возможность быстрого обнаружения дефектов дорожного покрытия (трещин, выбоин, колеи и т.д.);
- автоматизирует процесс классификации состояния дорожного покрытия, на основе которой могут приниматься решения о необходимости проведения текущего или капитального ремонта;
- позволяет визуализировать результаты классификации состояния дорожного покрытия в формате таблицы и диаграмм (см. рис. 4), а также на ГИС (рис. 5);
- может быть интегрирован в систему умного города.

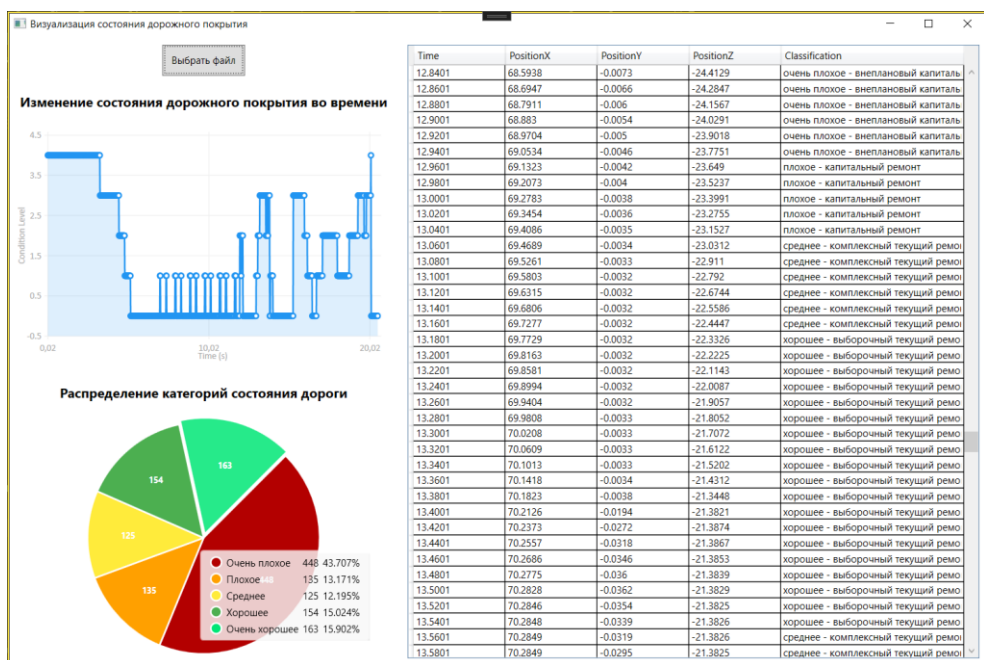


Рис. 4. Результат работы программы

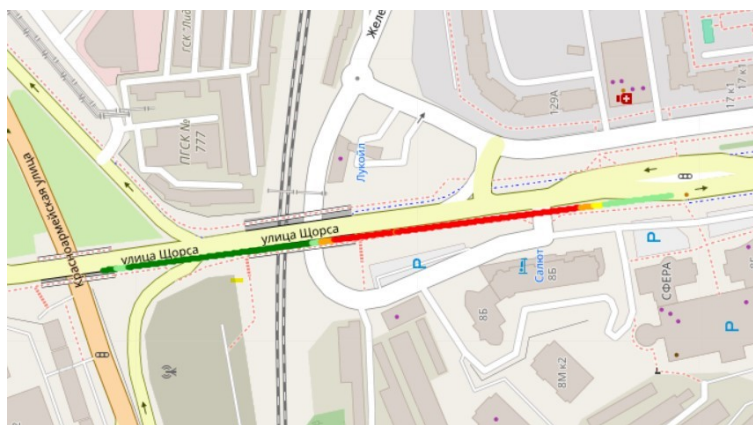


Рис. 5. Пример графической визуализации состояния дорожного покрытия

На рис. 5 разными цветами показано состояние дорожного покрытия участка дороги:

- красный – «очень плохое – требуется внеплановый капитальный ремонт»;
- оранжевый – «плохое – требуется капитальный ремонт»;
- желтый – «среднее – требуется комплексный текущий ремонт»;
- светло-зеленый – «хорошее – требуется выборочный текущий ремонт»;
- зеленый – «очень хорошее – наблюдение».

Предполагается, что метод оценки состояния дорожного покрытия на основе сигналов акселерометра и аппарата нечеткой логики позволит компенсировать потерю данных, возникающую в промежутках между ежемесячными визуальными

осмотрами специалистами дорожных служб, а также редкими и дорогостоящими высокоточными инспекционными обследованиями ТЭС дорог.

Результаты

Метод мониторинга состояния дорожного покрытия основан на использовании акселерометра и GPS-устройства, с помощью которых появляется возможность определить ситуацию с вибрациями в дорожной сети, вызванными неровностями (выбоинами), и их соответствующее местоположение [28]. На рис. 6 изображена обобщенная схема метода мониторинга состояния дорожного покрытия.



Рис. 6. Обобщенная схема метода мониторинга состояния дорожного покрытия

Метод разработан для работы с потоковыми данными, что позволяет обрабатывать информацию в режиме реального времени. Каждый этап алгоритма выполняется последовательно, и результаты одного этапа сразу передаются на следующий, что позволяет исключить задержки, связанные с ежедневным накоплением данных.

Эффективность метода характеризуется двумя основными параметрами:

- точность (T) в процентах (на основе ранее выполненных вычислений $T = 93\% = 0.93$), T находится в диапазоне $[0,1]$;
- оперативность (O), измеряемая в обратной пропорциональности к времени выполнения одного цикла мониторинга. Метод позволяет проводить мониторинг состояния ДП ежедневно, тогда $O = \frac{1}{24}$, O также находится в диапазоне $[0,1]$.

Эффективность метода можно описать через линейную комбинацию этих двух параметров:

$$E = \alpha \cdot T + \beta \cdot O, \quad (8)$$

где E – безразмерный коэффициент эффективности; α и β – весовые коэффициенты, отражающие относительную важность точности и оперативности соответственно ($\alpha + \beta = 1$, чтобы весовые коэффициенты были сбалансированы).

В явном виде безразмерный критерий эффективности на основании выполненных вычислений точности метода, а также обоснованной оперативности метода мониторинга состояния дорожного покрытия выглядит следующим образом:

$$E = \alpha \cdot 0.93 + \beta \cdot \frac{1}{24}. \quad (9)$$

Следовательно, значение E будет находиться в диапазоне $E \in [0,1]$.

Значение $E = 1$ соответствует идеальному методу, где и точность, и оперативность достигают своих максимальных значений. Значение $E = 0$ указывает на полную неэффективность метода. Если рассматривать E как универсальный показатель, то можно предложить следующую шкалу для оценки эффективности (табл. 3).

Таблица 3

Интерпретация значения эффективности (E)

Шкала	Описание
$E > 0.8$	Метод высокоэффективен. Точность и/или оперативность находятся на очень высоком уровне
$0.6 \leq E \leq 0.8$	Метод эффективен. Точность и оперативность удовлетворяют большинству требований
$0.4 \leq E \leq 0.6$	Метод имеет среднюю эффективность. Может потребоваться оптимизация либо точности, либо оперативности
$E < 0.4$	Метод малоэффективен. Требуется серьезное улучшение

Коэффициенты α и β (на основе приоритетности) выбраны на основании экспертного мнения сотрудников кафедры эксплуатации и организации движения автотранспорта БГТУ имени Шухова.

Важно понимать, что изменение этих коэффициентов влияет на значение E и, соответственно, на интерпретацию результата:

- если $\alpha > \beta$: точность играет доминирующую роль. Высокое значение E будет достигаться преимущественно за счет высокой точности, даже если оперативность ниже;
- если $\beta > \alpha$: оперативность становится ключевым фактором. Метод с высокой скоростью выполнения, но чуть меньшей точностью может получить высокое значение E ;
- если $\alpha = \beta$: точность и оперативность имеют одинаковый вес. Результат зависит от их равновесия.

Вычислим значение E , подставив имеющиеся значения точности и оперативности метода мониторинга состояния ДП, а также выбранные экспертами коэффициенты α и β в формулу (9):

$$E = 0.7 \cdot 0.93 + 0.3 \cdot \frac{1}{24} = 0.664. \quad (10)$$

Согласно интерпретации значения E по табл. 3 полученное значение $E = 0.664$ относится к шкале $0.6 \leq 0.664 \leq 0.8$, что указывает на то, что метод эффективен, а точность и оперативность удовлетворяют большинству требований. На рис. 7 представлен компаративный анализ эффективности автоматизированного метода ежедневного мониторинга состояния дорожного покрытия по сравнению со стандартной инспекционной практикой, проводимой один раз в месяц.

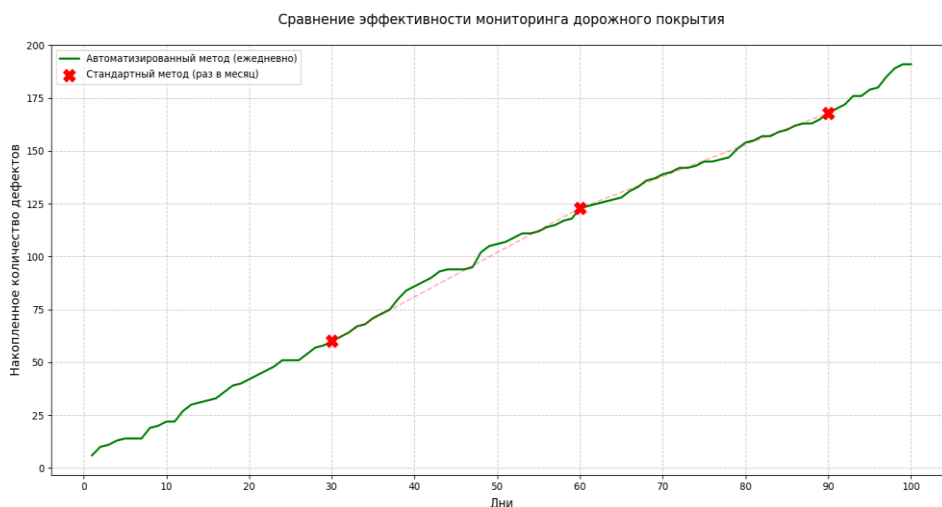


Рис. 7. Анализ эффективности метода и традиционных ежемесячных инспекций

Исследование основывается на симуляции динамики накопления дефектов на дорожном покрытии в течение 100 дней. Количество новых дефектов, возникающих ежедневно, описывается распределением Пуассона [29] с параметром $\lambda = 2$, что отражает вероятность возникновения повреждений в условиях эксплуатации дорожного покрытия.

График включает два ключевых элемента:

- линейный тренд (зеленая кривая): отражает непрерывный мониторинг автоматизированной подсистемы, которая регистрирует и аккумулирует дефекты дорожного покрытия ежедневно. Кривая демонстрирует динамику накопления повреждений без временных промежутков, что обеспечивает полную прозрачность состояния дорожного покрытия в реальном времени;
- инспекционные точки (красные метки): соответствуют результатам стандартных инспекций, проводимых раз в 30 дней (дни 30, 60, 90). Пунктирные линии связывают точки, подчеркивая временные интервалы между проверками, в течение которых дефекты накапливаются без контроля.

Сравнение показывает значимые различия в эффективности:

- точность обнаружения: автоматизированный метод фиксирует все изменения в момент их возникновения, тогда как стандартный подход определяет состояние дорожного покрытия только в момент инспекции;
- аккумуляция дефектов: в промежутках между инспекциями (например, между периодами 0–30, 30–60 и т. д.) стандартные методы не учитывают накопления дефектов, что создает временные слепые зоны. Это видно по резкому росту значений на зеленой кривой между красными точками;
- временная задержка: разница между значениями на автоматизированной кривой и ближайшей инспекционной точкой (например, между днями 29–30) иллюстрирует задержку в обнаружении дефектов стандартными методами.

Заключение

Таким образом, метод мониторинга состояния дорожного покрытия обеспечивает высокую оперативность принятия решений, что делает его пригодным для ежедневного использования. Метод мониторинга состояния дорожного покрытия

также может быть перспективным источником информации для сравнения состояния дорожного покрытия на разных участках дорожной сети, помогая специалистам дорожным служб расставлять приоритеты по планированию и проведению ремонтных работ.

Оперативность метода обеспечивается за счет возможности ежедневного сбора данных без привлечения дополнительных ресурсов – информация собирается с автобусов ежедневно. Также реализован автоматизированный процесс классификации, позволяющий минимизировать влияние человеческого фактора.

Метод мониторинга состояния дорожного покрытия может быть внедрен в систему умного города, интегрирован с ГИС, а также использоваться в качестве основы для формирования приоритетов при планировании ремонтных работ. Метод обеспечивает высокую оперативность, что делает его перспективным для широкого применения в условиях ограниченных бюджетов и необходимости постоянного контроля качества дорожного покрытия. Дальнейшее развитие метода предполагает возможность улучшения визуального представления результатов в ГИС, а также интеграции алгоритмов машинного обучения для прогнозирования ухудшения состояния дорожного покрытия.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Ершов М.М.* Авторский надзор – элемент системы контроля качества строительства автомобильных дорог // Актуальные вопросы проектирования автомобильных дорог: сб. науч. тр. ОАО «ГИПРОДОРНИИ». 2010. № 1. С. 268–277.
2. *Буртыль Ю.В.* Обоснование проведения ремонтов автомобильных дорог на основании динамики изменения их эксплуатационного состояния: дис. ... канд. техн. наук. 2013.
3. *Vavrik S.P.S.P.W.* PCR Evaluation-Considering Transition from Manual to Semi-Automated Pavement Distress Collection and Analysis. Columbus, OH, USA: State of Ohio Department of Transportation, 2013.
4. *Radopoulou S.-C., Brilakis I.* Improving Road Asset Condition Monitoring // Transportation Research Procedia. 2016. Vol. 14. Pp. 3004–3012.
5. Дороги автомобильные общего пользования. Капитальный ремонт, ремонт и содержание. Технические правила: ГОСТ Р 59201-2021. Введ. 2022-01-01. М.: Стандартинформ, 2021. 31 с.
6. Дороги автомобильные и улицы. Требования к эксплуатационному состоянию, допустимому по условиям обеспечения безопасности дорожного движения. Методы контроля: ГОСТ Р 50597-2017. Введ. 2018-07-01. М.: Стандартинформ, 2017. 19 с.
7. Дороги автомобильные общего пользования. Требования к проведению диагностики и паспортизации: ГОСТ 33388-2015. Введ. 2016-07-01. М.: Стандартинформ, 2015. 12 с.
8. *Мухаметзянов И.З.* Нечеткий логический вывод и нечеткий метод анализа иерархий в системах поддержки принятия решений: приложение к оценке надежности технических систем // Кибернетика и программирование. 2017. № 2. С. 59–77.
9. *Chen K. et al.* CRSM: a practical crowdsourcing-based road surface monitoring system // Wireless Networks. 2016. Vol. 22. Pp. 765–779. DOI: 10.1007/s11276-015-0996-y. EDN: LOOZXQ.
10. *Yi C.W., Chuang Y.T., Nian C.S.* Toward crowdsourcing-based road pavement monitoring by mobile sensing technologies // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2015. Vol. 16. No. 4. Pp. 1905–1917.
11. *Kasun Z., Chamath K., Gihan S., Shihan W.* A public transport system based sensor network for road surface condition monitoring // Proceedings of the 2007 workshop on networked systems for developing regions. 2007.
12. *Хасанов Р.И., Аралбаев Т.З.* Определение категории дорожного полотна на основе ассоциативной модели распознавания образов // Информационные системы и технологии. 2011. № 3. С. 102–107.
13. *Mitsubishi T.* Definition of centroid method as defuzzification // Formalized Mathematics. 2022. Vol. 30. No. 2. Pp. 125–134. DOI: 10.2478/forma-2022-0010. EDN: FYIJEU.

14. *Баданис К.Е., Шамраев А.А.* Программа для анализа и классификации состояния дорожного покрытия на основе сигналов акселерометра: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025660467 Рос. Федерация. № 2025618750; заявл. 15.04.2025; опубл. 23.04.2025.
15. *Баданис К.Е., Фирсов Н.Ю., Шамраев А.А.* Имитационная модель состояния дорожного покрытия на основе сигналов акселерометра и местоположения транспортного средства: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025664460 Рос. Федерация. № 2025662201; заявл. 19.05.2025; опубл. 04.06.2025.
16. *Баданис К.Е.* Автоматизированный мониторинг дорожного покрытия с учетом коррекции тропосферных задержек спутниковых навигационных сигналов // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. 2025. Т. 33. № 1. С. 7–20. DOI:10.14498/tech.2025.1.1. EDN: ZCLHMQ.
17. *Сурин В.И., Волкова З.С.* Алгоритм аппроксимации экспериментальных данных на основе низкочастотного фильтра с конечной импульсной характеристикой // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2020. № 4. С. 25–29.
18. *Smith S.W.* The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing. California: California Technical Pub., 2002. 650 p.
19. *Мельник В.Г.* Оценка коэффициента экспоненциального сглаживания навигационных данных по результатам измерений // Эксплуатация морского транспорта. 2014. № 1. С. 29–32.
20. *Gelper S., Fried R., Croux C.* Robust forecasting with exponential and Holt–Winters smoothing // Journal of forecasting. 2010. Vol. 29. No. 3. Pp. 285–300.
21. Дороги автомобильные общего пользования. Оценка состояния дорожного покрытия: ГОСТ 33388-2015. Введ. 2016-07-01. М.: Стандартинформ, 2015. 12 с.
22. Автомобильные дороги. Актуализированная редакция СНиП 2.05.02-85: СП 34.13330.2012. Введ. 2013-01-01. М., 2012.
23. Об утверждении государственной программы...: постановление Правительства Белгородской обл. от 20 марта 2019 г. № 123-пп.
24. Об организации работы...: приказ Департамента городского хозяйства г. Белгорода от 15 февр. 2020 г. № 45-од.
25. Приказ департамента городского хозяйства г. Белгорода №45-од от 15.02.2020 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.belgorod-city.ru>
26. Актуальное расписание общественного транспорта [Электронный ресурс]. URL: <https://etk31.ru/press/relevant/2295/> (дата обращения: 01.07.2024).
27. *Баданис К.Е., Шамраев А.А.* Визуализация результатов анализа и классификации состояния дорожного покрытия на основе сигналов акселерометра: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025664150 Рос. Федерация. № 2025662311; заявл. 19.05.2025; опубл. 03.06.2025.
28. *Yu B., Yu X.* Vibration-based system for pavement condition evaluation // Proceedings of international conference on applications of advanced technology in transportation. 2006.
29. *Мороз Л.С.* Применение распределения Пуассона // Актуальные проблемы международных отношений в условиях формирования мультиполярного мира. 2020. С. 143–145.

Статья поступила в редакцию 12.09.2025

SUBSTANTIATION OF THE EFFICIENCY OF AN AUTOMATED METHOD FOR MONITORING THE ROAD SURFACE BASED ON ACCELEROMETER SIGNALS AND FUZZY LOGIC APPARATUS

K.E. Badanis¹

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

E-mail: badanis@bsuedu.ru

Abstract. *The article considers the issue of increasing the efficiency of the method for monitoring the condition of the road surface of the urban agglomeration. An integrated approach based on the use of a prototype, including an accelerometer and a GPS device installed on public transport, is considered. The purpose of the study is to substantiate the efficiency criterion of the integrated method for monitoring the condition of the road surface based on accelerometer signals and a fuzzy logic device that provides daily analysis of the dynamics of changes in the condition of the road surface and increases the efficiency of decision-making on its repair in Belgorod. The proposed method allows daily analysis of the dynamics of changes in the road surface and timely decision-making related to repair activities. To classify the condition of the roads, a fuzzy logic device is used, which provides an objective assessment in five categories from «very bad» to «very good» road surface condition. A comparative analysis with traditional methods (visual inspections, laser scanning) showed the advantages of the new method: higher frequency of inspections (daily), full route coverage and no need for special road conditions (e.g. lane closures). One of the criteria for the effectiveness of the method is efficiency, which allows calculating the dimensionless efficiency coefficient. The results of the study demonstrate that the proposed method is highly effective and can be integrated into a smart city system, GIS, and repair planning systems. The method is promising for use in conditions of limited budgets and the need to control the quality of the road surface.*

Keywords: *urban roads, transport and operational condition of roads, road surface, condition of road surface, monitoring, monitoring method, GPS sensor, accelerometer, diagnostic methods, crowdsourcing.*

REFERENCES

1. Yershov M.M. Avtorskiy nadzor – element sistemy kontrolya kachestva stroitel'stva avtomobil'nyh dorog [Author's Supervision as an Element of the Road Construction Quality Control System] // Aktual'nye voprosy proektirovaniya avtomobil'nyh dorog: sb. nauch. tr. OAO "GIPRODORNII". 2010. No. 1. Pp. 268–277 (In Russian)
2. Burtul Yu.V. Obosnovanie provedeniya remontov avtomobil'nyh dorog na osnovanii dinamiki izmeneniya ih ekspluatatsionnogo sostoyaniya [Justification of Road Repairs Based on the Dynamics of Their Operational Condition Changes]: dis. ... kand. tekhn. nauk. 2013. (In Russian)
3. Vavrik S.P.S.P.W. PCR Evaluation-Considering Transition from Manual to Semi-Automated Pavement Distress Collection and Analysis. Columbus, OH, USA: State of Ohio Department of Transportation, 2013.



4. Radopoulou S.-C., Brilakis I. Improving Road Asset Condition Monitoring // Transportation Research Procedia. 2016. Vol. 14. Pp. 3004–3012.
5. Dorogi avtomobil'nye obshchego polzovaniya. Kapitalnyj remont, remont i sodержanie. Tekhnicheskie pravila: GOST R 59201-2021 [Public Use Roads. Major Repair, Maintenance and Upkeep. Technical Regulations: GOST R 59201-2021]. Vved. 2022-01-01. M.: Standartinform, 2021. 31 p. (In Russian)
6. Dorogi avtomobilnye i ulicy. Trebovaniya k ekspluatatsionnomu sostoyaniyu, dopustimomu po usloviyam obespecheniya bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya. Metody kontrolya: GOST R 50597-2017 [Roads and Streets. Requirements for Operational Condition Permissible for Ensuring Traffic Safety. Control Methods: GOST R 50597-2017]. Vved. 2018-07-01. M.: Standartinform, 2017. 19 p. (In Russian)
7. Dorogi avtomobilnye obshchego polzovaniya. Trebovaniya k provedeniyu diagnostiki i pasportizatsii: GOST 33388-2015 [Public Use Roads. Requirements for Diagnostics and Certification: GOST 33388-2015]. Vved. 2016-07-01. M.: Standartinform, 2015. 12 p. (In Russian)
8. Mukhametzyanov I.Z. Nechetkij logicheskij vyvod i nechetkij metod analiza ierarhij v sistemah podderzhki prinyatiya reshenij: prilozhenie k ocenke nadezhnosti tekhnicheskikh system [Fuzzy Logic Inference and Fuzzy Analytic Hierarchy Process in Decision Support Systems: Application to Technical System Reliability Assessment] // Kibernetika i programmirovaniye. 2017. No. 2. Pp. 59–77. (In Russian)
9. Chen K. et al. CRSM: a practical crowdsourcing-based road surface monitoring system // Wireless Networks. 2016. Vol. 22. Pp. 765–779. DOI: 10.1007/s11276-015-0996-y.
10. Yi C.W., Chuang Y.T., Nian C.S. Toward crowdsourcing-based road pavement monitoring by mobile sensing technologies // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2015. Vol. 16. No. 4. Pp. 1905–1917.
11. Kasun Z., Chamath K., Gihan S., Shiha W. A public transport system based sensor network for road surface condition monitoring // Proceedings of the 2007 workshop on networked systems for developing regions. 2007.
12. Khasanov R.I., Aralbaev T.Z. Opredelenie kategorii dorozhnogo polotna na osnove asociativnoy modeli raspoznavaniya obrazov [Determining Road Surface Category Based on an Associative Pattern Recognition Model] // Informatsionnye sistemy i tekhnologii. 2011. No. 3. Pp. 102–107. (In Russian)
13. Mitsuishi T. Definition of centroid method as defuzzification // Formalized Mathematics. 2022. Vol. 30. No. 2. Pp. 125–134. DOI: 10.2478/forma-2022-0010.
14. Badanis K.E., Shamraev A.A. Programma dlya analiza i klassifikatsii sostoyaniya dorozhnogo pokrytiya na osnove signalov akselerometra: Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM № 2025660467 Ros. Federatsiya. № 2025618750; zayavl. 15.04.2025; opubl. 23.04.2025 [Program for Analysis and Classification of Road Surface Condition Based on Accelerometer Signals: Certificate of State Registration of Computer Program No. 2025660467 Russian Federation. No. 2025618750; applied 15.04.2025; published 23.04.2025]. (In Russian)
15. Badanis K.E., Firsov N.Yu., Shamraev A.A. Imitatsionnaya model' sostoyaniya dorozhnogo pokrytiya na osnove signalov akselerometra i mestopolozheniya transportnogo sredstva: Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM № 2025664460 Ros. Federatsiya. № 2025662201; zayavl. 19.05.2025; opubl. 04.06.2025 [Simulation Model of Road Surface Condition Based on Accelerometer and Vehicle Position Signals: Certificate of State Registration of Computer Program No. 2025664460 Russian Federation. No. 2025662201; applied 19.05.2025; published 04.06.2025]. (In Russian)
16. Badanis K.E. Avtomatizirovannyj monitoring dorozhnogo pokrytiya s ucheto korrektsii troposfernykh zaderzhek sputnikovyykh navigatsionnykh signalov [Automated Road Pavement Monitoring with Correction of Tropospheric Delays of Satellite Navigation Signals] // Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Ser. Tekhnicheskie nauki. 2025. Vol. 33. No. 1. Pp. 7–20. DOI:10.14498/tech.2025.1.1. EDN: ZCLHMQ. (In Russian)
17. Surin V.I., Volkova Z.S. Algoritm approksimatsii eksperimentalnykh dannykh na osnove nizkочастотного фильтра с конечной импульсной характеристикой [Algorithm for Approximating Experimental Data Based on a Low-Frequency Finite Impulse Response Filter] // Informatsionnye tekhnologii v proektirovanii i proizvodstve. 2020. No. 4. Pp. 25–29. (In Russian)
18. Smith S.W. The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing. California: California Technical Pub., 2002. 650 p.
19. Melnik V.G. Ocenka koeffitsienta eksponentsial'nogo sglazhivaniya navigatsionnykh dannykh po rezul'tatam izmerenij [Estimating the Exponential Smoothing Coefficient for Navigation Data

- Based on Measurement Results] // *Ekspluatatsiya morskogo transporta*. 2014. No. 1. Pp. 29–32. (In Russian)
20. *Gelper S., Fried R., Croux C.* Robust forecasting with exponential and Holt–Winters smoothing // *Journal of forecasting*. 2010. Vol. 29. No. 3. Pp. 285–300.
 21. Dorogi avtomobilnye obshchego polzovaniya. Ocenka sostoyaniya dorozhnogo pokrytiya: GOST 33388-2015. Vved. 2016-07-01 [Public Use Roads. Pavement Condition Assessment: GOST 33388-2015. Introduced 2016-07-01]. M.: Standartinform, 2015. 12 p. (In Russian)
 22. Avtomobilnye dorogi. Aktualizirovannaya redakciya SNiP 2.05.02-85: SP 34.13330.2012. Vved. 2013-01-01 [Highways. Updated Edition of SNiP 2.05.02-85: SP 34.13330.2012. Introduced 2013-01-01]. M., 2012. (In Russian)
 23. Ob utverzhdenii gosudarstvennoj programmy...: postanovlenie Pravitelstva Belgorodskoj obl. ot 20 marta 2019 g. [On the Approval of the State Program....: Decree of the Government of the Belgorod Region]. No. 123-pp. (In Russian)
 24. Ob organizacii raboty...: prikaz Departamenta gorodskogo hozyajstva g. Belgoroda ot 15 fevr. 2020 g. [On the Organization of Work...: Order of the Department of Urban Economy of Belgorod dated February 15]. No. 45-od. (In Russian)
 25. Prikaz departamenta gorodskogo hozyajstva g. Belgoroda No. 45-od ot 15.02.2020 [Order of the Department of Urban Economy of Belgorod No. 45-od dated 15.02.2020]. URL: <https://www.belgorod-city.ru> (In Russian)
 26. Aktualnoe raspisanie obshchestvennogo transporta [Current Public Transport Schedule]. URL: <https://etk31.ru/press/relevant/2295/> (Accessed: 01.07.2024). (In Russian)
 27. *Badanis K.E., Shamraev A.A.* Vizualizaciya rezultatov analiza i klassifikacii sostoyaniya dorozhnogo pokrytiya na osnove signalov akselerometra: Svidetelstvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlya EVM No. 2025664150 Ros. Federaciya. No. 2025662311; zayavl. 19.05.2025; opubl. 03.06.2025 [Visualization of the Results of Analysis and Classification of Road Surface Condition Based on Accelerometer Signals: Certificate of State Registration of Computer Program No. 2025664150 Russian Federation. No. 2025662311; applied 19.05.2025; published 03.06.2025]. (In Russian)
 28. *Yu B., Yu X.* Vibration-based system for pavement condition evaluation // *Proceedings of international conference on applications of advanced technology in transportation*. 2006.
 29. *Moroz L.S.* Primenenie raspredeleniya Puassona [Application of the Poisson Distribution] // *Aktualnye problemy mezhdunarodnyh otnoshenij v usloviyah formirovaniya mul'tipolyarnogo mira*. 2020. Pp. 143–145. (In Russian)

Original article submitted 12.09.2025

УДК 004.89: 004.4: 004.421: 519.685: 681.5

**РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ РОБАСТНОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ
НЕОПРЕДЕЛЕННОГО ОБЪЕКТА
В ДЕКЛАРАТИВНОЙ ПОСТАНОВКЕ****М.Ф. Степанов, А.М. Степанов, О.М. Степанова¹**Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.
Россия, 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77

E-mail: mfstepanov@mail.ru, stepanovam@sstu.ru, stepanovaom@sstu.ru

Аннотация. В задачах синтеза систем автоматического управления (САУ) объектами с параметрической неопределенностью одной из проблем является необходимость учета возможных отклонений неопределенных параметров от их номинальных значений. Проблема выбора метода решения задачи синтеза закона управления осложняется не только их многообразием, но и недостаточной осведомленностью инженера-проектировщика в теории управления. Использование средств автоматического решения непроектно поставленных задач, т. е. без указания метода их решения, не применяется не только из-за необходимости создания и использования модели знаний проблемной области задач теории автоматического управления, но и из-за проблем планирования действий по их решению итерационными методами, т. к. проблема автоматического синтеза циклических программ не имеет универсального подхода к планированию действий для решения декларативно поставленных задач. Для конкретного класса задач может быть построена определенная структура плана действий по решению задач этого класса. Нарастающая потребность в построении новых САУ для новых объектов управления требует решения указанной проблемы. Одним из направлений построения систем управления объектами с неопределенными параметрами являются методы построения грубых (слабо чувствительных к изменениям параметров объекта) или, иначе, робастных систем управления. Методы синтеза робастного управления предусматривают итерационные процессы выполнения ряда подзадач. Статья посвящена исследованию путей решения декларативно поставленных задач робастного управления. Предложена схема представления циклических планов действий, реализующих итерационные методы синтеза законов управления. Рассмотрен пример решения декларативно поставленной задачи робастной стабилизации двухмассовой системы.



© Автор(ы), 2025

¹ Михаил Федорович Степанов, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры системотехники и управления в технических системах.

Андрей Михайлович Степанов, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры системотехники и управления в технических системах.

Ольга Михайловна Степанова, аспирант кафедры системотехники и управления в технических системах.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-21-00488, <https://rscf.ru/project/24-21-00488/>

***Ключевые слова:** представление знаний, планирование действий, декларативно поставленные задачи, синтез итерационных планов решения задач, интеллектуальный решатель, планирующие искусственные нейронные сети.*

Введение

В системах автоматизации проектирования (САПР) все чаще возникает потребность в решении декларативно (непроцедурно, без указания метода решения) поставленных задач. Для области проектирования систем автоматического управления (САУ) характерно наличие неполноты, неопределенности сведений как о внешних возмущениях, так и об объекте управления. Методы теории автоматического управления (ТАУ) проектирования систем автоматического управления в условиях неопределенности являются итерационными, реализующими последовательное приближение к искомому решению [1–3].

В задачах синтеза систем управления объектами с параметрической неопределенностью одной из проблем является необходимость учета возможных отклонений неопределенных параметров от их номинальных значений. Отличительной особенностью неопределенных динамических систем с неопределенными параметрами является стационарность их неизвестных параметров. Таким образом, параметры системы являются неизвестными, однако постоянными, т. е. не изменяются во времени. Однако не существует общего, единого подхода (метода) решения задач управления в условиях неопределенности. Проблема выбора метода решения задачи синтеза закона управления осложняется не только их многообразием, но и недостаточной осведомленностью инженера-проектировщика в бурно развивающейся теории автоматического управления. Использование средств автоматического решения непроцедурно поставленных задач, т. е. без указания метода их решения, не допускается практически ни в одной из современных САПР САУ. Это обусловлено необходимостью создания модели знаний проблемной области задач ТАУ, на которой ставятся и решаются задачи. Также это инициируется принципиальными проблемами планирования действий по их решению. Важнейшей из них является то, что большинство методов ТАУ синтеза и анализа САУ являются итерационными. К сожалению, проблема автоматического синтеза циклических программ не имеет массового (общего) решения в связи с бесконечным разнообразием возможных алгоритмических схем реализации итерационного процесса, реализуемого порождаемой программой [4]. Таким образом, универсального подхода к планированию действий для решения декларативно поставленных задач не существует [5–9]. Для определенного достаточно узкого класса задач может быть определена некая обобщенная структура плана действий по решению задач этого конкретного класса, например с использованием крупноблочного, структурного, концептуального [5–9] подходов. В частности, возможно построение циклических планов решения некоторого класса задач итерационными методами, допускающими представление тела цикла в виде монолитного блока [4]. Нарастающая потребность в построении новых САУ для новых слабо изученных объектов управления в условиях ужесточения требований к затратам как времени, так и ресурсов на разработку и освоение производства требует решения указанной проблемы. Поэтому все более востребованными становятся методы решения задач синтеза и анализа САУ в условиях неопределенности, слабо чувствительных к изменениям параметров объекта, робастных законов стабилизации и управления. Настоящая статья посвящена изложению подхода к автоматизации решения задач синтеза и анализа САУ методами построения робастных законов стабилизации.

Методы синтеза робастного управления предусматривают итерационные процессы выполнения ряда подзадач, которые должны составить основной цикл порождаемой циклической программы. При этом необходим способ выделения среди действий, необходимых для решения исходной декларативно поставленной задачи, действий, выполняемых итерационно в цикле, в отличие от остальных действий, выполняемых лишь однократно. Известные методы представления знаний и планирования действий по решению задач [5–13], как прямой [10], так и обратный методы [12], позволяют выстраивать лишь линейные и древовидные (ветвящиеся) планы действий, включая их представление в виде треугольной таблицы [10]. С другой стороны, двухфазный подход к планированию действий [14] предусматривает разделение процесса поиска решения задачи на *первый* (предварительный, хотя и самый сложный и трудоемкий) этап отбора релевантных задаче действий, которые, скорее всего, и должны быть использованы в плане действий (программе) решения задачи, и *второй* (заключительный), на котором осуществляется уже собственно выполнение отобранных действий в порядке, определяемом наличием соответствующих исходных данных для них, завершая, таким образом, процесс построения плана действий решения задачи. При этом первый этап реализует обратный метод [12] поиска – от искомым результатов к необходимым исходным данным, а на втором этапе используется прямой метод поиска, определяющий готовые к выполнению операции (действия) системы автоматизации решения задач. На роль признака, отделяющего действия, выполняемые однократно, от действий, выполняемых многократно, наиболее подходящей кандидатурой является отношение, описывающее требования к искомому результату решения задачи. Поэтому действия модели знаний проблемной области, которые непосредственно и/или опосредованно влияют на значение такого отношения, можно было бы априорно в модели знаний пометить указанным отношением, например в требованиях к искомому результату действия. Это позволит действия построенного плана действий решения конкретной задачи разместить (локализовать) внутри тела основного цикла порождаемой программы (плана действий) решения поставленной задачи. Однако в разных задачах требования к искомому результату могут быть различными, что зависит от конкретной задачи и не позволяет осуществить такую предварительную разметку модели знаний. Таким образом, разметку действий на однажды выполняемые и циклически выполняемые придется делать непосредственно в процессе построения конкретного плана действий конкретной решаемой задачи. При этом простейший способ разметки заключается во включении всех действий построенного плана в состав циклически выполняемых действий (*«повторное выполнение не ухудшает результат»*). Однако это приведет к необоснованным многократным затратам на выполнение действий, которые на пути достижения искомого результата достаточно выполнить только один раз. Если количество итераций окажется весьма большим, например сотни или даже тысячи, то эффективность такого «простого/легкого» способа организации циклических программ окажется недопустимо низкой. Как следствие, необходим подход к корректировке (разметке) модели знаний, включающий как статическую разметку аксиом (описаний действий), подходящую для всех задач, так и динамическую разметку действий для конкретной задачи, т. е. включенных в план решения задачи. Статическую разметку необходимо осуществлять на основе знаний об итерационных методах решения задач, включаемых в модель знаний. Указанная деятельность должна осуществляться непосредственно при пополнении модели знаний новыми знаниями проблемной области, осуществляемом учеными-

исследователями, выступающими в роли экспертов в проблемной области. Как следствие, процесс создания модели знаний проблемной области является также итерационным [4–17]. Кроме того, для создания алгоритмической структуры выполнения построенного плана действий конкретной задачи необходима разработка схемы представления синтезируемых программ, допускающей циклическое их выполнение (или их фрагментов) для реализации формализуемого для включения в модель знаний итерационного метода (например, синтеза законов робастной стабилизации объекта с неопределенными параметрами) проблемной области. Настоящая работа посвящена исследованию способов решения декларативно поставленных задач синтеза и анализа САУ на примере задач робастной стабилизации объекта с параметрической неопределенностью [1–3], предусматривающих итеративное выполнение плана действий до возможного достижения заданных требований к искомому результату решения задачи, т. е. порождение и выполнение циклических программ решения задач.

Модель и метод

Планирование действий по решению задач синтеза и анализа систем автоматического управления не может быть выполнено без использования знаний проблемной области [5–12]. В данном случае используется модель знаний [14–15], развиваемая в исследованиях авторов. Для изложения предлагаемого подхода приведем краткое описание ее структуры для введения обозначений используемых понятий [16–17]:

$$M_o = \langle D, \mathfrak{R}, O \rangle, \quad (1)$$

где $D = \{d_i \mid d_i = \langle \mathfrak{I}(d_i), \wp(d_i), \aleph(d_i), \Xi(d_i), \Psi(d_i) \rangle\}$ – множество формализованных обобщений (математических моделей) компонентов систем управления, называемых «предметами», обладающих: *свойствами* $\wp_j \in \wp(d_i) = \{\rho \mid \rho \in \{true \mid false\}\}$;

характеристиками $\chi_j \in \aleph(d_i) = \{\chi_{k_i} \mid \chi_{k_i} \in C^{n_{k_i}} \times C^{n_{k_i}} \times \dots \times C^{n_{k_i}}\}$, где C^n – n -мерное пространство комплексных чисел; *формами* математических моделей $\mu_j \in \mathfrak{I}(d_i) = \{\mu_1, \dots, \mu_{\tau_i}\}$, где

$$\mu_j = \langle n_j, m_j \rangle, \quad m_j = \{m_{jk} \mid m_{jk} \in C^{n_{jk1}} \times C^{n_{jk2}} \times \dots \times C^{n_{jkl}}\},$$

$$n_j = \{n_{j1}, n_{j2}, \dots, n_{jk} \mid n_{jl} \in N\} -$$

множество коэффициентов компонентов (матриц m_{jk} соответствующих размерностей) математической модели μ_j ; классификационными *признаками*, представляющими собой выделенные свойства предметов $\xi_j \in \Xi(d_i) \subseteq \wp(d_i)$; *компонентами* (составными частями предметов), в качестве которых могут выступать другие предметы $d_{ij} \in \Psi(d_i) \subseteq D$;

$$\mathfrak{R} = \{r \mid r = \langle c, s, g \rangle: \wp \cup \aleph \cup \mathfrak{I} \cup \mathfrak{R} \cup O \rightarrow \{true \mid false\}\} -$$

множество *отношений* (предикатов) над предметами, их компонентами и атрибутами, действиями (операциями) над ними;

$$O = \{o \mid o = \langle c, s, g, q \rangle: \wp \cup \aleph \cup \mathfrak{I} \cup \mathfrak{R} \rightarrow \wp \cup \aleph \cup \mathfrak{I} \cup \mathfrak{R}\} -$$

множество *действий* (операций) над предметами и их атрибутами.

Действия $o_i = \langle c_i, s_i, g_i, r_i \rangle \in O$ и отношения $r_i = \langle c_i, s_i, g_i \rangle \in \mathfrak{R}$ характеризуются атрибутами: $c_i \in \wp \cup \mathfrak{R}$ – условия применимости; $s_i \in \wp \cup \aleph \cup \mathfrak{I}$ – исходные

данные; $g_i \in \wp \cup \aleph \cup \mathfrak{T} \cup \mathfrak{R}$ – результат выполнения действия (операции) ; $r_i \in \mathfrak{R}$ – требования к результату выполнения действия.

Задача на модели (1) представляется в виде $t_j = \langle s_j, g_j, r_j \rangle$ или в форме продукции $t_j : s_j \rightarrow g_j \leftarrow r_j$. План решения задачи t_j , порождаемый решающей подсистемой интеллектуального решателя задач, построенной на основе планирующих искусственных нейронных сетей (ПИНС) [14–17], представляется в виде подмножества

$$p(t_j) = \{o_{ji} \mid o_{ji} = \langle c_{ji}, s_{ji}, g_{ji}, r_{ji} \rangle, i = 1, \dots, n_j\}, \quad (2)$$

операций (аксиом) модели знаний, которые должны быть выполнены для получения искомого результата решения задачи, где $p(t_j)$ – план решения задачи t_j ; o_{ji} – i -я операция плана $p(t_j)$; n_j – количество операций, входящих в план $p(t_j)$ решения задачи t_j .

Подход к автоматизации решения непроцедурно поставленных задач управления в условиях неполноты, неопределенности сведений как о внешних возмущениях, так и об объекте управления, изложим на примере методов робастной стабилизации объектов управления с параметрической неопределенностью. Рассмотрим в качестве объектов управления системы вида

$$\dot{x} = \mathbf{A}x + \mathbf{B}u, \quad x \in R^n, \quad u \in R^m, \quad (3)$$

где элементы матриц $\mathbf{A}$ и $\mathbf{B}$ зависят неизвестным образом от неопределенных параметров

$$q \in Q \subseteq R^l. \quad (4)$$

Тогда вместо объекта с неопределенными параметрами (3) следует [1–3] представлять семейство динамических систем

$$\dot{x} = \mathbf{A}(q)x + \mathbf{B}(q)u, \quad x \in R^n, \quad u \in R^m, \quad (5)$$

каждая из которых представляет собой возможную реализацию системы (3), определенную конкретной комбинацией возможных значений неопределенных параметров (4).

Итерационные методы решения задач включают действия (операции), приводящие к «улучшению» значения критерия достижения цели задачи. Таким критерием служит заданная цель управления. Например, в задаче робастной стабилизации объекта управления (3) с неопределенными параметрами (4) целью является обеспечение устойчивости замкнутой регулятором системы управления [1–3] конкретным реализовавшимся экземпляром объекта управления из семейства (5). В соответствии с прямым методом Ляпунова система (3) является устойчивой, если для нее можно построить функцию Ляпунова

$$V(x) = x^T S x, \quad S \succ 0, \quad (6)$$

удовлетворяющую

$$\mathbf{A}^T S + S \mathbf{A} \prec 0, \quad (7)$$

на движениях системы (3). Для обеспечения степени устойчивости матрицы $\mathbf{A}$ не меньше, чем заданное значение σ , вместо (7) следует использовать

$$\mathbf{A}^T S + S \mathbf{A} + 2\sigma S \prec 0. \quad (8)$$

Если для объекта (3) с неопределенностью (4) не удастся построить функцию (6), то необходимо решить задачу робастной квадратичной стабилизации [1–3]: для семейства динамических систем

$$\dot{x} = A(q)x + Bu, x \in R^n, u \in R^m \quad (9)$$

построить общий регулятор вида

$$u = Kx \quad (10)$$

такой, чтобы у замкнутых систем

$$\dot{x} = A_c(q)x, A_c(q) = A(q) + BK, \forall q \in Q \subseteq R^l \quad (11)$$

была бы общая функция Ляпунова (6).

Алгоритм решения задачи робастной стабилизации объекта с параметрической неопределенностью

В соответствии с [1–3] для решения задачи робастной стабилизации объекта с параметрической неопределенностью используется алгоритм, предусматривающий итерационное выполнение для всех систем семейства (5) следующих действий:

1) выбрать из семейства (5) i -ю систему, порожденную параметрами $q_i \in Q$;

2) решить матричное неравенство для заданного значения σ желаемой степени устойчивости замкнутой системы [3]

$$A_i S + S A_i^T + B K S + S K^T B^T < -2\sigma S \quad (12)$$

или матричное неравенство, введя $Y = KS$:

$$A_i S + S A_i^T + Y S + S Y^T < -2\sigma S; \quad (13)$$

3) если решение (12) или (13) не существует, то уменьшить значение σ , и если $\sigma \geq \sigma_0 > 0$, то идти к п. 1, где σ_0 – минимально допустимое значение степени устойчивости замкнутой системы, иначе идти к п. 7;

4) построить регулятор

$$K = YS^{-1}; \quad (14)$$

5) проверить устойчивость замкнутых построенным регулятором (14) систем управления для каждой из систем (5):

$$\dot{x} = A_c(q)x, A_c(q) = A_i + BK, \forall q_i \in Q \subseteq R^l. \quad (15)$$

Если хотя бы одна замкнутая система (15) с регулятором (14) является *неустойчивой*, то увеличить величину σ желаемой степени устойчивости и идти к п. 1, начиная решение задачи построения робастного регулятора (10) для систем семейства (6) сначала;

6) если остались системы семейства (5), для которых не решалась задача синтеза стабилизирующего регулятора, то идти к п. 1; иначе *успешно* завершить работу алгоритма с указанием в качестве результата решения поставленной задачи последний построенный робастный стабилизирующий регулятор (14) для объекта (3) с неопределенностью (4), который обеспечивает единую функцию Ляпунова (11);

7) завершить работу алгоритма *аварийно* в связи с невозможностью построения стабилизирующего регулятора при заданном уровне неопределенности (4) объекта управления.

Для обеспечения возможности автоматического построения планов решения декларативно поставленных задач робастной стабилизации необходимо осуществить корректировку модели знаний проблемной области теории автоматического управления [14, 15].

Подход к коррективке модели знаний проблемной области ТАУ

В статье в развитие крупноблочного подхода, структурного синтеза, концептуального программирования [5–7] предлагается подход к коррективке модели знаний проблемной области ТАУ, базирующийся на следующих допущениях:

– построение предопределенной циклической схемы, реализующей предложенный обобщенный итерационный алгоритм решения задачи;

– введение (дополнение) в структуру предложений (описаний выполняемых операций) генерируемого решателем плана действий (программы) описания дополнительных требований к искомым результатам решения поставленной задачи, представляемых в виде отношений или свойств соответствующего предмета модели знаний (1); значение указанного отношения или свойства должно вычисляться на каждой итерации выполнения плана действий (программы) решения задачи и будет использовано при анализе условия завершения итерационного процесса решения задачи.

Например, в качестве такого отношения (свойства) могут быть приняты:

– отношение r_j^k «запас устойчивости замкнутой системы управления не меньше заданного»:

$$r_j^k = \langle \chi_n, \chi_m \rangle \in R, \chi_n \in \mathbb{N}, \chi_m \in \mathbb{N}, \quad (16)$$

где k – номер итерации; χ_n – n -я характеристика предмета d_i , например σ_0 ; χ_m – m -я характеристика предмета d_j , например $\sigma = \max_i (\operatorname{Re} \lambda_i^k)$, где λ_i^k – собственные значения матрицы замкнутой системы (15), тогда $r_j^k = \langle \geq, \chi_n, \chi_m \rangle$, что означает $\sigma \geq \sigma_0$;

– свойство ρ_{ij}^k «замкнутая система устойчива»:

$$\rho_{ij}^k \in \wp(d_j^k) = \{\rho \mid \rho \in \{true \mid false\}\}. \quad (17)$$

В целом для обеспечения возможности автоматического построения интеллектуальным решателем задач [14] циклически выполняемого плана действий декларативно поставленной задачи синтеза робастного квадратичного стабилизирующего регулятора объектом (3) с неопределенностью (4) предлагается:

1) ввести в структуру описания постановки задачи дополнительные компоненты атрибута «Требования к результату»;

2) ввести в структуру предложений порождаемого плана действий решения поставленной задачи дополнительные компоненты атрибута «Требования к результату», элементами которого как логического выражения могут быть отношения вида (16) и/или свойства вида (17) предметов модели знаний;

3) ввести в модель знаний (1) отношение (свойство), описывающее условия завершения (продолжения) циклического выполнения операций плана действий;

4) ввести в атрибут «Требования к результату» предложений плана решения задачи отношение (свойство), определяющее условия прекращения циклического выполнения плана действий;

5) разработать схему описания плана решения задачи итерационным методом с контролем выполнения требований к искомому результату задачи;

6) дополнить исполнительную подсистему решателя задач алгоритмической структурой реализации циклического выполнения планов решения задач с заданными требованиями к искомому результату.

Реализация предлагаемого подхода осуществляется в рамках проекта модернизации системы автоматического решения задач ИНСТРУМЕНТ-3м-И [18]. Система ИНСТРУМЕНТ-3м-И предназначена для решения декларативно поставленных задач проблемной области автоматического управления на моделях знаний вида (1). Среди пользователей системы ИНСТРУМЕНТ-3м-И выделяются категории пользователей с принципиально различающимися целями деятельности, а следовательно, и ролями: а) ученые-исследователи, осуществляющие построение, корректировку и исследование методов решения задач проблемной области; б) инженеры, занимающихся решением задач проектирования законов управления конкретных систем автоматического управления с использованием известных методов.

В связи с этим в системе ИНСТРУМЕНТ-3м-И реализованы два основных вида пользовательских интерфейсов: «Среда исследователя» (рис. 1) и «Среда инженера» (рис. 2).

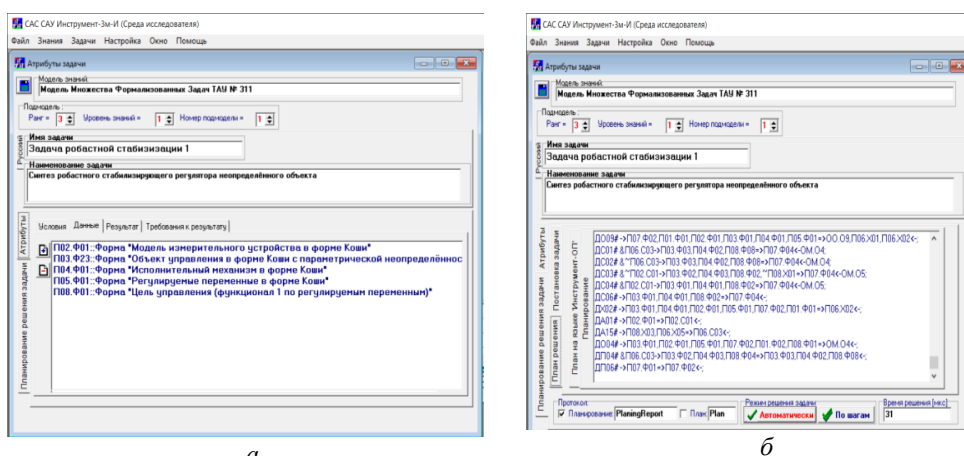


Рис. 1. Примеры представления экранных форм «Среды исследователя»: а – постановка тестовой задачи исследования построенной модели знаний; б – протокол тестирования корректности планирования действий решения задачи робастной стабилизации

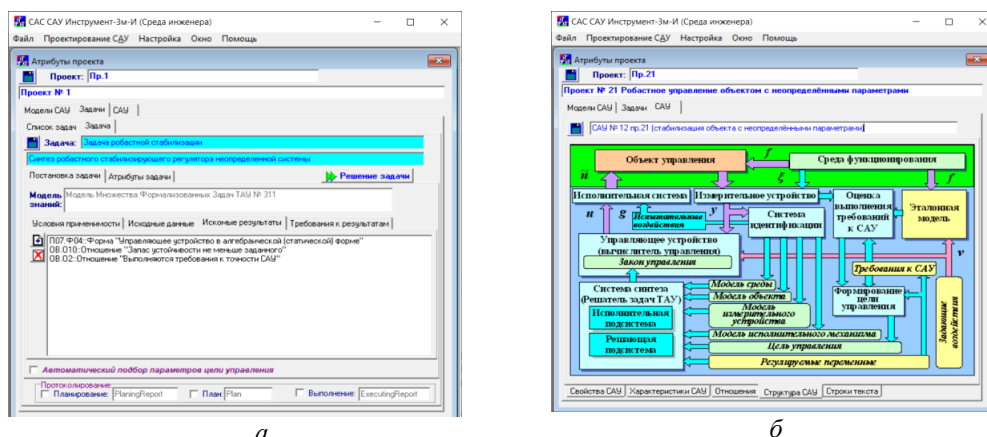


Рис. 2. Примеры представления экранных форм «Среды инженера»: а – пример постановки задачи синтеза робастного стабилизирующего регулятора неопределенной системы; б – пример формирования структуры системы управления

В поле «Планирование» представлен фрагмент списка аксиом модели знаний, описывающих действия, включенные в план решения задачи.

С учетом предложенного подхода к корректировке модели знаний проблемной области обобщенный алгоритм выполнения плана $p(t_j)$ решения задачи t_j итерационным методом можно описать следующим образом:

$$\begin{aligned} \neg Ex(p(t_j)) \rightarrow Go(p(t_j)) = \{ \neg r_{ij}^k \rightarrow \{ \forall i (\neg Ex(o_{ji}) \rightarrow (Calc(r_{ij}^k) \rightarrow \\ (Calc(c(o_{ji})) \rightarrow (\exists s(o_{ji}) \rightarrow ((Go(o_{ji}) \Rightarrow g_{ji}), (Set(Ex(o_{ji}), 1))) \} , \\ \forall i (Set(Ex(o_{ji}), 0))) \} \end{aligned} \quad (18)$$

где $=$ – «по определению»; $\neg$ – символ отрицания; $Ex(x)$ – предикат «объект x выполнен», в качестве x может выступать план действий $p(t_j)$ или отдельная операция $o_{ji}(\cdot)$; $Ex(x)$ принимает значение **1** (истина), если аргумент x выполнен, или **0** (ложь) в противном случае; $Set(x, v)$ – задание (присваивание) значения v для объекта x ; $Go(x)$ – выполнение объекта x (плана $p(t_j)$ или операции $o_{ji}(\cdot)$); $Calc(x)$ – вычисление значения x , т. е. выполнение операции вычисления x .

Формула (18) представляет схему функционирования исполнительной подсистемы решателя задач, осуществляющей итерационное выполнение плана действий $p(t_j)$ решения поставленной задачи t_j итерационным методом.

Для упрощения будущей реализации схема (18) может быть также представлена, например, в виде записи программы по А.А. Ляпунову [19] в форме схемы программы

$$p(t_j) := \downarrow^0 A_1 \uparrow^4 \downarrow^1 A_2 A_3 \uparrow^2 A_4 A_5 \uparrow^3 A_6 \uparrow^0 \downarrow^3 A_7 \uparrow^1 \downarrow^2 A_8 \uparrow^0 \downarrow^4 \quad (19)$$

и спецификации: A_1 – условие t_j завершения выполнения итеративного метода решения задачи выполнено (цель достигнута: регулятор построен, функция Ляпунова найдена); A_2 – выбор i -й динамической системы семейства (5); A_3 – матричное неравенство (13) не решено; A_4 – построить регулятор (14); A_5 – замкнутая система (15) устойчива; A_6 – увеличить желаемую степень устойчивости σ ; A_7 – остались неисследованные системы семейства (5); A_8 – уменьшить желаемую степень устойчивости σ , пока еще выполнено условие $\sigma \geq \sigma_0$.

$\uparrow^i$ – «передающая стрелка i » – выполнение передачи управления (переход) к оператору, отмеченному меткой «приемная стрелка i »;

$\downarrow^i$ – «приемная стрелка i » – метка оператора программы, начиная с которого продолжается ее выполнение после перехода по метке « i ».

Иллюстративный пример

Рассмотрим в качестве объекта управления двухмассовую систему [20] из двух твердых тел с массами m_1 и m_2 , соединенных пружиной с коэффициентом упругости k , скользящих без трения вдоль неподвижного горизонтального стержня (рис. 3). К левому телу приложено управление, призванное стабилизировать колебательную систему.

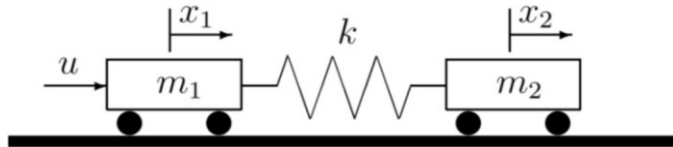


Рис. 3. Двухмассовая система [20]

Введем обозначения: x_1 и v_1 – координата и скорость левого тела; x_2 и v_2 – координата и скорость правого тела; $x = [x_1, x_2, v_1, v_2]^T$ – вектор фазового состояния динамической системы. Непрерывная модель колебаний двухмассовой системы [20] из двух твердых тел (см. рис. 3) описывается уравнениями [20]

$$\dot{x}_1 = v_1, \dot{x}_2 = v_2, \dot{v}_1 = (-k/m_1)x_1 + (k/m_1)x_2 + (1/m_1)u \quad (20)$$

или в матричном виде

$$\dot{x} = Ax + Bu, \quad (21)$$

где пара матриц A, B полностью управляема, номинальные значения параметров модели (20) $k = 1, m_1 = 1, m_2 = 1$, начальные условия

$$x(0) = [-1, 1, 1, -1]^T, \quad (22)$$

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -k/m_1 & k/m_1 & 0 & 0 \\ k/m_2 & -k/m_2 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1/m_1 \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (23)$$

В системе (21) – (24) неопределенными приняты величины k, m_1, m_2 . Их неопределенные значения q_1, q_2, q_3 представляют интервальные числа с номинальными значениями k, m_1, m_2 . Предельное отклонение неопределенных величин от их номинальных значений в рамках решаемой иллюстративной задачи составляет $\pm 40\%$:

$$q_1 = [\underline{k}, \bar{k}], \quad q_2 = [\underline{m_1}, \bar{m_1}], \quad q_3 = [\underline{m_2}, \bar{m_2}], \quad (24)$$

где $\underline{z}$ и $\bar{z}$ – обозначают нижнюю и верхнюю границы значений z соответственно, тогда $\underline{k} = 0,4 \times k = 0,4$, $\bar{k} = 1,4 \times k = 1,4$, $\underline{m_1} = 0,4 \times m_1 = 0,4$, $\bar{m_1} = 1,4 \times m_1 = 1,4$, $\underline{m_2} = 0,4 \times m_2 = 0,4$, $\bar{m_2} = 1,4 \times m_2 = 1,4$.

Комбинации значений неопределенных параметров, определяющих множество динамических систем в семействе (всего 8):

$$\begin{aligned} &1) \{\underline{q_1}, \underline{q_2}, \underline{q_3}\}, 2) \{\underline{q_1}, \underline{q_2}, \bar{q_3}\}, 3) \{\underline{q_1}, \bar{q_2}, \underline{q_3}\}, 4) \{\underline{q_1}, \bar{q_2}, \bar{q_3}\}, \\ &4) \{\bar{q_1}, \underline{q_2}, \underline{q_3}\}, 5) \{\bar{q_1}, \underline{q_2}, \bar{q_3}\}, 7) \{\bar{q_1}, \bar{q_2}, \underline{q_3}\}, 8) \{\bar{q_1}, \bar{q_2}, \bar{q_3}\}. \end{aligned} \quad (25)$$

С учетом введенного обозначения (23) примет вид

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -q_1/q_2 & q_1/q_2 & 0 & 0 \\ q_1/q_3 & -q_1/q_3 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1/q_2 \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (26)$$

Требования к синтезируемому стабилизирующему регулятору: единый регулятор вида (10) для систем семейства (20)–(26); допустимые ограничения на значения переменных динамической системы и допустимое ограничение на величину стабилизирующего управляющего воздействия; максимальное количество итераций изменения критерия оптимальности принято равным 5; итерации останавливаются по достижении нарушения ограничения на величину управляющего воздействия:

$$|x_i| < x_i^* = 0, 1, i = 1, \dots, n, t > 10, u = |Kx| \leq u^* = 40. \quad (27)$$

Решение матричных неравенств (7), (8), (12), (13) полуопределенного программирования (SDP-задачи) [3, 20] требует применения итерационных методов. Вместо SDP-задачи может также итерационно решаться задача линейной квадратичной оптимизации, например с функционалом:

$$J = \int_0^\infty (x^T Q x + u^T R u) dt, \quad Q = \text{diag}(q_{ii}),$$

$$q_{ii} = (1/(x_i^*)^2)^k, \quad i = 1, \dots, n, \quad R = [1],$$

где k – номер итерации выполнения цикла.

На рис. 4 представлены графики переходных процессов семейства динамических систем (20)–(25), замкнутых робастным стабилизирующим регулятором (10).

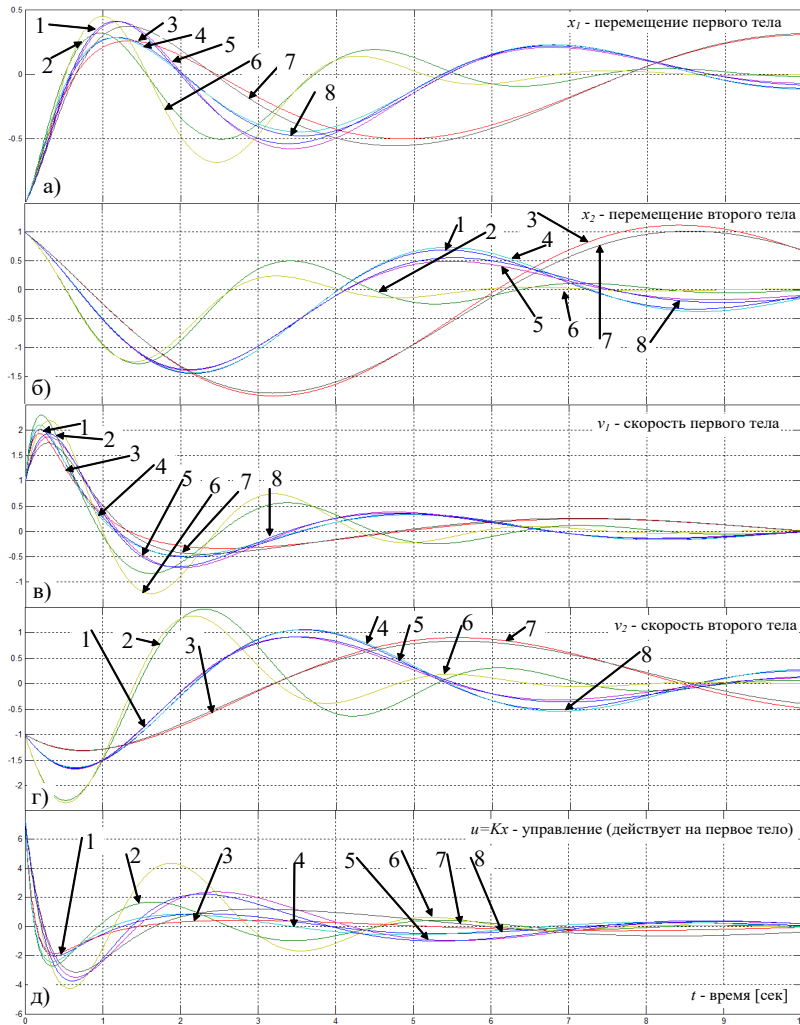


Рис. 4. Графики переходных процессов по переменным состояния а–г и управлению д в системе (21), (24–26), возбужденных начальными условиями (22) по результатам первой итерации цикла итеративного процесса решения задачи

Номера графиков соответствуют комбинациям значений неопределенных параметров q_1, q_2, q_3 (25). При последующих итерациях цикла группы графиков (1, 4, 5, 8), (2, 6), (3, 7) практически сливались, становясь почти неразличимыми. Различия между группами графиков сохранились.

В результате решения задачи синтеза стабилизирующего регулятора получены значения коэффициентов закона управления (матрица $\mathbf{K}$) (10) и значения параметров (матрица $\mathbf{S}$) функции Ляпунова (6):

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} -25,280 \\ 9,149 \\ -13,068 \\ -9,020 \end{bmatrix}, \mathbf{S} = \begin{bmatrix} 319,207 & -132,788 & 35,392 & 130,69 \\ -132,788 & 261,461 & -12,808 & -9,316 \\ 35,392 & -12,808 & 18,295 & 12,628 \\ 130,69 & -9,316 & 12,628 & 160,052 \end{bmatrix}.$$

При этом для замкнутой построенным регулятором системы управления неопределенным объектом достигнута степень устойчивости $\sigma = 0,11975$ семейства динамических систем неопределенной системы (21), (24)–(26). Также удовлетворены требования (27) к динамическим характеристикам замкнутой системы управления регулятором по результатам третьей итерации цикла.

Выводы

Предложен подход к расширению возможностей интеллектуального решателя задач способностью построения (синтеза) циклических планов решения задач управления объектами с неопределенностью итерационными методами теории автоматического управления. Построена схема циклического выполнения плана действий, формируемого интеллектуальным решателем для решения декларативно поставленной задачи робастного управления. Построенная схема представлена в виде записи программы по А.А. Ляпунову, которая упрощает последующую реализацию схемы в исполнительной подсистеме решателя задач. Предложенная схема (19) применена при решении итерационным методом иллюстративной задачи построения робастного квадратичного стабилизирующего регулятора для системы (21), (24), (25) с неопределенными параметрами. Дальнейшие исследования направлены на изучение возможностей автоматизации построения планов решения декларативно поставленных задач управления объектами с другими схемами алгоритмических структур циклически выполняемых планов решения задач с различными видами неопределенности, продолжая развитие направления построения систем автоматического решения задач в декларативной постановке с использованием в качестве решающей (планирующей) подсистемы интеллектуального решателя задач планирующих искусственных нейронных сетей, важнейшим достоинством которых является способность одновременно (параллельно) решать как основную задачу, так и все ее подзадачи [14–17].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Красовский А.А. Справочник по теории автоматического управления. М.: Наука, 1987. 712 с.
2. Пупков К.А., Егунов Н.Д. Методы классической и современной теории автоматического управления: учебник: в 5 т. 2-е изд., перераб. и доп. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. Т. 1. 656 с.
3. Поляк Б.Т., Щербаков П.С. Робастная устойчивость и управление. М.: Наука, 2002. 303 с.
4. Новиков Ф.А. Системы представления знаний. СПб: ИТМО, 2007. 119 с.

5. *Ненейвода Н.Н.* Соотношение между правилами естественного вывода и операторами алгоритмических языков высокого уровня // Доклады Академии наук СССР. 1978. Т. 239, № 3. С. 526–529.
6. *Лавров С.С., Залогова Л.А., Петрушина Т.И.* Принципы планирования решения задач в системе автоматического синтеза программ // Программирование. 1982. № 3. С. 35–43.
7. *Тыгуз Э.Х.* Концептуальное программирование. М.: Наука, 1984. 256 с.
8. *Ramirez-Rueda R., Benitez-Guerrero E., Mezura-Godoy C., Barcenas E.A.* A decade of advancements in program synthesis from natural language: a systematic literature review // Proceedings of the Institute for System Programming of the RAS. 2024. Vol. 36, No. 6. Pp. 59–82. DOI: 10.15514/ispras-2024-36(6)-4. EDN: RLOHJI.
9. *Марков А.А.* Невозможность некоторых алгорифмов в теории ассоциативных систем // Доклады Академии наук СССР. 1947. Т. 55, № 7. С. 587–590.
10. *Ефимов Е.И.* Решатели интеллектуальных задач. М.: Наука, 1982. 192 с.
11. *Генцен Г.* Исследования логических выводов // Математическая теория логического вывода. М.: Наука, 1967. С. 9–76.
12. *Маслов С.Ю.* Теория дедуктивных систем и ее применения. М.: Радио и связь, 1986. 136 с.
13. *Мелехин В.Б., Хачумов М.В.* Полипеременные условно-зависимые предикаты в модели представления знаний автономных мобильных интеллектуальных агентов // Морские интеллектуальные технологии. 2021. № 2–1 (52). С. 184–190. DOI: 10.37220/MIT.2021.52.2.026. EDN: HVEGEX
14. *Степанов М.Ф.* Автоматическое решение задач теории автоматического управления на основе планирующих искусственных нейронных сетей // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2003. № 3–4. С. 27–44.
15. *Степанов М.Ф.* Нейронные сети для планирования решения задач теории автоматического управления // Проблемы управления. 2004. № 2. С. 66–71. EDN: HSQSSR.
16. *Stepanov M.F., Stepanov A.M.* Mathematical modelling of intellectual self-organizing automatic control system: action planning research // Procedia Engineering. 2017. Vol. 201. Pp. 617–622. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.09.657. EDN: XNKUQG.
17. *Stepanov M.F., Stepanov A.M., Stepanova T.V., Stepanova O.M.* Features of knowledge representation of automatic control systems design methods // Studies in Systems, Decision and Control. 2023. Vol. 457. Pp. 231–243. DOI: 10.1007/978-3-031-22938-1_16.
18. *Степанов М.Ф.* Анализ и синтез систем автоматического управления в программной среде ИНСТРУМЕНТ-3м-И // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2004. Т. 47, № 6. С. 27–30. EDN: PAQNFF.
19. *Ляпунов А.А.* О логических схемах программ // Проблемы кибернетики. 1958. Вып. 1. С. 46–74.
20. *Поляк Б.Т., Хлебников М.В., Рапопорт Л.Б.* Математическая теория автоматического управления: учеб. пособие. М.: Ленанд, 2019. 500 с.

Статья поступила в редакцию 21.07.2025

SOLVING THE DECLARATIVE SET PROBLEM OF ROBUST STABILIZATION OF AN UNCERTAIN PLANT

M.F. Stepanov, A.M. Stepanov, O.M. Stepanova¹

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov
77, Politehnicheskaya St., Saratov, 410054, Russian Federation

E-mail: mfstepanov@mail.ru, stepanovam@sstu.ru, stepanovaom@sstu.ru

Abstract. *In the tasks of synthesizing automatic control systems (ACS) for objects with parametric uncertainty, one of the problems is the need to take into account possible deviations of the values of uncertain parameters from their nominal values. The problem of choosing a method for solving the problem of synthesizing the control law is complicated not only by their diversity, but also by the lack of awareness of the design engineer directly in the theory of control. The use of automatic solutions for non-procedural tasks, i.e. without specifying the method of their solution, it is not used not only because of the need to create and use a knowledge model of the problem domain of the theory of automatic control. But also because of the difficulties of planning actions to solve them using iterative methods. Because the problem of automatic synthesis of cyclic programs does not have a universal approach to planning actions to solve declarative set tasks. However, for a specific class of tasks, a certain generalized structure of an action plan for solving problems of this class can be defined. The growing need to build new self-propelled guns for new control facilities requires solving this problem. One of the directions of building control systems for objects with uncertain parameters is the methods of building robust control systems that involve iterative processes of performing a number of sub-tasks. This article is devoted to the study of ways to solve declarative set tasks of robust management. An approach to adjusting the knowledge model is proposed that allows the planning subsystem, based on planning artificial neural networks, to generate action plans for declarative set tasks of robust stabilization, allowing their cyclical execution until acceptable indicators of the requirements for the desired result of solving the problem are achieved. We were developing the scheme for the presentation of cyclic action plans that implement iterative methods for synthesizing control laws. An example of solving a declaratively set task of robust stabilization of a two-mass system is considered.*

Keywords: *knowledge representation, action planning, declaratively set tasks, synthesis of iterative problem solving plans, intelligent solver, planning artificial neural networks.*

REFERENCES

1. Krasovskiy A.A. Spravochnik po teorii avtomaticheskogo upravleniya [Handbook of the theory of automatic control]. M.: Nauka, 1987. 712 p. (In Russian)



© The Author(s), 2025

¹ Mikhail F. Stepanov (Dr. Sci. (Techn.)), Associate Professor, Dept. of System Engineering and Control in Technical Systems.

Andrei M. Stepanov (Ph.D. (Techn.)), Senior Lecturer, Dept. of System Engineering and Control in Technical Systems.

Olga M. Stepanova, Postgraduate Student, Dept. of System Engineering and Control in Technical Systems.

The study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 24-21-00488, <https://rscf.ru/project/24-21-00488/>

2. *Pupkov K.A., Egupov N.D.* Metody klassicheskoy i sovremennoy teorii avtomaticheskogo upravleniya [Methods of classical and modern theory of automatic control]. Vol. 1. M.: MGТУ im. N.E.H. Bauman, 2004. 656 p. (In Russian)
3. *Polyak B.T., Shcherbakov P.S.* Robastnaya ustojchivost i upravlenie [Robust stability and control]. M.: Nauka, 2002. 303 p. (In Russian)
4. *Novikov F.A.* Sistemy predstavleniya znanii [Knowledge Representations System]. SpB: ITMO, 2007. 119 p. (In Russian)
5. *Nepejvoda N.N.* Sootnoshenie mezhdu pravilami estestvennogo vyvoda i operatorami algoritmicheskikh yazykov vysokogo urovnya [The relationship between the rules of natural inference and the operators of high-level algorithmic languages] // DAN SSSR. Vol. 239, 1978. No. 3. Pp. 526–529. (In Russian)
6. *Lavrov S.S., Zalogova L.A., Petrushina T.I.* Principy planirovaniya resheniya zadach v sisteme avtomaticheskogo sinteza programm [Principles of problem solving planning in the system of automatic program synthesis] // Programmirovaniye. 1982. No. 3. Pp. 35–43. (In Russian)
7. *Tyugu En.H.* Konceptualnoe programmirovaniye [Conceptual programming]. M.: Nauka, 1984. 256 p. (In Russian)
8. *Ramirez-Rueda R., Benitez-Guerrero E., Mezura-Godoy C., Barcenat E.A.* A decade of advancements in program synthesis from natural language: a systematic literature review // Proceedings of the Institute for System Programming of the RAS. 2024. Vol. 36. No. 6. Pp. 59–82. DOI: 10.15514/ispras-2024-36(6)-4. EDN: RLOHJI.
9. *Markov A.A.* Nevozmozhnost nekotorykh algoritmov v teorii associativnykh sistem [The impossibility of certain algorithms in the theory of associative systems] // DAN. 1947. No. 55. Pp. 587–590. (In Russian)
10. *Efimov E.I.* Reshateli intellektualnykh zadach [Intelligent Problem Solvers]. M.: Nauka, 1982. 192 p. (In Russian)
11. *Gencen G.* Issledovaniya logicheskikh vyvodov [Studies of logical conclusions] // Matematicheskaya teoriya logicheskogo vyvoda. M.: Nauka, 1967. Pp. 9–76. (In Russian)
12. *Maslov S.Yu.* Teoriya deduktivnykh sistem i eyo primeneniya [Theory of deductive systems and its applications]. M.: Radio i svyaz, 1986. 136 p. (In Russian)
13. *Melekhin V.B., Khachumov M.V.* Poliperemennyye uslovno-zavisimyye predikaty v modeli predstavleniya znanij avtonomnykh mobil'nykh intellektual'nykh agentov [Semipermanent conditionally dependent predicates in the knowledge representation model of autonomous mobile intelligent agents] // Morskoye intellektual'noye tekhnologii. 2021. No. 2–1 (52). Pp. 184–190. DOI: 10.37220/MIT.2021.52.2.026. EDN: HVEGEX. (In Russian)
14. *Stepanov M.F.* Avtomaticheskoye resheniye zadach teorii avtomaticheskogo upravleniya na osnove planiruyushch ikhiskusstvennykh neyronnykh setey [Automatic problem solving in the theory of automatic control based on planning artificial neural networks] // Nejrokompyutery: Razrabotka i primeneniye. 2003. No. 3, 4. Pp. 27–44. (In Russian)
15. *Stepanov M.F.* Neyronnyye seti dlya planirovaniya resheniya zadach teorii avtomaticheskogo upravleniya [Neural networks for planning solutions to problems in the theory of automatic control] // Problemy upravleniya. 2004. No. 2. Pp. 66–71. (In Russian)
16. *Stepanov M.F., Stepanov A.M.* Mathematical modelling of intellectual self-organizing automatic control system: action planning research // Procedia Engineering. 2017. Vol. 201. Pp. 617–622. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.09.657. EDN: XNKUQG.
17. *Stepanov M.F., Stepanov A.M., Stepanova T.V., Stepanova O.M.* Features of knowledge representation of automatic control systems design methods // Studies in Systems, Decision and Control. 2023. Vol. 457. Pp. 231–243. DOI: 10.1007/978-3-031-22938-1_16.
18. *Stepanov M.F.* Analiz i sintez sistem avtomaticheskogo upravleniya v programmnoy srede INSTRUMENT-3m-I [Analysis and synthesis of automatic control systems in the INSTRUMENT-3m-I software environment] // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroeniye. 2004. Vol. 47. No. 6. Pp. 27–30. (In Russian)
19. *Ljapunov A.A.* O logicheskikh shemah programm [About logical circuits of programs] // Problemy kibernetiki. No. 1. M.: Fizmatgiz, 1958. Pp. 46–74. (In Russian)
20. *Polyak B.T., Hlebnikov M.V., Rapoport L.B.* Matematicheskaya teoriya avtomaticheskogo upravleniya [Mathematical theory of automatic control: a textbook]. M.: Lenand, 2019. 500 p. (In Russian)

Original article submitted 21.07.2025

Энергетика и электротехника

УДК 004.89

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ДЕФЕКТОВ ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ НА ОСНОВЕ НЕЙРОСЕТЕВЫХ МОДЕЛЕЙ

**Л.О. Антоненко, О.М. Проталинский, Ю.Ю. Ягупова, Т.Р. Феткуллин,
А.В. Андриюшин, Х.И. Берредэм¹**

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

E-mail: AntonenkoLO@mpei.ru, ProtalinskyOM@mpei.ru, YagupovaYY@mpei.ru,
FetkullinTR@mpei.ru, AndriushinAV@mpei.ru, BerredemK@mpei.ru

Аннотация. Рассматривается методика анализа, прогнозирования состояния и идентификации наличия неявных дефектов для паровых турбин с помощью параметрической диагностики на основе данных, измеряемых при эксплуатации турбины на тепловой электростанции. Проведена диагностика турбины Т-110/120-130. Оценка и прогнозирование состояния турбины Т-110/120-130 базируются на результатах анализа измеряемых параметров и расчета индекса технического состояния с помощью методов искусственного интеллекта и нейросетевых алгоритмов. Основной упор акцентируется на принципы построения систем параметрической диагностики для вспомогательной работы в качестве ассистентов на энергетических станциях. Предложенная методика позволяет разработать систему диагностики турбины Т-110/120-130 с возможностью выявления и идентификации неявных дефектов, прогнозирования состояния турбины на определенных временных промежутках.

Ключевые слова: энергетика, система диагностирования, диагностика энергетического оборудования, идентификация неявных дефектов, нейронные сети.



© Автор(ы), 2025

¹ Леонид Олегович Антоненко, аспирант кафедры автоматизированных систем управления тепловыми процессами.

Олег Мирославович Проталинский, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры автоматизированных систем управления тепловыми процессами.

Юлия Юрьевна Ягупова, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры автоматизированных систем управления тепловыми процессами.

Тимур Равилович Феткуллин, аспирант кафедры автоматизированных систем управления тепловыми процессами.

Александр Васильевич Андриюшин, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры автоматизированных систем управления тепловыми процессами.

Хароун Ильяс Берредэм, аспирант кафедры автоматизированных систем управления тепловыми процессами.

Введение

Одним из современных и актуальных направлений для исследования является задача своевременной диагностики состояния энергетического оборудования на тепловых и атомных электростанциях. Когда речь идет о критически важном для работы станции оборудовании, необходимо не только своевременно оценить состояние агрегата, но и удостовериться в его эффективной работе на некотором временном интервале. Диагностические методы, применяемые в отношении паротурбинного оборудования, можно разделить на четыре крупные группы: эксплуатационный мониторинг производственных параметров и энергетических показателей, динамический и спектральный анализ вибраций, физико-химический контроль смазочных сред и продуктов износа, неразрушающие методы контроля (ультразвук, акустическая эмиссия, вихретоковый контроль, тепловизионный контроль, визуальная и эндоскопическая инспекция). Предложенный в статье метод диагностирования использует нейросетевые модели для диагностики состояния турбины. Эксплуатационный мониторинг технологических и энергетических показателей основан на непрерывном сборе агрегированных энергетических метрик (давление, температура, КПД, расход) и применении пороговых критериев для выявления отклонений [1]. Эксплуатационные индикаторы отражают суммарный эффект уже развившейся деградации и позволяют выявить проблему на поздних стадиях, тогда как предложенный в статье метод способен выделять тонкие мультипараметрические корреляции между локальными сенсорными сигналами и ранними маркерами деградации. Нейросетевая диагностика позволяет системе получать предупреждение задолго до того, как агрегированные энергетические показатели выйдут за порог, и обеспечивает преимущество в своевременном планировании профилактических работ и снижении экономических потерь. Динамический и спектральный анализ вибраций использует частотный и временной анализ вибрационных сигналов для локализации дисбалансов, люфтов и усталостных повреждений посредством выделения характерных гармоник и их эволюции [2]. Спектральный анализ обладает высокой локальной чувствительностью к механическим аномалиям, однако он критически зависит от качества размещения датчиков, анализа перекрывающихся источников и экспертной интерпретации. Архитектура предложенного метода интегрирует вибрационные данные как элемент многомерного вектора признаков и использует нейронные сети для отделения устойчивых деградационных трендов от кратковременных возмущений. Дополнительно программа извлекает локальные частотно-амплитудные паттерны, формализуя их вклад в долгосрочную динамику, – в результате снижается вероятность ложных диагнозов и повышается автоматизация интерпретации сложных смешанных сигналов. Физико-химический контроль включает в себя лабораторный анализ масла (металлические включения, вязкость, кислотообразующая способность) для обнаружения износа и коррозии в опорах и уплотнениях [3]. Такой вид контроля обеспечивает высокую специфичность по отношению к износу, но носит периодический характер и обладает ограниченной оперативностью. Предложенная система, действуя в непрерывном режиме, способна интегрировать результаты лабораторных анализов как верификационные метки в процессе дообучения и одновременно генерировать предварительные сигналы тревоги. Такая методика позволяет эффективно использовать лабораторные пробы и дорогостоящие анализы, уменьшать частоту необоснованных проб и повышать оперативность обнаружения проблем. Неразрушающие методы контроля (ультразвук, акустическая эмиссия, вихретоковый контроль, тепловизионный контроль, визуальная и эндоскопическая

инспекция) основаны на адресных инструментальных обследованиях (для точной локализации трещин коррозионных очагов и других дефектов с высокой пространственной разрешающей способностью) [4]. Такие методы превосходны в точечной верификации, но их применение связано с периодическими остановками, трудоемкой подготовкой и высокой стоимостью, а также они не обеспечивают непрерывного мониторинга. Гибридная нейросетевая платформа сможет играть роль непрерывного «фильтра раннего оповещения», при этом именно она оптимизирует и сокращает объем проверок с методами неразрушающего контроля, направляя их только на зоны с высоким риском наличия дефекта, что экономически обосновано и уменьшает долю ненужных инспекций без утраты пространственной точности. Преимущества предложенной методики выражаются прежде всего в ее способности обеспечить раннюю, многопараметрическую и прогностическую диагностику – то есть в тех аспектах, где классические эксплуатационный мониторинг, вибрационный анализ, физико-химический анализ и методы неразрушающего контроля либо ограничены оперативностью и покрытием, либо требуют адресной валидации. Предлагаемая нейросетевая платформа, действуя как централизованный многоуровневый фильтр, не отменяет, но оптимально дополняет традиционные методы, переводя их применение в более экономически и технически обоснованный режим.

Задача исследования

Основной задачей исследования является разработка системы диагностики для турбин типа Т. В качестве примера система будет протестирована на турбине Т-110/120-130. Главной целью синтезированной системы будет поиск, выявление и идентификация неявных дефектов в турбинном оборудовании, а также прогнозирование его состояния на некоторых временных интервалах. С применением параметрической диагностики на основе интегрального индекса технического состояния (ИТС) в оборудовании типа паровых турбин Т-110/120-130 становятся доступными к обнаружению разнообразные неявные дефекты, которые традиционные методы визуального или единичного контрольного замера часто упускают. Основные типы выявляемых неявных дефектов:

1. Микротрещины в лопатках ротора, возникающие в результате циклических термомеханических напряжений на границах зерен и в зоне корневого перехода. Обнаруживаются посредством анализа модальных и гармонических составляющих вибрационного сигнала: даже незначимые, но систематические сдвиги частотных пиков и рост амплитуд высших гармоник приводят к сокращению ИТС и служат предвестниками усталостных разрушений [5].

2. Коррозионное истончение обечаек корпуса, внутренних камер и паропроводов, развивающееся вследствие агрессивного воздействия теплоносителей и продуктов сгорания. Проявляется в накоплении аномалий перепада давления и нелинейных градиентов температурного поля вдоль ходов газа. Сопоставление динамики этих параметров с нормативными кривыми в рамках вычисления ИТС позволяет количественно оценить глубину коррозионного поражения еще до возникновения видимых дефектов и межкристаллитных раковин [6].

3. Микролюфт в подшипниках и посадочных местах рабочих лопаток высокого давления, обусловленный выработкой баббитового слоя или износом подшипниковых вкладышей. Выражается в локальных возрастаниях температур смазочной системы и появлении асимметричных компонент вибрационной сигнатуры. Параметрический анализ данных температуры и виброметрии,

агрегированный в ИТС, позволяет выявить эту пробуксовку задолго до полной деградации подшипников и возникновения разрушений [7].

4. Адгезионные и кавитационно-абразивные отложения на теплообменных поверхностях турбины и камер сгорания, приводящие к формированию локальных «горячих точек», фиксируются через аномальные скачки локальной температуры и нелинейные искажения турбулентности газового потока. Учет статистики таких флуктуаций при расчете ИТС дает возможность оценить степень загрязненности и вычислить оптимальные интервалы химико-механической очистки [8].

5. Усталостное разрушение тонкостенных лопаток при частых переходах через резонансные частоты в режимах малых нагрузок выявляется посредством спектрального анализа акустических эмиссий и высокочастотных вибрационных помех. Интеграция этих данных в параметрическую модель на уровне ИТС обеспечивает раннюю детекцию кавитационно-акустических дефектов, что важно для предотвращения катастрофических отказов при высоконагруженных режимах [9].

Анализ этапов построения модели для идентификации дефектов и прогнозирования состояния

В качестве исходных данных для разработки методики использовались параметры турбины Т-110/120–130, полученные от тепловой электростанции. Для проведения расчетов использовались датасеты, содержащие характеристики турбины как при нормальной эксплуатации, так и при наличии выявленных дефектов. Дополнительно датасеты были дополнены критическими характеристиками турбины из нормативной документации. Совокупность полученных данных позволила полноценно оценить работу турбины с помощью нейронных сетей и спрогнозировать ее состояние на определенный временной интервал. Для реализации методики диагностики и прогнозирования состояния оборудования будет использована модель на основе турбины Т-110/120-130. Паровая турбина типа Т-110/120–130 служит ключевым звеном в преобразовании тепловой энергии водяного пара в механическую работу ротора, которая далее через редуктор и генератор трансформируется в электрическую [10]. Рабочий цикл начинается с того, что насыщенный или перегретый пар высокого давления, накопленный в барабане котлоагрегата, поступает по подающему коллектору на вход в ступень высокого давления турбины, где через направляющий аппарат и лопаточный аппарат осуществляется начальное расширение, сопровождаемое значительными перепадами давления и температуры. Далее последовательно следуют ступени среднего и низкого давления, каждая из которых снабжена собственным сегментом диафрагм, лопаток и отводящих камер, что обеспечивает поэтапное, регулируемое преобразование внутренней энергии пара в кинетическую энергию вращения ротора. Для полноценного анализа работы турбины в расчет ИТС турбины Т-110/120–130 следует интегрировать следующие группы параметров:

- входные параметры: давление и температура перегретого пара, расход рабочего пара, влажность пара (содержание влаги), энтальпия и массовый расход;
- параметры внутри турбины: локальные температуры корпуса на каждой ступени, перепады давления и энтальпии между ступенями;
- выходные параметры: давление и температура отработавшего пара, расход конденсата, тепловая эффективность (коэффициент использования тепла), нагрузка на ротор (крутящий момент, скорость вращения).

Корреляция каждой группы показателей с величиной ИТС позволяет достоверно определить тип выявленного дефекта. Рост перепада давления с

одновременным снижением тепловой эффективности указывает на коррозию обечаяек, а увеличение уровня высокочастотной акустической эмиссии при стабильных вибрационных параметрах – на кавитационное разрушение лопаток. Комплексный учет этих параметров обеспечивает раннюю и точную идентификацию неявных дефектов турбинного оборудования и позволяет спланировать превентивные ремонтные мероприятия до возникновения отказов.

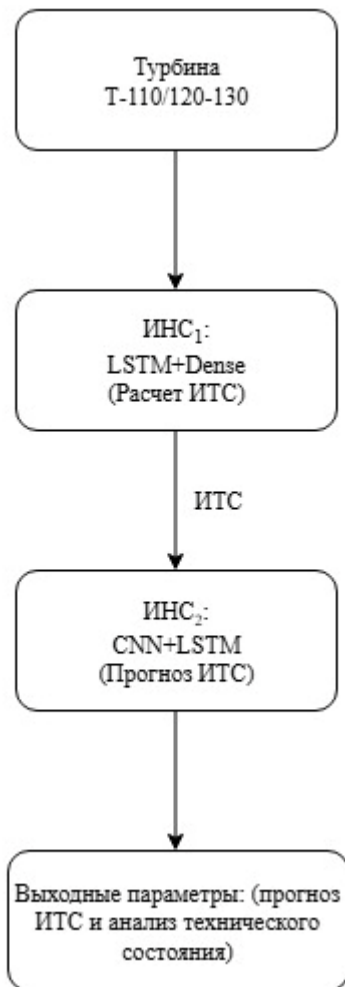


Рис. 1. Функциональная схема диагностической системы

Функциональная схема представлена на рис. 1. Параметрическая диагностика паровой турбины Т-110/120-130 представляет собой многокомпонентную архитектуру, в которой изначально параметры рабочего пара (давление рабочего пара, температура, массовый расход, частоты вращения, значения энтальпии и влажности пара) поступают на вход первой нейросети, реализованной в виде гибридного LSTM-Dense конвейера. Внутри ИНС₁ рекуррентные LSTM-ячейки обеспечивают хранение и обновление долгосрочных временных зависимостей между последовательными выборками сигналов, а последующие полносвязные слои выполняют нелинейную агрегацию выделенных признаков. Такая архитектура помогает не только идентифицировать скрытые усталостные и коррозионные дефекты, но и

рассчитать ИТС. Полученный в ИНС₁ вектор ИТС, отражающий совокупный уровень деградации узловых элементов, передается вместе с исходным массивом измеренных параметров на вход второй нейросети (ИНС₂), в которой пространственно-временная обработка осуществляется через последовательность сверточных блоков для локального выделения аномальных паттернов в частотной и амплитудной характеристиках, после чего рекуррентный LSTM-модуль агрегирует полученные локальные признаки в глобальное представление временного тренда. Финальный полносвязный выходной слой ИНС₂ генерирует прогноз динамики ИТС, давая возможность определить ключевые рабочие характеристики турбины на заданный горизонт времени. Модель обеспечивает не только диагностику текущего состояния, но и предикцию вероятности отказа и оценки остаточного ресурса и позволяет энергопредприятиям планировать профилактическое обслуживание с учетом фактического состояния оборудования и снижать риски внеплановых простоев.

Архитектуры нейронных сетей

Для обучения и проверки работы нейронных сетей использовались данные, представленные ежедневной выборкой за интервал с 2022 до начала 2025 года. Дополнительно по нормативной технической документации были добавлены критические состояния турбины, характеризующие наличие дефектов. Итоговый массив данных состоял из 1460 точек. Исходные данные относятся к разряду средней длины для задач временных рядов. Ряды достаточно длинные, чтобы уловить сезонные и годовые эффекты, но не избыточно большие для обучения компактных глубоких моделей. Каждый элемент ряда содержал набор синхронизированных признаков: давление рабочего пара, температура, массовый расход, частоты вращения, значения энтальпии и влажности пара. Параллельно с этими признаками рассчитывался интегральный индекс технического состояния по нормативной методике для соответствующего дня, используемый далее как эталон при обучении ИНС₁ и как один из признаков при обучении ИНС₂. Важный ориентир эксперимента – целевые результаты: ИНС₁ должна была вычислить значения ИТС на историческом интервале 2022–2025 г. на основании многопараметрических сигналов, а ИНС₂ – построить адекватный ИТС. В качестве предобработки данных все каналы были синхронизированы по единому временному штампу, локальные пропуски (до нескольких последовательных дней) заполнялись интерполяцией, тогда как продолжительные разрывы и явные артефакты фиксировались и исключались из обучающей подвыборки. Такие параметры помечались для отдельного анализа, чтобы не внедрять в модель ошибочные паттерны. В силу задач двухуровневой архитектуры применялась разная логика окон. Для ИНС₁ (оценка текущего ИТС) использовалось окно исторической длины, равное 30 дням. Предложенная историческая дистанция дает возможность LSTM-подсети аккумулировать локальные месячные тренды и сглаживать кратковременные возмущения. На вход ИНС₁ получало матрицу из 30 дней со всеми параметрами работы турбины. Для ИНС₂ (многодневный прогноз) применялось более длинное окно в 90 дней. Сначала выделялись локальные частотно-амплитудные паттерны в пределах этого окна, а затем последовательность извлеченных локальных признаков агрегировалась для построения прогноза. С учетом временной природы данных разбиение на обучающую, валидационную и тестовую подвыборки выполнялось по времени. Для обучения использовался период с 2022 до 2024 года. Для валидации информации о первых шести месяцах 2025 года итоговая оценка включала прогноз работы

турбины до 2027 года. Для первой нейронной сети использовалась валидация методом hold out, при котором исходная размеченная выборка делится на две части: обучающую и отложенную (тестовую, hold-out). Для второй нейронной сети использовалась Expanding Window Validation (валидация расширяющегося окна) – стратегия валидации моделей временных рядов, при которой обучающее множество постепенно расширяется с добавлением новых данных. Первая нейронная сеть (ИНС₁), построенная на гибридной архитектуре LSTM–Dense, представляет собой многоуровневый аналитический модуль, задача которого заключается в преобразовании многомерных временных рядов эксплуатационных параметров турбины Т-110/120-130 в интегральный показатель ее технического состояния. На вход ИНС₁ поступает набор синхронных измерений – давление и температура перегретого пара, массовый расход, скорость вращения ротора, энтальпия и влажность среды, которые в совокупности характеризуют текущий режим работы и динамику износа узлов. Блок LSTM, располагаясь в начале сети, осуществляет селективную агрегацию предыдущих состояний и новых поступающих сигналов благодаря специализированным механизмам управления потоком информации. Такие механизмы могут удерживать в памяти ключевые тренды деградации оборудования и одновременно отбрасывать малозначимые шумы. Полученные временные представления затем проходят через серию полносвязных слоев, где происходит нелинейная компиляция извлеченных признаков, трансформация их пространственной структуры и отработка скрытых корреляций между датчиками. Рассчитанные выходы ИНС₁ формируют вектор поуровневых индексов технического состояния: сначала для каждого функционального узла турбины, а затем и общий индекс, отражающий совокупную степень деградации. В конечном итоге ИНС₁ обеспечивает высокоточную идентификацию дефектов и количественную оценку их влияния на надежность системы. Итоговые значения выходных параметров служат основой для последующих прогностических расчетов и принятия решений по техническому обслуживанию. По методике расчета ИТС для тепломеханического оборудования и паровых турбин ИТС паровой турбины будет учитывать ИТС [11]:

- арматуры в пределах турбины;
- корпуса цилиндра;
- подшипников турбины;
- ротора турбины;
- системы парораспределения;
- трубопроводов в пределах турбины.

Функциональная схема ИНС₁ представлена на рис. 2. Опишем подробнее работу ИНС₁. Входной вектор нейросети:

$$x_t = [P_{in}(t), T_{in}(t), m(t), w(t), h(t), \alpha_w(t)]^T, \quad (1)$$

где P – значения давления; T – значения температуры; m – значения массового расхода; w – значения скорости вращения; h – значения энтальпии; α – значения влажности пара на шаге t .

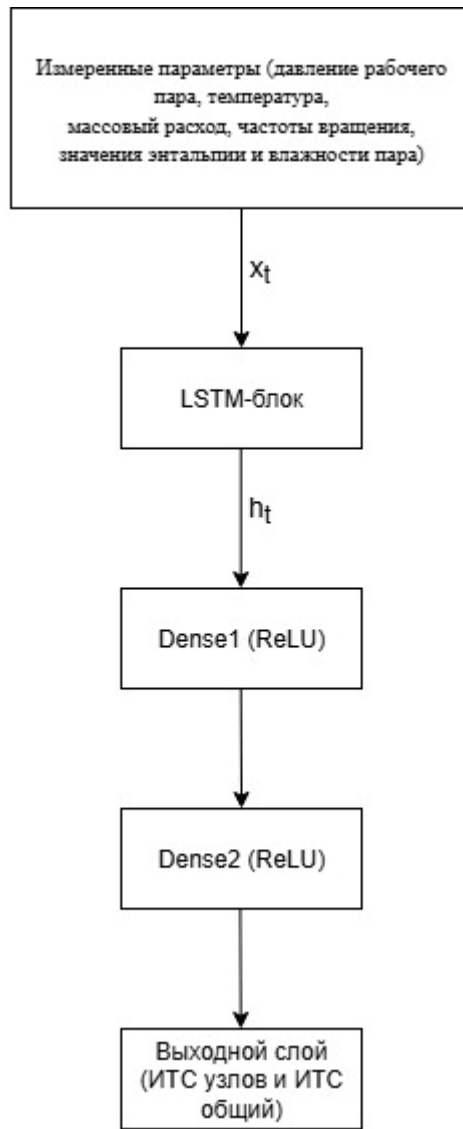


Рис. 2. Функциональная схема ИНС1

LSTM-блок [12]

Для учета временных зависимостей используется LSTM-ячейка, обновляющая внутреннее состояние $s(t)$ и вырабатывающая скрытое представление $h(t)$:

$$i_t = \sigma(W_i * x_t + U_i * h_{t-1} + b_i), \quad (2)$$

$$f_t = \sigma(W_f * x_t + U_f * h_{t-1} + b_f), \quad (3)$$

$$o_t = \sigma(W_o * x_t + U_o * h_{t-1} + b_o), \quad (4)$$

$$\tilde{c}_t = \tanh(W_c * x_t + U_c * h_{t-1} + b_c), \quad (5)$$

$$c_t = f_t \odot c_{t-1} + i_t \odot \tilde{c}_t, \quad (6)$$

$$h_t = o_t \odot \tanh(c_t), \quad (7)$$

где $i(t)$, $f(t)$, $o(t)$ – гейты; σ – сигмоида; $\odot$ – поэлементное умножение; $W(*)$, $U(*)$, $b(*)$ – обучаемые параметры. LSTM аккумулирует накопленные во времени признаки деградации (усталость металла, коррозионные тенденции и т. п.).

Dense-блоки [13]

Скрытое состояние $h(t)$ подается на серию полносвязных слоев. Первый Dense-блок переводит многомерный временной эмбединг, который вышел из LSTM в пространство компактных высокоуровневых признаков, где нелинейности могут лучше отделять информативные факторы деградации от шума. Функционально первый слой комбинирует признаки, отвечающие за пространственно-временные характеристики, в признаки, пригодные для регрессии. Второй Dense-блок реализует окончательное отображение этих высокоуровневых признаков в целевой вектор прогнозов ИТС на все шаги горизонта. Такой разрыв обязанностей улучшает обучаемость, поскольку уменьшает нагрузку на один монолитный слой:

$$z^{(1)} = f\left(W^{(1)} * h_t + b^{(1)}\right), \quad (8)$$

$$z^{(2)} = f\left(W^{(2)} * z^{(1)} + b^{(2)}\right), \quad (9)$$

$$\hat{y} = W^{(3)} * z^{(2)} + b^{(3)}, \quad (10)$$

где f – функция ReLU, а последний слой $\hat{y}$ выдает вектор ИТС узлов и системы [ITS(1), ..., ITS(2), ITS(total)]. Сеть оптимизируется по среднеквадратичной ошибке между $\hat{y}$ и опорными метками y_t (заранее определенными ИТС системы и узлов для конкретных значений параметров турбины):

$$\theta = \frac{1}{N} * \sum_{i=1}^N \left\| y^{(i)} - \hat{y}^{(i)} \right\|^2 \rightarrow \min. \quad (11)$$

Первая нейронная сеть (ИНС₁) выполняет несколько важных функций:

- фильтрация поступающей информации (входной гейт);
- управление сохранением исторических данных (гейт забывания);
- формирование выходного отклика (выходной гейт).

Благодаря гейтам LSTM умеет «выбирать», какие фрагменты временного ряда важны для долгосрочной памяти, а какие следует отбросить. Такая методика позволяет эффективно моделировать как краткосрочные, так и долгосрочные зависимости без эффекта затухающих или взрывающихся градиентов.

Вторая нейронная сеть (ИНС₂), основанная на последовательном сочетании сверточного (Conv1D + Pooling) и рекуррентного (LSTM) блоков, служит для прогностического анализа динамики технического состояния паровой турбины Т-110/120-130. На вход данной сети поступает расширенный набор признаков, включающий в себя как оригинальные эксплуатационные параметры (давление рабочего пара, температура, массовый расход, частоты вращения, значения энтальпии и влажности пара), так и рассчитанный предыдущей сетью интегральный индекс технического состояния. Сверточная подсеть выполняет локальное сканирование входных временных рядов с целью выявления мелкомасштабных аномалий и кратковременных возмущений, отражающихся в виде резких флуктуаций или «импульсных» артефактов в различных каналах данных. По результатам операций пулинга формируется компактный набор высокоуровневых признаков,

инвариантных к сдвигам и масштабу, что повышает устойчивость к шумовым выбросам и снижает избыточность информации. Вторым этапом полученные локальные признаки обрабатываются LSTM-модулем, способным аккумулировать и «запоминать» длительные тренды деградации оборудования, возникающие при циклических термовибрационных и коррозионных нагрузках. Рекуррентная ячейка, управляя потоком информации через интегративные механизмы, аккумулирует исторические паттерны ухудшения состояния. Накопленные данные позволяют сети отличать фазовые закономерности от случайных флуктуаций. Наконец, в полносвязном выходном слое ИНС₂ агрегирует результирующее временное представление и формирует прогноз интегрального индекса технического состояния на заранее заданный горизонт планирования. Такой подход обеспечивает раннее предсказание наступления критических состояний и способствует оптимизации графиков профилактического обслуживания, минимизируя неплановые простои и повышая общую эффективность эксплуатации энергокомплекса.

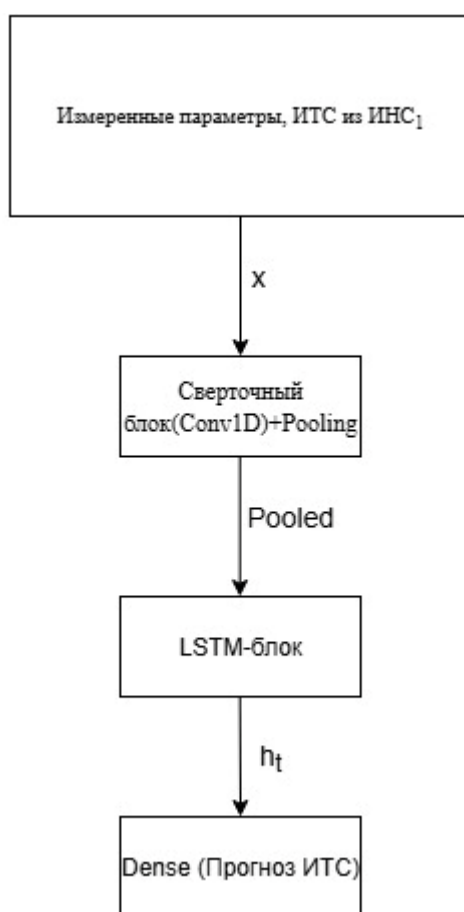


Рис. 3. Функциональная схема ИНС2

Функциональная схема ИНС2 представлена на рис. 3. Рассмотрим подробнее логику работы ИНС2. Вторая нейронная сеть (ИНС₂) предназначена для прогнозистического анализа технического состояния паровой турбины Т-110/120-130. Она использует на вход расширенный набор признаков, включающий агрегированные результаты диагностики ИНС₁ (ИТС) и исходные эксплуатационные параметры.

Архитектура ИНС₂ объединяет сверточный блок для локального выделения аномальных паттернов и рекуррентный LSTM-блок для учета долговременных зависимостей. При обучении ИНС₂ использовала среднеквадратичную ошибку между прогнозом и эталонными значениями. ИНС₂ включает в себя следующие функции и блоки:

1. Формирование входного тензора [14]. На вход ИНС₂ подается матрица

$$x = \begin{bmatrix} x_{t-n+1} \\ x_t \\ ИТС_t \end{bmatrix}, \quad (12)$$

где каждая строка $x(t)$ – вектор параметров $[P, T, m, w, h, \alpha]$, а $ИТС(t)$ – скалярный индекс технического состояния из ИНС₁.

2. Сверточный (Conv1D) блок [15]. Для каждого фильтра k и положения j выполняется одномерная свертка:

$$z_k(j) = f_2 \left(\sum_{i=0}^{m-1} w_{k,i} X_{j+i} + b_k \right), \quad (13)$$

где $w(k, i)$ – веса k -го ядра длины m ; $b(k)$ – смещение; $f(2)$ – нелинейность (ReLU). Данный блок позволяет обнаружить локальные аномалии (резкие скачки или «шумы») во входных признаках за последние m шагов.

3. Pooling [16]. Для уменьшения размерности и повышения устойчивости к сдвигам по времени применяется max-pooling:

$$p_k(l) = \max z_k(j), \quad (14)$$

где $p(k)$ – это максимум из l -го окна длины p в сверточном канале k , $z_k(j)$ – выход сверточного слоя (Conv1D) в канале k на позиции j .

4. LSTM-блок. На полученную карту признаков $P = [p_1, \dots, p(k)]$ накладывается LSTM-ячейка (формулы гейтов и обновления состояния $c(t)$, $h(t)$ как в ИНС₁), обеспечивающая учет длительных динамических трендов.

5. Выходной слой (Dense). Скрытое состояние LSTM $h(t)$ проходит через один полносвязный слой:

$$\hat{y} = W_0 * h_t + b_0, \quad (15)$$

где y – прогнозируемый индекс технического состояния через заданный горизонт.

Используя предложенную структуру, ИНС₂ сочетает локальное выделение аномалий (Conv1D + Pooling) с глобальным учетом временных зависимостей (LSTM), обеспечивая точное прогнозирование оставшегося ресурса и надежности турбины.

Тестирование системы диагностирования

График изменения индекса технического состояния (рис. 4) демонстрирует во времени обобщенную характеристику текущего состояния оборудования турбины Т-110/120-130. По вертикали отложено значение ИТС (обычно в шкале от 0 до 100), по горизонтали – время эксплуатации. На графике видны отдельные кривые, соответствующие основным функциональным узлам – арматуре, корпусу цилиндра, подшипникам, ротору, системе парораспределения и трубопроводам. График

представляет собой выходные данные по ИТС для двух нейронных сетей. На основе данных о работе турбины получены значения ИТС по параметрам турбины. Точность работы программы будет проверена с помощью методики RMSE. Абсолютных «регламентированных» порогов RMSE для задач прогнозирования технического состояния оборудования нет – RMSE всегда интерпретируется относительно масштаба целевой переменной. Рассчитанный прогноз на d дней дал предсказания:

$$y_1 = \begin{bmatrix} y_1 \\ \dots \\ y_d \end{bmatrix}, y_2 = \begin{bmatrix} ИТС_1 \\ \dots \\ ИТС_d \end{bmatrix}, \quad (16)$$

где y_1 – прогнозируемый ИТС на d дней; y_2 – ИТС, рассчитанным по методике Минэнерго для предсказанных рабочих параметров турбины. Тогда корень из среднеквадратичной ошибки

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{d} * \sum_{t=1}^d (y_t - ИТС_t)^2}, \quad (17)$$

где $RMSE$ – один скаляр, агрегирующий информацию обо всех ошибках на d дней. $RMSE$ дает оценку «типичной» (корня среднего квадрата) ошибки в тех же единицах, что и прогнозируемая величина. Нельзя оценивать качество модели по абсолютному значению $RMSE$ без контекста масштаба целевой переменной:

$$nRMSE = \frac{RMSE}{ИТС_{\max} - ИТС_{\min}}, \quad (18)$$

где $nRMSE$ – интерпретация $RMSE$ к масштабу $ИТС$; $ИТС(\max)$ – максимальное значение $ИТС = 100$; $ИТС(\min)$ – минимальное значение $ИТС = 0$. Итоговые значения варьируются в зависимости от количества прогнозируемых дней в диапазоне

$$0.04 \leq nRMSE \leq 0.14. \quad (19)$$

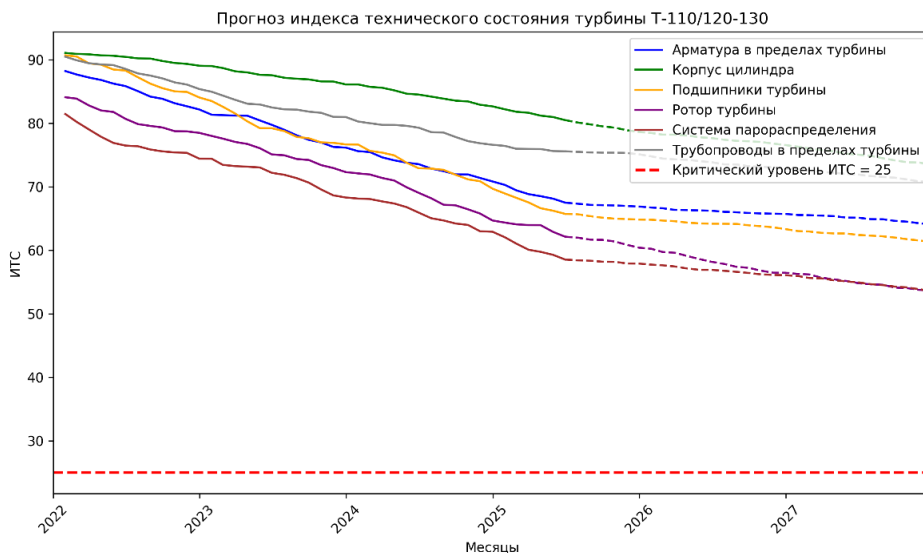


Рис. 4. Графическое представление результатов работы системы диагностирования

Полученные результаты показывают, что на выбранной дистанции прогнозирования RMSE изменяется от 4 до 14 %. При прогнозировании на несколько дней или месяцев погрешность не превышает 4–7 %, что в контексте ИТС (от 0 до 100) может являться допустимой погрешностью. Когда диапазон прогнозирования возрастает до двух лет, погрешность возрастает до 14 %, что может привести к ошибочным интерпретациям индекса технического состояния. Для дальнейших исследований диапазон прогнозирования будет уточнен с учетом первой нейронной сети, способной постоянно в режиме реально времени корректировать прогнозы второй нейронной сети.

Заключение

Предложенная система диагностики на основе нейросетевых моделей и параметрического анализа позволяет автоматизировать выявление неявных дефектов турбинного оборудования на тепловой электростанции. Практическая польза метода проявляется в нескольких взаимодополняющих эффектах:

- повышение чувствительности к многофакторным паттернам, недоступным классическим пороговым алгоритмам (позволяет фиксировать дефекты на этапе микроскопических проявлений);

- возможность количественной оценки тенденции деградации (прогноз ИТС) и тем самым формирование обоснованных графиков профилактических вмешательств, минимизирующих суммарные эксплуатационные затраты и риск незапланированных простоев.

Системный анализ ошибок прогноза служит оперативным индикатором деградации качества модели. Рост nRMSE или возрастающая доля дней с крупными отклонениями должны трактоваться как сигнал к пересмотру обучающей выборки, корректировке архитектуры или переработке стратегии предобработки данных. Технические ограничения метода и меры по их минимизации также очевидны – эффективность модели напрямую зависит от полноты и качества сенсорной сети, корректности расчета исходных ИТС и репрезентативности обучающих данных, поэтому для практического внедрения необходимы процедуры контроля целостности датчиков, синхронизации временных рядов и верификации нормативных весовых коэффициентов. Таким образом, предложенная методика для расчета ИТС конкретных узлов турбины T-110/120-130 в совокупности с современными методами ИИ-диагностики создает эффективный инструмент раннего выявления дефектов, прогнозирования оставшегося ресурса и своевременного предотвращения отказов оборудования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Tahan M., Tsoutsanis E., Muhammad M., Abdul Karim Z.A.* Performance-based health monitoring, diagnostics and prognostics for condition-based maintenance of gas turbines // *Applied Energy*. 2017. Vol. 198. Pp. 122–144. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.04.048. EDN: YDANFB
2. *Chang L.-Y., Chung Y.-N., Lin C.-H., Chen J.-L., Kuo C.-L., Chen S.-J.* Mechanical vibration fault detection for turbine generator using frequency spectral data and machine learning model: feasibility study of big data analysis // *Sensors and Materials*. 2018. Vol. 30. No. 4. Pp. 821–832. DOI: 10.18494/SAM.2018.1783
3. *Prabhakaran A., Jagga C.R.* Condition monitoring of steam turbine-generator through contamination analysis of used lubricating oil // *Tribology International*. 1999. Vol. 32. No. 3. Pp. 145–152. DOI: 10.1016/S0301-679X(99)00028-6

4. *Gomaa A., Jung J.-C., Lee Y.-K.* A study on non-destructive evaluation of the steam turbine L-0 blades // *Journal of KOSSE*. 2016. Vol. 12. No. 1. Pp. 59–71. DOI: 10.14248/JKOSSE.2016.12.1.059
5. *Ахмедова Э.Р., Тухватуллина А.Р.* Характерные и основные поломки и разрушения лопаток паровых и газовых турбин // Актуальные проблемы науки и техники: сб. науч. ст. по материалам VIII Междунар. науч.-практ. конф., Уфа, 15 апр. 2022 года. Уфа: Вестник науки, 2022. С. 22–28. EDN: FSDLWC
6. *Головин В.А., Печников Н.В., Щелков В.А., Цивадзе А.Ю.* Оценка срока эксплуатации теплообменных трубок конденсаторов пара на основе статистического анализа локальной язвенной коррозии по данным вихретокового контроля // *Физикохимия поверхности и защита материалов*. 2018. Т. 54. № 4S. С. 14–26. DOI: 10.1134/S004418561806013X. EDN: YOJSSL
7. *Лазарев Г.Б., Самородов Ю.Н.* Эрозионные повреждения подшипников турбогенераторов и мощных электродвигателей // *Энергия единой сети*. 2017. № 5(34). С. 44–60. EDN: ZUQTIL
8. *Чичирова Н.Д., Власов С.М., Чичиров А.А. [и др.]* Исследование структуры отложений в системах обратного охлаждения паровых турбин ТЭС // *Теплоэнергетика*. 2018. № 9. С. 94–102. DOI: 10.1134/S0040363618090023. EDN: XTWNGP
9. *Ахмедова Э.Р., Тухватуллина А.Р.* Характерные и основные поломки и разрушения лопаток паровых и газовых турбин // Актуальные проблемы науки и техники: сб. науч. ст. по материалам VIII Междунар. науч.-практ. конф., Уфа, 15 апр. 2022 года. Уфа: Вестник науки, 2022. С. 22–28. EDN: FSDLWC
10. РД 34.25.102-87 «Теплофикационный моноблок с турбиной Т-110/120-130 и барабанным котлом. Типовая пусковая схема»: руководящий документ / М-во энергетики СССР; разработ. ПО «Союзтехэнерго» [и др.]. М., 1986. 32 с.
11. Министерство энергетики Российской Федерации. Об утверждении Методики оценки технического состояния основного технологического оборудования и линий электропередачи электрических станций и электрических сетей: приказ от 26 июля 2017 г. № 676 // *Собрание законодательства РФ*. 2017. № 34. Ст. 5266.
12. *Hochreiter S., Schmidhuber J.* Long Short-Term Memory // *Neural Computation*. 1997. Vol. 9, No 8. Pp. 1735–1780. DOI: 10.1162/neco.1997.9.8.1735
13. *Huang G., Liu Z., van der Maaten L., Weinberger K.Q.* Densely Connected Convolutional Networks // *arXiv preprint*. 2016. arXiv:1608.06993
14. *Ong Y.J., Qiao M., Jadav D.* Temporal Tensor Transformation Network for Multivariate Time Series Prediction // *arXiv preprint*. 2020. arXiv:2001.01051
15. *Miron S., Albizzati A., Barazzetti L., Cordellini M., Mazzotti D., Pace A., Valli G., Vitale M., Zimoch I.* The Short-Term Prediction of Length of Day Using 1D Convolutional Neural Networks // *Sensors*. 2022. Vol. 22. No 23. Article 9517. DOI: 10.3390/s22239517. EDN: EZLMVK
16. *Hyun Ju.* Universal pooling – A new pooling method for convolutional neural networks / Ju Hyun, H. Seong, E. Kim // *Expert Systems with Applications*. 2021. Vol. 180. P. 115084. DOI: 10.1016/j.eswa.2021.115084. EDN: YMOKJW

Статья поступила в редакцию 17.07.2025

STEAM TURBINE FAULT IDENTIFICATION BASED ON NEURAL NETWORK MODELS

**L.O. Antonenko, O.M. Protalinsky, Yu.Yu. Yagupova, T.R. Fetkullin,
A.V. Andriushin, H.I. Berredem¹**

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

E-mail: AntonenkoLO@mpei.ru, ProtalinskyOM@mpei.ru, YagupovaYY@mpei.ru,
FetkullinTR@mpei.ru, AndriushinAV@mpei.ru, BerredemK@mpei.ru

Abstract. *The paper discusses a methodology for analyzing, predicting the condition, and identifying latent defects in steam turbines using parametric diagnostics based on data measured during the operation of a turbine at a thermal power plant. The article presents a diagnostic analysis of a T-110/120-130 turbine. The assessment and prediction of the T-110/120-130 turbine's condition are based on the results of analyzing measured parameters and calculating a technical condition index using artificial intelligence methods and neural network algorithms. The main emphasis is placed on the principles of building parametric diagnostic systems for auxiliary work as assistants at power stations. The proposed methodology allows for the development of a diagnostic system for the T-110/120-130 turbine with the capability to detect and identify latent defects and predict the turbine's condition over specific time intervals.*

Keywords: *power engineering, diagnostic system, power equipment diagnostics, latent defect identification, neural networks.*

REFERENCES

1. Tahan M., Tsoutsanis E., Muhammad M., Abdul Karim Z.A. Performance-based health monitoring, diagnostics and prognostics for condition-based maintenance of gas turbines // *Applied Energy*. 2017. Vol. 198. Pp. 122–144. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.04.048. EDN: YDANFB.
2. Chang L.-Y., Chung Y.-N., Lin C.-H., Chen J.-L., Kuo C.-L., Chen S.-J. Mechanical vibration fault detection for turbine generator using frequency spectral data and machine learning model: feasibility study of big data analysis // *Sensors and Materials*. 2018. Vol. 30. No. 4. Pp. 821–832. DOI: 10.18494/SAM.2018.1783.



© The Author(s), 2025

¹ Leonid O. Antonenko, Postgraduate Student, Dept. of Automated Control Systems for Thermal Processes.

Oleg M. Protalinsky (Dr. Sci. (Techn.)), Professor, Dept. of Automated Control Systems for Thermal Processes.

Yulia Yu. Yagupova (Ph.D. (Techn.)), Senior Lecturer, Dept. of Automated Control Systems for Thermal Processes.

Timur R. Fetkullin, Postgraduate Student, Dept. of Automated Control Systems for Thermal Processes.

Alexander V. Andriushin (Dr. Sci. (Techn.)), Professor, Dept. of Automated Control Systems for Thermal Processes.

Haroun I. Berredem, Postgraduate Student, Dept. of Automated Control Systems for Thermal Processes.

3. *Prabhakaran A., Jagga C.R.* Condition monitoring of steam turbine-generator through contamination analysis of used lubricating oil // *Tribology International*. 1999. Vol. 32. No. 3. Pp. 145–152. DOI: 10.1016/S0301-679X(99)00028-6.
4. *Gomaa A., Jung J.-C., Lee Y.-K.* A study on non-destructive evaluation of the steam turbine L-0 blades // *Journal of KOSSE*. 2016. Vol. 12. No. 1. Pp. 59–71. DOI: 10.14248/JKOSSE.2016.12.1.059.
5. *Ahmedova E.R., Tuhvatullina A.R.* Harakternye i osnovnye polomki i razrusheniya lopatok parovyh i gazovyh turbin [Characteristic and Main Failures and Fractures of Steam and Gas Turbine Blades] // *Aktualnye problemy nauki i tekhniki: sb. nauch. st. po materialam VIII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., Ufa, 15 apr. 2022 goda*. Ufa: Vestnik nauki, 2022. Pp. 22–28. EDN: FSDLWC. (In Russian)
6. *Golovin V.A., Pechnikov N.V., Shchelkov V.A., Civadze A.Yu.* Ocenka sroka eksploatatsii teplobmennyyh trubok kondensatorov para na osnove statisticheskogo analiza lokalnoy yazvennoy korrozii po dannym vihretokovogo kontrolya [Service Life Assessment of Steam Condenser Heat Exchanger Tubes Based on Statistical Analysis of Local Pitting Corrosion from Eddy Current Testing Data] // *Fizikohimiya po-verhnosti i zashchita materialov*. 2018. Vol. 54. No. 4S. Pp. 14–26. DOI: 10.1134/S004418561806013X. EDN: YOJSSL. (In Russian)
7. *Lazarev G.B., Samorodov Yu.N.* Eroziionnye povrezhdeniya podshipnikov turbogenera-torov i moshchnyyh elektrodvigatelej [Erosion Damage of Turbogenerator and High-Power Electric Motor Bearings] // *Energiya edinoj seti*. 2017. No. 5(34). Pp. 44–60. EDN: ZUQTIL. (In Russian)
8. *Chichirova N.D., Vlasov S.M., Chichirov A.A.* [i dr.] Issledovanie struktury otlozhe-nij v sistemah oborotnogo ohlazhdeniya parovyh turbin TES [Study of Deposit Structure in Steam Turbine Circulating Cooling Systems at Thermal Power Plants] // *Teploenergetika*. 2018. No. 9. Pp. 94–102. DOI: 10.1134/S0040363618090023. EDN: XTWNGP. (In Russian)
9. *Ahmedova E.R., Tuhvatullina A.R.* Harakternye i osnovnye polomki i razrusheniya lopatok parovyh i gazovyh turbin [Characteristic and Main Failures and Fractures of Steam and Gas Turbine Blades] // *Aktualnye problemy nauki i tekhniki: sb. nauch. st. po materialam VIII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., Ufa, 15 apr. 2022 goda*. Ufa: Vestnik nauki, 2022. Pp. 22–28. EDN: FSDLWC. (In Russian)
10. RD 34.25.102-87 "Teplofikacionnyj monoblok s turbinoj T-110/120-130 i baraban-nym kotlom. Tipovaya puskovaya schema": rukovodyashchij dokument / M-vo energetiki SSSR; razrabot [RD 34.25.102-87 "Cogeneration Monoblock with T-110/120-130 Turbine and Drum Boiler. Typical Start-Up Flow Diagram"]. PO "Soyuztekhnenergo" [i dr.]. M., 1986. 32 p. (In Russian)
11. Ministerstvo energetiki Rossijskoj Federacii. Ob utverzhdenii Metodiki ocenki tekhnicheskogo sostoyaniya osnovnogo tekhnologicheskogo oborudovaniya i linij elektro-peredachi elektricheskikh stancij i elektricheskikh setej: prikaz ot 26 iyulya 2017 g. No. 676 [On the Approval of the Methodology for Assessing the Technical Condition of Main Process Equipment and Power Transmission Lines of Power Plants and Electric Grids: Order No. 676 of July 26, 2017] // *Sobranie zakonodatel'stva RF*. 2017. No. 34. St. 5266. (In Russian)
12. *Hochreiter S., Schmidhuber J.* Long Short-Term Memory // *Neural Computation*. 1997. Vol. 9, No 8. Pp. 1735–1780. DOI: 10.1162/neco.1997.9.8.1735
13. *Huang G., Liu Z., van der Maaten L., Weinberger K.Q.* Densely Connected Convolutional Networks // *arXiv preprint*. 2016. arXiv:1608.06993
14. *Ong Y.J., Qiao M., Jadav D.* Temporal Tensor Transformation Network for Multivariate Time Series Prediction // *arXiv preprint*. 2020. arXiv:2001.01051
15. *Miron S., Albizzati A., Barazzetti L., Cordellini M., Mazzotti D., Pace A., Valli G., Vitale M., Zimoch I.* The Short-Term Prediction of Length of Day Using 1D Convolutional Neural Networks // *Sensors*. 2022. Vol. 22. No 23. Article 9517. DOI: 10.3390/s22239517. EDN: EZLMVK
16. *Hyun Ju.* Universal pooling – A new pooling method for convolutional neural networks / Ju Hyun, H. Seong, E. Kim // *Expert Systems with Applications*. 2021. Vol. 180. P. 115084. DOI: 10.1016/j.eswa.2021.115084. EDN: YMOKJW

Original article submitted 17.07.2025

УДК 621.313.84

РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ РАЗМЕРОВ ДВУХРОТОРНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ С МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

Ю.В. Зубков, А.Н. Галочкин, Н.А. Тарутин¹

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

E-mail: zub577@mail.ru, galoc11111@gmail.com, nikitarutin@mail.ru

Аннотация. Гибридная силовая установка транспортного средства, как правило, содержит двигатель внутреннего сгорания (ДВС) и тяговый электрический двигатель. Силовой агрегат включает в себя одну или несколько электрических машин, соединенных с ДВС и/или колесами. Наиболее развитые возможности использования преимуществ ДВС и электрической машины имеют подключаемые гибриды. Одной из схем организации архитектуры привода гибридного ТС является схема разделения мощности, которая позволяет объединить функции тягового электрического двигателя и редуктора в одном устройстве, называемом электромеханическим вариатором (ЭМВ) и состоящим из электрической машины и дифференциального редуктора. Электрическая часть ЭМВ представляет собой электрическую машину двойного питания с промежуточным ротором. Создание комбинированного силового агрегата требует разработки интегрального подхода к проектированию ДВС, ЭМВ и его электрической части – машины двойного питания. Первичный дизайн электрической машины заключается в определении ее главных размеров, к которым применительно к ЭМВ относятся диаметр расточки статора, диаметр внутреннего ротора, активная длина сердечников статора и роторов (среднего и внутреннего). Задача определения главных размеров ЭМВ разделена на два этапа. На первом исходя из требуемого момента находится необходимый объем постоянных магнитов при их поверхностной компоновке на среднем роторе. Второй этап предполагает непосредственно определение конфигурации электрической части вариатора с учетом сложения электромагнитных моментов внешней и внутренней электрических машин посредством дифференциального редуктора. Получены аналитические выражения для определения объема постоянных магнитов, коэффициента разделения момента между двумя электрическими машинами, длины активной части вариатора. Разработан и апробирован алгоритм определения объема ПМ и основных размеров ЭМВ, который может быть использован в дальнейшем в оптимизационных расчетах.



© Автор(ы), 2025

¹ Юрий Валентинович Зубков, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электроснабжения промышленных предприятий.

Александр Николаевич Галочкин, аспирант кафедры электроснабжения промышленных предприятий.

Никита Алексеевич Тарутин, аспирант кафедры электроснабжения промышленных предприятий.

Ключевые слова: *электромеханический вариатор, двухроторная электрическая машина, главные размеры.*

Введение

Использование автомобилей с гибридной силовой установкой, совмещающей двигатель внутреннего сгорания (ДВС) и электрический двигатель, становится все более распространенным благодаря таким преимуществам, как меньший экологический ущерб, гибкость процесса преобразования первичной энергии и передачи крутящего момента на колеса автомобиля, возможность выключения ДВС в периоды остановки или движения в городском цикле, применение ДВС меньшей мощности, работающего в наиболее эффективном режиме [1]. Силовой агрегат гибридного автомобиля включают в себя одну или несколько электрических машин, соединенных с ДВС и/или колесами [2, 3].

Классификация современных транспортных средств (ТС), которая основана на соотношении размеров ДВС и электрической машины (ЭМ), показана на рис. 1. В соответствии с ней наиболее развитые возможности использования преимуществ ДВС и ЭМ имеют подключаемые гибриды.

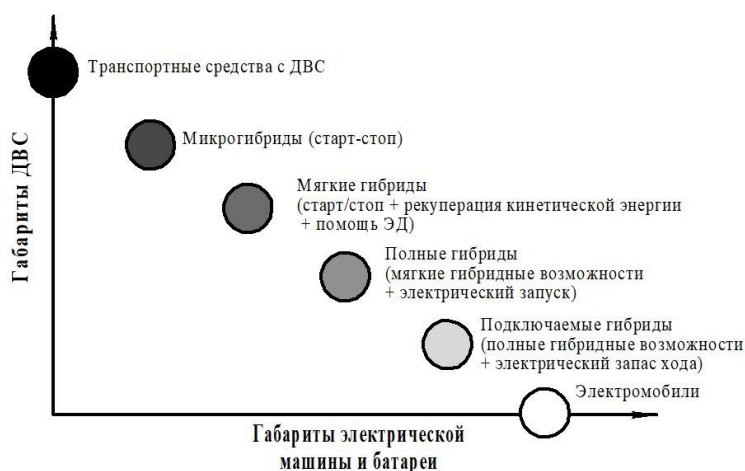


Рис. 1. Спектр транспортных технологий

В автомобилях только с ДВС крутящий момент, приводящий в движение транспортное средство, создается двигателем или механическими тормозами, и существует однозначная связь между крутящим моментом на колесах и моментом, развиваемым двигателем (положительным) или тормозами (отрицательным). Подключаемые гибридные электромобили – это транспортные средства, использующие перезаряжаемые от внешнего источника питания батареи. Они обладают характеристиками как полных гибридных электромобилей, имеющих электродвигатель и ДВС, так и полностью электрических транспортных средств, имеющих канал для подключения к электросети.

Архитектуру силовых агрегатов гибридных ТС разделяют следующим образом [4]:

– последовательная, когда ДВС приводит в действие генератор, вырабатывающий электроэнергию, которая может быть суммирована с электроэнергией, поступающей от аккумуляторов, а затем передана через электрическую шину на электродвигатель, приводящий в движение колеса;

– параллельная, при которой суммирование мощности является механическим, а не электрическим. ДВС и ЭМ (одна или несколько) соединены с помощью зубчатой передачи, цепи или ремня таким образом, что их крутящий момент суммируется и затем передается на колеса;

– разделение мощности. ДВС и две электрические машины подключены к устройству разделения мощности (например, планетарная передача) таким образом, что мощность от ДВС и ЭМ может быть объединена как через механический, так и через электрический канал. Такая архитектура позволяет реализовать преимущества последовательной и параллельной схем.

Во всех случаях организации силового привода скорость ДВС и ЭМ механически связана через трансмиссию со скоростью ТС. Это предполагает наличие сухого сцепления, гидродинамического преобразователя крутящего момента или механического вариатора, установленных между силовым приводом и трансмиссией для изменения передаточного отношения трансмиссии. Достоинства и недостатки указанных механических и автоматических преобразователей крутящего момента хорошо известны и не являются предметом исследования данной статьи. Следует только заметить, что коробка передач любого типа является одним из проблемных узлов ТС. Схема разделения мощности в гибридном автомобиле позволяет объединить функции тягового электрического двигателя и редуктора в одном устройстве, которое называется электромеханическим вариатором [5–8].

Электромеханический вариатор (ЭМВ) состоит из электрической машины и дифференциального редуктора. Тяговая электрическая часть ЭМВ представляет собой машину двойного питания (МДП) [9] с промежуточным ротором, поперечное сечение которой показано на рис. 2.

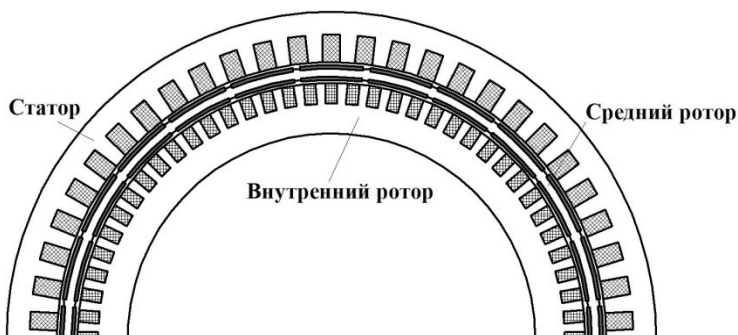


Рис. 2. Конструкция электрической части ЭМВ

Электромеханический вариатор имеет несколько режимов работы:

– принудительное вращение входного вала для запуска ДВС (режим стартера);

– при движении ТС на низкой скорости требуется меньше энергии, чем вырабатывает ДВС при максимальной топливной эффективности. Часть невостребованной энергии может запасаться в батареях для последующего использования при резких ускорениях либо движения на электрической тяге. Электромеханический преобразователь вариатора работает при этом в режиме генератора;

– при движении ТС на высокой скорости потоки мощности от ДВС и ЭМВ, работающего в режиме тягового электрического двигателя, суммируются и

передаются посредством встроенного в ЭМВ дифференциального редуктора на колеса ТС;

– движение на электрической тяге. Здесь внешняя ЭМ работает в режиме электрического двигателя, передавая крутящий момент на колеса ТС, ДВС заглушен.

Постановка задачи

Создание комбинированного силового агрегата для привода ТС требует разработки интегрального подхода к проектированию ДВС, ЭМВ и его электрической части – машины двойного питания. Из всех режимов перемещения автомобиля наиболее энергозатратным является движение на высокой скорости, поэтому при проектировании электромеханического преобразователя необходимо базироваться на данных о моменте и скорости для этого режима эксплуатации с учетом габаритных и весовых ограничений на силовой привод конкретного ТС.

Первичный дизайн любой электрической машины заключается в определении ее главных размеров, к которым применительно к ЭМВ относятся диаметр расточки статора, диаметр внутреннего ротора, активная длина сердечников статора и роторов (среднего и внутреннего). Кроме этого, для ЭМВ большое значение имеют габариты среднего ротора, обеспечивающего магнитоэлектрическое возбуждение обоих электромеханических преобразователей (внешнего и внутреннего). Поэтому задача определения главных размеров ЭМВ разделена на два этапа. На первом исходя из требуемой мощности находится необходимый объем постоянных магнитов при принятой их конфигурации на среднем роторе. Второй этап предполагает непосредственно определение геометрии активной части вариатора. Эти два этапа взаимосвязаны и реализуются за несколько итерационных циклов, так как компоновка и размещение ПМ в среднем роторе предполагают знание его внешнего и внутреннего диаметров.

Расчет объема постоянных магнитов

ЭМ с возбуждением от ПМ разделяются по способам размещения магнитов в сердечнике индуктора, который в нашем случае является средним ротором. В типовых приложениях наибольшее применение нашли конструкции индуктора с расположением ПМ на внешней или внутренней поверхностях индуктора (SPM) и с размещением ПМ в теле индуктора (IPM) [10–12]. Варианты расположения ПМ в индукторе ЭМВ показаны на рис. 3.

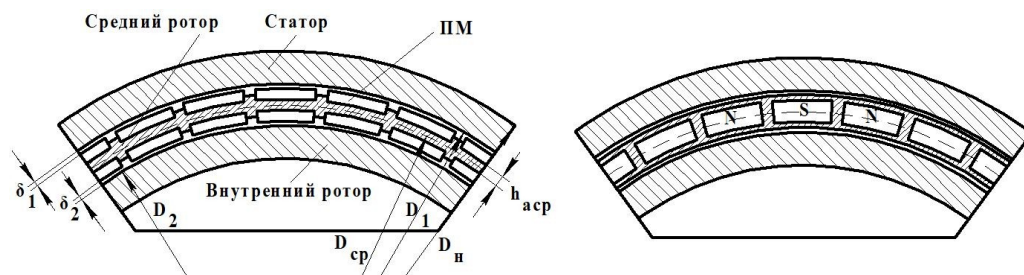


Рис. 3. SPM и IPM варианты исполнения индуктора

Ввиду малой толщины среднего ротора размещение ПМ внутри сердечника проблематично из-за высокого рассеяния магнитного потока, уменьшить которое

с помощью мостиков насыщения, не ослабляя механическую прочность ротора, не представляется возможным. Поэтому при расчетах за базовую была принята SPM-конструкция. Для определения энергетических параметров индуктора было проведено численное моделирование магнитного поля. Полагалось, что неодимовые ПМ *N38UH*, принятые в качестве источников поля, обладают остаточной индукцией $B_r = 1,15$ Тл и коэрцитивной силой $H_c = 750 \frac{\text{kA}}{\text{м}}$ при температуре 100°C

[13]. Сердечники статора и внутреннего ротора – беспазовые. Зазоры в первой ЭМ (статор – средний ротор) и во второй (средний ротор – внутренний ротор) одинаковы и равны 1 мм. Число пар полюсов $p = 12$.

В ходе моделирования были найдены: распределение магнитного поля в зазорах, коэффициенты поля – расчетные коэффициенты полюсного перекрытия $\alpha_{\delta 1}$, $\alpha_{\delta 2}$ и коэффициенты формы поля k_{B1} , k_{B2} , коэффициент рассеяния k_{σ} . Результаты моделирования сведены в табл. 1.

Таблица 1

Энергетические параметры индуктора

Модель	Максимальная индукция в зазоре, Тл		Расчетный коэффициент полюсного перекрытия		Коэффициент формы поля		Коэффициент рассеяния	
	$B_{\delta m1}$	$B_{\delta m2}$	$\alpha_{\delta 1}$	$\alpha_{\delta 2}$	k_{B1}	k_{B2}	$k_{\sigma 1}$	$k_{\sigma 2}$
SPM	0,569	0,544	0,877	0,881	1,005	1,000	1,049	1,065

Толщина среднего ротора (индуктора) складывается из высоты двух ПМ и спинки:

$$h_{cp.p} = h_{nm1} + h_{nm2} + h_{ap}. \quad (1)$$

Высота спинки среднего ротора выбирается из условия обеспечения механической прочности обода, определение которой является предметом отдельного исследования. Высота внутреннего и внешнего магнитов является функцией материала ПМ, величины электромагнитного момента, скорости вращения ротора и рабочей температуры. Магнитный поток во внешнем δ_1 и внутреннем δ_2 зазорах создается суммарным действием магнитов ПМ1 и ПМ2. Эти магниты могут не только иметь разную высоту, но и выполняться из разных материалов. Сумма высот магнитов $h_{nm} = h_{nm1} + h_{nm2}$ может быть найдена из выражения

$$h_{nm} = \frac{V_{nm}}{b_{nm} \cdot l_{\delta} \cdot 2p}, \quad (2)$$

где V_{nm} – объем всех ПМ; b_{nm} – средняя ширина ПМ; l_{δ} – длина зазора (активная длина сердечников); p – число пар полюсов.

Зная средний диаметр, можно определить ширину ПМ:

$$b_{nm} = \frac{\pi D_{cp}}{2p} \alpha_k, \quad (3)$$

где α_k – конструктивный коэффициент полюсного перекрытия (принят 0,9).

Средний диаметр ротора на начальном этапе полагаем равным

$$D_{cp} = D_1 - h_{cp.p}.$$

Толщина среднего ротора на начальном этапе может быть принята равной 1 см.

Длина зазора задается исходя из соотношения

$$l_{\delta} = \lambda D,$$

где $\lambda = 0,8 \dots 1,2$ – относительная длина [14].

Объем магнитов одного полюса пропорционален величине электромагнитного момента ЭМВ и обратно пропорционален квадрату числа пар полюсов:

$$V_{nm} = \frac{\pi \cdot C_V M_{\Delta}}{p^2 B_r H_c}, \quad (4)$$

где C_V – объемный коэффициент постоянного магнита.

Величина этого коэффициента определяется выражением [15]

$$C_V = \frac{2k_p k_f k_{ad} (1 + k_{E0})}{\pi^2 \xi}, \quad (5)$$

где k_f – коэффициент формы поля возбуждения; k_{ad} – коэффициент формы поля продольной реакции якоря; k_{E0} – коэффициент ЭДС в режиме перевозбуждения; k_p – коэффициент перегрузочной способности; ξ – коэффициент использования ПМ, являющийся функцией ЭДС холостого хода и тока короткого замыкания в режиме генератора.

Анализ диапазона изменения коэффициента C_V на основе эмпирических данных синхронных электрических машин с магнитоэлектрическим возбуждением соизмеримой с ЭМВ мощностью показал, что его величина при использовании высококоэрцитивных ПМ марок *NdFeB* находится в пределах $1,67 \dots 1,99$.

В соответствии с предложенной методикой были рассчитаны размеры ПМ для ЭМВ, развивающего электромагнитный момент 150 Нм при частоте вращения среднего ротора 3200 об/мин. Суммарная толщина магнитов полюса составила 1,6 мм. Далее для валидации аналитической методики была решена магнитостатическая задача расчета магнитного поля ЭМВ средствами Ansys Maxwell. Распределение индукции в зазорах ЭМВ в пределах одного полюсного деления показано на рис. 4.

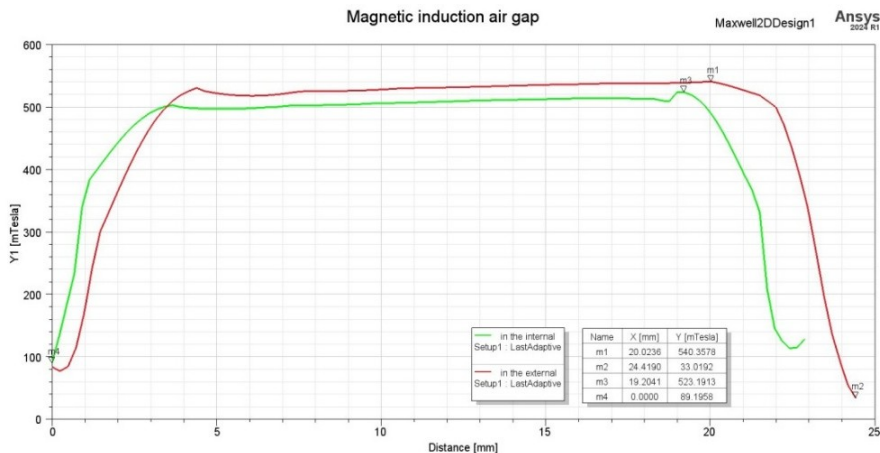


Рис. 4. Распределение индукции в зазоре внешней и внутренней ЭМ

Максимальная индукция на оси полюса в зазоре внешней и внутренней ЭМ составила 0,540 и 0,523 Тл соответственно.

Определение главных размеров

К главным размерам синхронных электрических машин относят диаметр расточки статора, длину зазора (активной части), величину зазора между индуктором и якорем. Для ЭМВ необходимо определить D_1 – диаметр расточки статора; D_2 – наружный диаметр внутреннего ротора; l_δ – длину зазора (этот параметр одинаков в обеих ЭМ). Величина зазора на начальном этапе может быть принята равной для внешней и внутренней машин.

Электромагнитный момент ЭМВ создается совместным действием моментов внешней и внутренней электрических машин и является результатом их суммирования с помощью дифференциального редуктора:

$$M_\Sigma = M_1 + M_2.$$

Электромагнитные моменты внешней и внутренней машин:

$$\begin{aligned} M_1 &= 0,5\pi\alpha_{\delta 1}k_{B1}k_{o\delta 1}A_1B_{\delta 1}D_1^2l_\delta; \\ M_2 &= 0,5\pi\alpha_{\delta 2}k_{B2}k_{o\delta 2}A_2B_{\delta 2}D_2^2l_\delta, \end{aligned} \quad (6)$$

где $k_{o\delta 1} \approx k_{o\delta 2}$ – обмоточные коэффициенты обмоток якоря первой и второй ЭМ; A_1, A_2 – линейные токовые нагрузки якорей; $B_{\delta 1}, B_{\delta 2}$ – магнитные индукции в зазоре внешней и внутренней машин.

Обозначим через χ_1 и χ_2 произведения коэффициентов $\alpha_{\delta 1}k_{B1}k_{o\delta 1}$ и $\alpha_{\delta 2}k_{B2}k_{o\delta 2}$ соответственно.

Тогда отношение

$$k_m = \frac{\chi_1 A_1 B_{\delta 1} D_1^2}{\chi_2 A_2 B_{\delta 2} D_2^2} \quad (7)$$

есть коэффициент разделения момента между двумя электрическими машинами в ЭМВ.

Параметры χ_1 и χ_2 при равенстве обмоточных коэффициентов якорных обмоток обеих машин показывают степень влияния формы магнитного поля в зазорах на распределение суммарного электромагнитного момента между ними. Результаты моделирования, приведенные в табл. 1, показывают, что произведения коэффициентов полюсного перекрытия и формы ЭДС двух ЭМ практически одинаковы. Это указывает на идентичность качества распределения поля в зазорах обеих машин и на примерное равенство параметров χ_1 и χ_2 . В этом случае выражение (7) упрощается и с учетом отношения индукций $B_{\delta 1}$ и $B_{\delta 2}$ сводится к виду

$$k_m = 1,05 \frac{A_1 D_1^2}{A_2 D_2^2}. \quad (8)$$

Допустимые линейные токовые нагрузки первой и второй машин ограничиваются величиной теплового фактора $T = A \cdot j$ и при одинаковых плотностях токов $j_1 = j_2$ зависят от условий теплоотвода с нагретых активных элементов машин. Для внешней машины эти условия лучше, так как тепло от источников тепловыделения (потерь мощности) передается на корпус и отводится в окружающую

среду. С учетом этого можно положить $A_1 \approx 1,25 A_2$. Тогда коэффициент разделения момента

$$k_m = 1,3 \frac{D_1^2}{D_2^2}, \quad (9)$$

а длина воздушного зазора ЭМВ может быть определена по выражению

$$l_\delta = \frac{M_\Sigma}{\pi \alpha_{\delta 1} k_{B1} k_{\delta \delta} A_1 B_{\delta 1} (0,5 D_1^2 + 0,385 (D_1 - 2 h_{cp.p})^2)}. \quad (10)$$

После расчета главных размеров ЭМВ уточняется длина зазора в процедуре определения объема ПМ и габариты самих ПМ. Алгоритм аналитического определения главных размеров ЭМВ и требуемого объема ПМ для создания в зазорах электрических машин ЭМВ магнитного поля необходимой интенсивности показан на рис. 5.

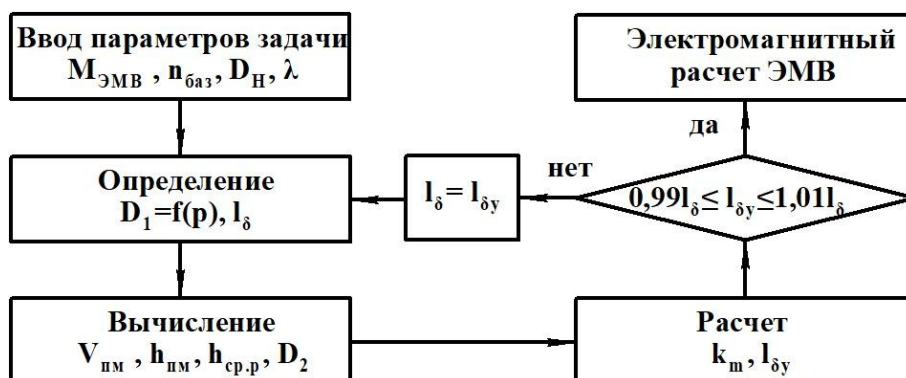


Рис. 5. Блок-схема алгоритма определения объема ПМ и основных размеров ЭМВ

В соответствии с предложенным алгоритмом был рассчитан вариант электро-механического вариатора с двумя роторами, основные параметры которого приведены в табл. 2.

Таблица 2

Параметры электро-механического вариатора

Параметр	Внешняя ЭМ	Внутренняя ЭМ
Число полюсов	24	
Диаметр якоря, мм	186	173
Немагнитный зазор, мм	1	
Длина сердечника, мм	245	
Масса ПМ, кг	1,45	

Рассмотренный алгоритм определения объема ПМ и основных размеров двух-роторной электрической машины, базирующийся на аналитической модели, позволяет получить исходные данные для эскизного проекта ЭМВ, а в дальнейшем стать основой для его параметрической оптимизации.

Заключение

1. Предложенный алгоритм эскизного проектирования двухроторного электромеханического вариатора позволяет находить его основные размеры и требуемый объем постоянных магнитов среднего ротора с учетом особенностей магнитного и механического совмещения двух электрических машин в одном преобразователе.

2. Решение магнитостатической задачи позволило вычислить коэффициенты бокового рассеяния в среднем роторе с *SPM* и *IPM* конфигурацией радиально намагниченных постоянных магнитов. Расположение ПМ на поверхности индуктора обеспечивает малое рассеяние основного магнитного потока $k_g \approx 1,06$ в отличие от IPM индуктора, где в лучшем случае при использовании мостиков насыщения удается достичь $k_g \approx 1,54$.

3. Получено выражение для определения величины коэффициента разделения моментов между внешней и внутренней электрическими машинами вариатора. В примере расчета при выбранной конфигурации индуктора его значение составило 1,27, так как внешняя машина, находясь в лучших условиях охлаждения, может брать на себя большую нагрузку.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Onori S., Serrao L., Rizzoni G.* Hybrid Electric Vehicles. Energy Management Strategies. London, Heidelberg, New York, Dordrecht: Springer, 2016. 112 p.
2. *Jose C.P., Meikandasivam S.* A Review on the Trends and Developments in Hybrid Electric Vehicles // Innovative Design and Development Practices in Aerospace and Automotive Engineering. Singapore, 2017. Pp. 211–229.
3. *Анучин А.С., Алямкин Д.И., Козаченко В.Ф., Лашкевич М.М., Остриков В.Н.* Направления развития и оптимизации систем электроприводов городского гибридного и электрического транспорта // Электротехника. 2015. № 1. С. 5–9.
4. *Бахмутов С.В., Карунин А.Л., Круташов А.В., Ломакин В.В.* Конструктивные схемы автомобилей с словыми гибридными установками. М.: МГТУ «МАМИ», 2007. 71 с. EDN: RASMUR
5. *Liu J., Quan L., Zhu X., Ding Q., Chen Yu.* Modeling and simulation of a new two-rotor doubly salient permanent magnet machine // 2011 International Conference on Electrical Machines and Systems. Beijing, China, 2011. DOI: 10.1109/ICEMS.2011.6073741
6. *Ding Q., Quan L., Zhu X., Liu J., Chen Yu.* Development of a New Two-rotor Doubly Salient Permanent Magnet Motor for Hybrid Electric Vehicles // 2011 International Conference on Electrical Machines and Systems. Beijing, China, 2011. DOI: 10.1109/ICEMS.2011.6073744
7. *Kamil K., Kamil J., Wang Q.* Optimization of Flux Switching Permanent Magnet Motor to enhance the traction of an Electric Vehicle // 2021 12th International Renewable Energy Congress (IREC). Hammamet, Tunisia, 2021. DOI: 10.1109/IREC52758.2021.9624760
8. *Eriksson S., Sadarangani C.* A four-quadrant HEV drive system // Proceedings of IEEE 56th Vehicular Technology Conference. Vancouver, BC, Canada, 2002. DOI: 10.1109/VETECF.2002.1040468
9. *Иванов-Смоленский А.В.* Электрические машины. М.: Энергия, 1980. 928 с.
10. *Зубков Ю.В., Верещагин В.Е.* Проектирование активной зоны якоря тягового двигателя // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2022. № 4 (30). С. 102–114. DOI: 10.14498/tech.2022.4.7. EDN: HCFZOU
11. *Зубков Ю.В., Кауров С.Ю., Верещагин В.Е.* Исследование работы интегрированного стартер-генератора при запуске двигателя внутреннего сгорания // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2020. № 3 (67). С. 125–138. DOI: 10.14498/tech.2020.3.8 EDN: ROQDKG
12. *Zubkov Yu.V., Vereshagin V.E.* Designing of High Speed Permanent Magnet Electric Machines with Rotor Strength Verification // 2021 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon). 2021. Pp. 414–418. DOI: 10.1109/UralCon52005.2021.9569447

13. Arnold Magnetics Technologies. 2017. URL: https://www.arnoldmagnetics.com/wp-content/uploads/2017/10/Arnold_DS-RECOMA35E_FINAL6-1.pdf (accessed: 10.11.2024).
14. Копылов И.П., Горяинов Ф.А., Клоков Б.К. [и др.]. Проектирование электрических машин: учеб. пособие для вузов. Под ред. И.П. Копылова. М.: Энергия, 1980. 496 с.
15. Осин И.Л., Колесников В.П., Юферов Ф.М. Синхронные микродвигатели с постоянными магнитами. М.: Энергия, 1976. 232 с.

Статья поступила в редакцию 19.07.2025

CALCULATION OF THE TWO-ROTOR BASIC DIMENSIONS ELECTRIC MACHINE WITH MAGNETOELECTRIC EXCITATION

Yu.V. Zubkov, A.N. Galochkin, N.A. Tarutin¹

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

E-mail: zub577@mail.ru, galoc11111@gmail.com, nikitarutin@mail.ru

Abstract. A hybrid vehicle powertrain typically includes an internal combustion engine (ICE) and an electric traction motor. The powertrain includes one or more electric machines connected to the ICE and/or wheels. The most developed possibilities for using the advantages of an internal combustion engine and an electric machine are plug-in hybrids. One of the schemes for organizing the architecture of a hybrid vehicle drive is a power-sharing scheme, which allows combining the functions of a traction electric motor and a gearbox in a single device called an electromechanical variator (EMV) and consisting of an electric machine and a differential gearbox. The electrical part of the EMV is a double-fed electric machine with an intermediate rotor. The combined power unit requires creation the development of an integrated approach to the design of the internal combustion engine, the EMV and its electrical part – the dual-power machine. The primary design of an electric machine consists of determining its main dimensions, which, in relation to the EMV, include the stator bore diameter, the inner rotor diameter, the stator cores and rotors (middle and inner) active length. The task of EMV determining the main dimensions is divided into two stages. At the first, based on the required moment, the required volume of permanent magnets is found with their surface arrangement on the middle rotor. The second stage involves directly determining the variator electrical part configuration, taking into account the addition of the external and internal electrical machines electromagnetic moments by means of a differential reducer. Analytical expressions for determining the permanent magnets volume, the torque division coefficient between two electric machines, and the length of the variator active part are obtained. An algorithm for determining the PM volume and the EMV main dimensions has been developed and tested, which can be used in future optimization calculations.

Keywords: electromechanical variator, two-rotor electric machine, main dimensions.

REFERENCES

1. Onori S., Serrao L., Rizzoni G. Hybrid Electric Vehicles. Energy Management Strategies. London, Heidelberg, New York, Dordrecht: Springer, 2016. 112 p.
2. Jose C.P., Meikandasivam S. A Review on the Trends and Developments in Hybrid Electric Vehicles // Innovative Design and Development Practices in Aerospace and Automotive Engineering. Singapore, 2017. Pp. 211–229.



© The Author(s), 2025

¹ Yury V. Zubkov (Dr. Sci. (Techn.)), Professor, Head Dept. of Industrial Power Supply.
Alexander N. Galochkin, Postgraduate Student Dept. of Industrial Power Supply.
Nikita A. Tarutin, Postgraduate Student Dept. of Industrial Power Supply.

3. *Anuchin A.S., Alyamkin D.I., Kozachenko V.F., Lashkevich M.M., Ostrikov V.N.* Napravleniya razvitiya i optimizacii sistem elektroprivodov gorodskogo gibridnogo i elektricheskogo transporta [Development and optimization directions for electric drive systems of urban hybrid and electric transport] // *Elektrotehnika*. 2015. No. 1. Pp. 5–9. (In Russian)
4. *Bahmutov S.V., Karunin A.L., Krutashov A.V., Lomakin V.V.* Konstruktivnye skhemy avtomobilej s silovymi gibridnymi ustanovkami [Structural layouts of vehicles with power hybrid units]. M.: MGTU «MAMI», 2007. 71 p. (In Russian)
5. *Liu J., Quan L., Zhu X., Ding Q., Chen Yu.* Modeling and simulation of a new two-rotor doubly salient permanent magnet machine // 2011 International Conference on Electrical Machines and Systems. Beijing, China, 2011. DOI: 10.1109/ICEMS.2011.6073741
6. *Ding Q., Quan L., Zhu X., Liu J., Chen Yu.* Development of a New Two-rotor Doubly Salient Permanent Magnet Motor for Hybrid Electric Vehicles // 2011 International Conference on Electrical Machines and Systems. Beijing, China, 2011. DOI: 10.1109/ICEMS.2011.6073744
7. *Kamil K., Kamil J., Wang Q.* Optimization of Flux Switching Permanent Magnet Motor to enhance the traction of an Electric Vehicle // 2021 12th International Renewable Energy Congress (IREC). Hammamet, Tunisia, 2021. DOI: 10.1109/IREC52758.2021.9624760
8. *Eriksson S., Sadarangani C.* A four-quadrant HEV drive system // Proceedings of IEEE 56th Vehicular Technology Conference. Vancouver, BC, Canada, 2002. DOI: 10.1109/VETECF.2002.1040468
9. *Ivanov-Smolenskij A.V.* Elektricheskie mashiny [Electrical machines]. M.: Energiya, 1980. 928 p. (In Russian)
10. *Zubkov Yu.V., Vereshchagin V.E.* Proektirovanie aktivnoj zony yakorya tyagovogo dvigatelya [Design of the traction motor armature active zone] // *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki*. 2022. No. 4 (30). Pp. 102–114. DOI: 10.14498/tech.2022.4.7. (In Russian)
11. *Zubkov Yu.V., Kaurov S.Yu., Vereshchagin V.E.* Issledovanie raboty integrirovannogo starter-generatora pri zapuske dvigatelya vnutrennego sgoraniya [Study of the integrated starter-generator operation during internal combustion engine starting] // *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki*. 2020. No. 3 (67). Pp. 125–138. DOI: 10.14498/tech.2020.3.8. (In Russian)
12. *Zubkov Yu.V., Vereshagin V.E.* Designing of High Speed Permanent Magnet Electric Machines with Rotor Strength Verification // 2021 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon). 2021. Pp. 414–418. DOI: 10.1109/UralCon52005.2021.9569447
13. Arnold Magnetics Technologies. 2017. URL: https://www.arnoldmagnetics.com/wp-content/uploads/2017/10/Arnold_DS-RECOMA35E_FINAL6-1.pdf (accessed: 10.11.2024).
14. *Kopylov I.P., Goryainov F.A., Klovov B.K. [i dr.]* Proektirovanie elektricheskikh mashin [Electrical machines: textbook for universities]: ucheb. posobie dlya vuzov. Pod red. I.P. Kopylova. M.: Energiya, 1980. 496 p. (In Russian)
15. *Osin I.L., Kolesnikov V.P., Yuferov F.M.* Sinhronnye mikrodvigateli s postoyannymi magnitami [Synchronous micromotors with permanent magnets]. M.: Energiya, 1976. 232 p.

Original article submitted 19.07.2025

УДК 621.316.11

ПРИНЦИПЫ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ ЗАРЯДКИ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ ОТ ЭЛЕКТРОЗАРЯДНЫХ СТАНЦИЙ, ИНТЕГРИРОВАННЫХ В ДЕЙСТВУЮЩИЕ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ОБЩЕСТВЕННЫХ ЗДАНИЙ И МНОГОКВАРТИРНЫХ ЖИЛЫХ ДОМОВ

Л.К. Осика¹

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

E-mail: osikalk@yandex.ru

Аннотация. Рассматриваются рыночные и технологические возможности решения проблемы обеспечения легковых автомобилей электрозаправочным сервисом с помощью установки электрозарядных станций в уже построенных и эксплуатируемых многоквартирных жилых домах и общественных зданиях. Анализируется способ определения располагаемой мощности зарядки в зависимости от договорных ограничений на розничном рынке электроэнергии (мощности) и схемно-режимных условий в точке подключения станции к системе электроснабжения. Разработаны стратегии и принципы алгоритмизирования технологического управления зарядкой автомобилей в условиях дефицита мощности. Сделан вывод, что прогноз располагаемой мощности зарядки целесообразно осуществлять с помощью одного из алгоритмов, основанных на теории искусственных нейронных сетей, с обучающей информацией в виде ретроспективных временных рядов нагрузки системы электроснабжения, внешних погодных условий и наличия (отсутствия) централизованного отопления и горячего водоснабжения. Хорошие перспективы имеют также эвристические методы прогноза.

Ключевые слова: электромобиль, электрозаправочная станция, многоквартирный дом, общественное здание, система электроснабжения, время зарядки электромобиля, скорость зарядки электромобиля, располагаемая мощность для зарядки электромобиля, интеллектуальный прибор учета, погрешность измерения электроэнергии.

Введение

В связи с увеличением парка легковых автомобилей (ЛЭМ) возникают проблемы обеспечения их доступной зарядной инфраструктурой. В ряде случаев ограничения, накладываемые такой инфраструктурой, в том числе в отношении свободы перемещения, могут служить отрицательными факторами при анализе потенциальными покупателями целесообразности покупки ЛЭМ.



© Автор(ы), 2025

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

Помимо стоимости собственно электрозарядного сервиса, зависящего как от цены на электроэнергию, так и от цены электрозарядной станции (ЭЗС) и затрат на ее эксплуатацию, большое значение имеет также месторасположение ЭЗС, которое должно отвечать требованиям ГОСТ Р МЭК 61851-1-2013¹ и ГОСТ Р 50571.7.722-2017/МЭК 60364-7-722:2015².

Не вызывает сомнений, что наиболее привлекательной для владельцев ЛЭМ является установка ЭЗС непосредственно в местах парковки, и данное обстоятельство служит основным преимуществом ЛЭМ перед автомобилями на органическом топливе. Это связано с заправкой последних только на автозаправочных станциях (АЗС), которые могут располагаться вдали от оптимальных маршрутов автомобилистов, с простаиванием в очередях на АЗС и с дополнительными затратами времени и средств, обусловленными особенностями услуги наполнения баков органическим топливом.

Обычно владелец ЛЭМ паркует его в месте своего проживания и вблизи места работы. В мегаполисах местом проживания подавляющего числа жителей являются многоквартирные жилые дома (МКД), а местом работы – общественные (офисные) здания (ОЗ). Кроме того, актуальны парковки с заправочным сервисом вблизи ресторанов, торгово-развлекательных центров и других зданий похожего назначения. Расположение парковки и заправки ЛЭМ вблизи последних, а также вблизи промышленных предприятий в данной статье не рассматривается ввиду меньших ограничений по располагаемой мощности систем электроснабжения таких ЭЗС.

Очевидно, потребитель услуги по зарядке ЛЭМ в МКД (ОЗ) желает и должен получать ее по принципу plug and play («подключись и пользуйся»). Это возможно только при определенных структурных свойствах самой внутренней системы электроснабжения (СЭС) здания³ и финансово-технологических условиях работы соответствующего юридического лица на розничном рынке электроэнергии (мощности) (РРЭМ), определяемых договором с гарантирующим поставщиком (ГП) или с энергосбытовой организацией (ЭСО), и в ряде случаев также договором с электросетевой компанией⁴.

Наилучшим решением проблемы было бы проектирование ЭЗС непосредственно при разработке проектной и рабочей документации строительства МКД или ОЗ (далее – объектов) с учетом расчетной мощности станций в составе СЭС, являющейся одной из систем инженерно-технического обеспечения объекта капитального строительства. При этом следует исходить из динамики роста парка ЛЭМ в городе и среднего ожидаемого числа подключаемых ЛЭМ на конкретном объекте, что требует введения региональных нормативов, регламентирующих

¹ ГОСТ Р МЭК 61851-1-2013. Система токопроводящей зарядки электромобилей. Часть 1. Общие требования.

² ГОСТ Р 50571.7.722-2017/МЭК 60364-7-722:2015. Электроустановки низковольтные. Часть 7-722. Требования к специальным электроустановкам или местам их расположения. Источники питания для электромобилей.

³ Терминология принята по ГОСТ Р 56536-2015. Услуги жилищно-коммунального хозяйства и управления многоквартирными домами. Услуги содержания внутридомовых систем электроснабжения многоквартирных домов. Общие требования.

⁴ В соответствии с Постановлением Правительства РФ от 04.05.2012 № 442 «О функционировании розничных рынков электрической энергии, полном и (или) частичном ограничении режима потребления электрической энергии» (ПП № 442).

мощность первоначально устанавливаемой ЭЗС с некоторым расчетным запасом для ее расширения.

Однако в отсутствие такой практики и при наличии подходящих помещений во множестве существующих МКД и ОЗ приходится принимать паллиативные решения по установке электрозаправочного оборудования на объектах, зависящие от многих специфических факторов (ограничений) и требующие зачастую решения достаточно сложных задач управления процессами зарядки ЛЭМ.

Целью данной статьи является исследование вышеупомянутых факторов и подходов к их учету, а также формулировка принципов решения проблемы зарядки ЛЭМ в существующих СЭС, в составе которых ЭЗС не были предусмотрены первоначальными проектами.

Данные принципы охватывают следующие области:

- рыночно-договорные отношения;
- технические особенности существующих СЭС в МКД и ОЗ;
- прогноз нагрузки СЭС и возможности подключения ЛЭМ с аккумуляторами различных типов;
- информационное обеспечение прогноза, включая метрологические проблемы, связанные с применяемыми средствами измерения активной мощности;
- система двухуровневую управления зарядкой ЛЭМ.

Общие сведения об ЭЗС, доступных для установки в МКД и ОЗ

Как известно [1], существует три основных типа устройств зарядки электромобилей – быстрая/сверхбыстрая, средняя и медленная (по европейской и североамериканской терминологии). Они различаются выходной мощностью (в кВт) и, следовательно, скоростью зарядки, доступной для конкретного ЛЭМ. Для каждого типа ЭЗС предусмотрен соответствующий набор разъемов [1] согласно выбранному стандарту, предназначенных для использования с малой или большой мощностью, включая разъемы для зарядки переменным или постоянным током¹. В настоящее время ЭЗС всех типов либо выпускаются электротехнической промышленностью России, либо доступны для импорта из Китая и других стран.

Мощность устройства определяет собой также максимально доступную скорость зарядки, в то же время автоматика ЛЭМ будет снижать скорость зарядки по мере того, как его аккумуляторная батарея (АБ) приближается к полному заряду. В технической документации часто указывается время зарядки до 80 % емкости АБ ЛЭМ, после чего скорость зарядки значительно снижается. На практике потребители также заряжают ЛЭМ максимум до 80 % емкости АБ.

ЭЗС быстрой и сверхбыстрой скорости зарядки (Rapid) обеспечивают:

- быструю зарядку мощностью 50 кВт на постоянном токе или мощностью 40 кВт и более на переменном токе на одном из возможных типов разъемов выбранного стандарта;

¹ ГК «Россети». СТО 34.01-8.1-001-2021. Электрозарядные станции для электромобилей. Общие технические требования на электрозарядные станции постоянного тока. См. также международные стандарты: IEC 61851-23:2023. Electric vehicle conductive charging system – Part 23: DC electric vehicle supply equipment; IEC 61851-24:2023. Electric vehicle conductive charging system – Part 24: Digital communication between a DC EV supply equipment and an electric vehicle for control of DC charging.

– сверхбыструю зарядку постоянным током мощностью 100 кВт и более (в настоящее время до 350 кВт) на одном из возможных типов разъемов выбранного стандарта.

В зависимости от модели ЛЭМ можно зарядить до 80 % всего за 20 мин, хотя в среднем новый ЛЭМ требует для завершения процесса около часа при применении быстрой зарядки мощностью 50 кВт.

Сверхбыстрые зарядные устройства постоянного тока обеспечивают мощность зарядки 100 кВт и более. Обычный ряд мощностей – 100 кВт, 150 кВт или 350 кВт, хотя возможны и другие значения номинальной мощности (скорости зарядки) между этими значениями. При мощности ЭЗС 100 кВт время зарядки составляет 20–40 мин даже при большой емкости АБ.

ЭЗС средней скорости зарядки (Fast) обеспечивают:

– зарядку мощностью, как правило, 7 или 22 кВт на одном из возможных типов разъемов выбранного стандарта;

– зарядку мощностью 11 кВт для ЛЭМ марки Tesla Destination.

Подавляющее большинство быстрых зарядных устройств предназначены для зарядки переменным током, хотя в некоторых сетях устанавливаются зарядные устройства постоянного тока мощностью 25 кВт с разъемами стандартов CCS или CHAdeMO.

Время зарядки ЛЭМ зависит от допустимой скорости зарядки (мощности) ЭЗС и ЛЭМ. Так, ЭЗС мощностью 7 кВт зарядит ЛЭМ с АБ емкостью 40 кВт·ч за 4–6 часов, а зарядное устройство мощностью 22 кВт – за 1–2 часа. Скорость зарядки при использовании быстрого зарядного устройства будет зависеть от бортового зарядного устройства ЛЭМ, при этом не все модели могут принимать мощность 7 кВт или более.

Среднескоростные ЭЗС, как правило, устанавливаются на автостоянках супермаркетов или развлекательных центров, где ЛЭМ чаще всего паркуются в течение часа или более.

ЭЗС медленной скорости зарядки (Slow) имеют мощность устройства 3–6 кВт на одном из допустимых типов разъемов выбранного стандарта.

Медленная зарядка осуществляется от устройств мощностью от 2,3 кВт до 6 кВт, причем наиболее распространенные медленные ЭЗС рассчитаны на 3,6 кВт (16 А). Встречаются ЭЗС и номинальной мощностью 3 кВт, а также 5,5 кВт (сопряженные с электрическими цепями опор освещения).

Время зарядки зависит от зарядного устройства и заряжаемого ЛЭМ. Полная зарядка устройства мощностью 3 кВт обычно занимает от 6 до 12 часов. Медленная зарядка – очень распространенный вид зарядки ЛЭМ, припаркованных на автостоянках в течение ночи или в течение рабочего дня. Поэтому следует ожидать их широкого распространения в СЭС МКД и ОЗ.

Следует принять во внимание, что предлагаемые в настоящее время на рынке ЭЗС конструктивно выполнены так, что к ним предусмотрено подключение как одного, так и нескольких ЛЭМ. Шкафы с оборудованием для зарядки выпускаются производителями настенного или напольного исполнения. В МКД и ОЗ в общем случае могут быть установлены несколько конструктивно независимых ЭЗС (шкафов). Как правило, вводные устройства СЭС, их кабели и шины спроектированы с некоторым запасом по мощности, вполне достаточном для оказания услуг по зарядке ЛЭМ при нынешней ситуации с их числом, приходящимся в среднем на один МКД (на одно ОЗ).

Рыночно-договорные ограничения при зарядке ЛЭМ в СЭС МКД и ОЗ

В настоящее время с данными ограничениями наиболее часто сталкиваются предприниматели, организующие бизнес по заправке ЛЭМ в МКД и ОЗ. Это происходит потому, что успешность их деятельности определяется имеющимися возможностями покупки электрической энергии (мощности) собственником здания на розничном рынке электроэнергии и мощности (РРЭМ) в объеме, достаточном для обеспечения электрической энергией (мощностью) текущей нагрузки (без учета потребления ЛЭМ), а также дополнительной нагрузки заряжающихся ЛЭМ в течение всего необходимого времени зарядки.

При этом в данной статье предполагается, что максимальная мощность энергопринимающих устройств $P_{\text{МД}}$, указанная в договоре на технологическое присоединение объекта, не изменяется при установке ЭЗС, то есть новая процедура технологического присоединения согласно действующему законодательству¹ не требуется. Также предполагается, что не изменяются условия договора купли-продажи (энергоснабжения) в части оплаты поставляемой ЭСО электрической энергии и мощности и договора оказания услуг по передаче электроэнергии (в случае его наличия)².

Корректность такого допущения обуславливается невысокой долей требуемой мощности ЭЗС относительно $P_{\text{МД}}$, во всяком случае в настоящее время, когда число ЛЭМ в МКД составляет в лучшем случае несколько единиц. Кроме того, коэффициенты неравномерности и заполнения суточного графика нагрузки МКД достаточно низки, а потребление объекта в ночные часы позволяет потенциально подключать к СЭС зарядные устройства мощностью до 80–85 % $P_{\text{МД}}$ ³.

Очевидно, рыночно-договорные ограничения исчезают, если договоры на поставку электроэнергии (мощности) и договоры на оказание услуг электросетевой компании уже учитывают наличие потребления электроустановок ЭЗС в полном объеме. Тем не менее эти ограничения появляются при расширении бизнеса по оказанию услуг зарядки ЛЭМ и сопутствующем увеличении числа и мощности конструктивно несвязанных ЭЗС.

Собственнику МКД (ОЗ) и владельцу ЭЗС необходимо иметь в виду, что при расчетах за потребленную электроэнергию по 3–6-й ценовым категориям (ПП № 442) фактический объем мощности, поставленной в расчетном периоде ГП, определяется как среднее арифметическое значение фактических почасовых

¹ Постановление Правительства РФ от 27.12.2004 N 861 «Об утверждении Правил недискриминационного доступа к услугам по передаче электрической энергии и оказания этих услуг, Правил недискриминационного доступа к услугам по оперативно-диспетчерскому управлению в электроэнергетике и оказания этих услуг, Правил недискриминационного доступа к услугам коммерческого оператора оптового рынка и оказания этих услуг и Правил технологического присоединения энергопринимающих устройств потребителей электрической энергии, объектов по производству электрической энергии, а также объектов электросетевого хозяйства, принадлежащих сетевым организациям и иным лицам, к электрическим сетям» (далее – ПП № 861).

² В договоре на оказание услуг электросетевой организацией также указывается величина максимальной мощности электропринимающих устройств $P_{\text{МД}}$.

³ ДГП 18-05-Р. Методика расчета электрических нагрузок многоквартирных домов / Утверждена заместителем Мэра Москвы в Правительстве Москвы по вопросам градостроительной политики и строительства А.Ю. Бочкаревым 30 декабря 2020 г. (URL: <https://mtsk.mos.ru/documents/42807/>).

объемов электрической энергии, поставленной в рабочие дни в часы пиковой нагрузки, что определяется коммерческим оператором оптового рынка в отношении этого ГП. Расчеты за потребленную мощность с ЭСО осуществляются согласно заключенному с этой организацией договору, в котором также будут указаны часы пиковой нагрузки. Отсюда следует необходимость снижения среднечасовых мощностей в контрольные часы, в том числе и за счет уменьшения объема оказываемых услуг по зарядке ЛЭМ.

Технические ограничения при зарядке ЛЭМ в СЭС МКД и ОЗ

Как СЭС, так и сама ЭЭС представляют собой однородные энергетические хабы [2, 3] с входными потоками электрической энергии переменного тока напряжением 0,4 кВ. Выходные потоки ЭЭС – электрическая энергия либо постоянного, либо переменного тока в соответствии с типом станции. На рис. 1 приведена структурная схема подключения ЭЭС МКД (ОЗ) к СЭС.

Главным техническим сдерживающим фактором установки ЭЭС в подземных и наземных парковках МКД и ОЗ является, несомненно, обеспечение требуемой электрической энергией (мощностью) всех потребителей электрозаправочной услуги в нужные им промежутки времени в условиях существующих схемно-режимных свойств самой СЭС, влияющих на перетоки электроэнергии через точку подключения ЭЭС¹.

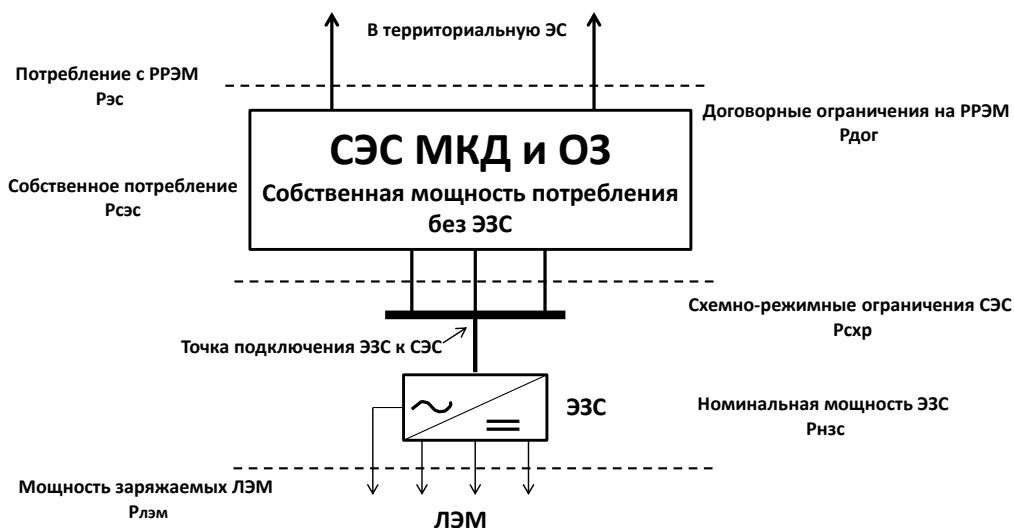


Рис. 1. Структурная схема подключения ЭЭС к ЭЭС МКД (ОЗ). ЭЭС может осуществлять зарядку ЛЭМ как на постоянном, так и на переменном токе

Обозначим ограничения потребляемой мощности из территориальной энергосистемы (ЭС) на границе с СЭС по условиям договора на технологическое присоединение как $P_{\text{дог}} = P_{\text{дог}}(t)$, внутренние схемно-режимные ограничения СЭС по передаче мощности в точку подключения ЭЭС как $P_{\text{схр}} = P_{\text{схр}}(t)$, текущую

¹ Наличие мест для напольной или навесной установки оборудования ЭЭС, как и наличие мест под трассы подходящих к ним электрических кабелей, служит гораздо менее значимым ограничением ввиду относительной малости требуемых площадей в условиях существующих объемно-планировочных решений.

мощность всех заряжаемых ЛЭМ – $P_{\text{лэм}} = P_{\text{лэм}}(t)$, текущую мощность i -го заряжаемого ЛЭМ – $P_{\text{лэм}i} = P_{\text{лэм}i}(t)$, максимальное число заряжаемых ЛЭМ по условиям конструкции НЗЭС – I , а номинальную мощность ЭЗС – $P_{\text{НЗЭС}}$.

Очевидно, что основным условием проектирования и эксплуатации ЭЗС является

$$\sum P_{\text{лэм}i} = P_{\text{лэм}} \leq P_{\text{НЗЭС}}.$$

Как правило, для СЭС выполняются также следующие условия:

$$P_{\text{дог}} = P_{\text{дог}}(t) = P_{\text{Мд}} = \text{const};$$

$$P_{\text{схр}} = P_{\text{схр}}(t) = \text{const}.$$

Оценка $P_{\text{схр}}$ осуществляется в процессе анализа режимов СЭС при выборе точки подключения ЭЗС. Проверяются ограничения по допустимому току, то есть нагреву, всех электротехнических устройств СЭС (трансформаторов, кабелей, проводов, шин), на которые оказывает влияние подключение ЭЗС с номинальной мощностью $P_{\text{НЗЭС}}$ и номинальной реактивной мощностью $Q_{\text{НЗЭС}}$. Если текущую собственную мощность потребления СЭС без ЭЗС обозначим $P_{\text{СЭС}} = P_{\text{СЭС}}(t)$, то

$$P_{\text{схр}}(t) = f[P_{\text{СЭС}}(t), P_{\text{НЗЭС}}, Q_{\text{НЗЭС}}].$$

Поскольку заряд ЛЭМ происходит на постоянном токе, возможно, окажется необходимым принять меры по компенсации реактивной мощности, которая потребляется преобразователем переменного тока в постоянный (AC/DC), входящим в состав ЭЗС, или самими ЛЭМ, если преобразователи AC/DC являются конструктивными частями электромобиля.

Пусть мощность, покупаемая с РРЭМ собственником объекта в момент времени t из энергосистемы, будет $P_{\text{Эс}} = P_{\text{Эс}}(t)$, тогда должно иметь место следующее выражение:

$$P_{\text{рас}}(t) = P_{\text{Эс}}(t) - P_{\text{СЭС}}(t) \geq P_{\text{лэм}}(t), \quad (1)$$

где $P_{\text{рас}}(t)$ – потенциально доступная (располагаемая) мощность для зарядки ЛЭМ в момент t , которая может быть больше, меньше или равна $P_{\text{НЗЭС}}$:

$$P_{\text{рас}}(t) = P_{\text{дог}} - P_{\text{СЭС}}(t) = P_{\text{Мд}} - P_{\text{СЭС}}(t) \lesseqgtr P_{\text{НЗЭС}}.$$

Из (1) следует, что для принятия решения об *одновременном подключении любого числа однотипных ЛЭМ* (в общем случае от одного до I) с суммарной мощностью зарядки $P_{\text{лэм}}(t_0)$ в момент времени t_0 до момента окончания их зарядки T_3 необходимо осуществить прогноз $P_{\text{СЭС}}(t)$, или $P_{\text{рас}}(t)$, а также $P_{\text{лэм}}(t)$ в интервале $[t_0, T_3]$.

Если всюду на этом интервале

$$\{P_{\text{лэм}}(t) \leq P_{\text{рас}}(t)\} \wedge \{P_{\text{лэм}}(t) \leq P_{\text{схр}}(t)\}, t_0 \leq t \leq T_3, \quad (2)$$

то зарядка ЛЭМ будет осуществлена в полном объеме без рыночно-договорных и технических ограничений. На практике к ЭЗС в произвольные моменты времени подключаются разнотипные ЛЭМ, поэтому мы имеем дело со случайной функцией $P_{\text{лэм}}(t)$, а также со случайными векторами $\mathbf{t}_0 = [t_{01} \dots t_{0I}]$, $\mathbf{T}_3 = [T_{31} \dots T_{3I}]$ и их разностью – периодами зарядки ЛЭМ, хаотически перекрывающимися друг друга:

$$\Delta \mathbf{t}^3 = \mathbf{t}_0 - \mathbf{T}_3.$$

При реализации прогноза в АСУ ЭЗС непрерывная переменная t заменяется ступенчатой переменной с выбранной дискретностью $\Delta t_{\text{уср}}$, зависящей от возможностей получения информации для прогноза потребления, которая, как правило, определяется дискретностью усреднения мощности в установленных в СЭС приборах учета (ПУ) электроэнергии $\Delta T_{\text{ПУ}}$:

$$\Delta t_{\text{уср}} = n \cdot \Delta T_{\text{ПУ}} (n = 1, 2, \dots).$$

Предлагаемые принципы решения сформулированной проблемы

Как следует из вышеизложенного, оценка осуществимости успешной зарядки некоторого числа ЭЛМ, подключаемых к ЭЗС в произвольные моменты времени, с длительностями зарядки, определяемыми их инструкциями по эксплуатации, может быть выполнена на основе решения трех следующих подзадач:

1) корректный прогноз потребления электроэнергии (мощности) собственными потребителями СЭС $P_{\text{СЭС}}(t)$ с учетом рыночно-договорных ограничений и особенностей сбора исходных данных;

2) прогноз потребления самих ЛЭМ $P_{\text{ЛЭМ}}(t)$ в условиях стохастичности потребляемой ансамблем ЛЭМ мощности и длительности зарядки, а также технические ограничения в точке подключения ЭЗС (шкафов с оборудованием);

3) создание релевантных алгоритмов технологического управления АСУ ЭЗС верхнего уровня (по отношению к системам управления отдельных единиц оборудования, к которым подключены ЛЭМ).

Прогноз $P_{\text{СЭС}}(t)$. С практической точки зрения для прогноза $P_{\text{СЭС}}(t)$ необходимо:

- выбрать метод прогноза дискретных временных рядов $P_{\text{СЭС}}(t)$ и реализовать его применительно к нагрузке МКД и ОЗ;

- организовать информационное обеспечение прогноза, включая данные в режиме онлайн, полученные от измерительных приборов учета электроэнергии (счетчиков), метеорологические факторы, данные о режиме централизованного теплоснабжения: включено ли отопление и/или горячее водоснабжение (ГВС), так как любой перерыв централизованного отопления при неблагоприятных погодных условиях или перерыв ГВС влечет за собой некоторое увеличение электрической нагрузки, вызванное включением жителями индивидуальных электронагревательных приборов.

Выбор метода прогноза. Прогноз потребления СЭС МКД и ОЗ в виде дискретных временных рядов с выбранным интервалом усреднения мощности не вызывает принципиальных методических трудностей и может быть осуществлен различными известными методами [4–11].

Следует отметить, что целью статьи не является выбор конкретной модели прогноза нагрузки МКД и ОЗ, чему посвящены многочисленные исследования [4, 6, 10]. Поэтому предполагается, что при конкретном проектировании верхнего уровня системы управления ЭЗС интегратор может воспользоваться любым проверенным на практике методом прогнозирования в соответствии с собственным опытом и предпочтениями.

В то же время отметим следующий факт: большинством специалистов [2–11] признано, что для целей прогноза временных рядов электрической нагрузки наиболее целесообразно применение нейросетевых технологий, наиболее соответствующих искусственному интеллекту (ИИ).

Нейросетевые модели, или семейство ANN, обладают высокой аппроксимирующей способностью, позволяют обрабатывать статистическую информацию и выполнять прогнозные оценки на базе широкого инструментария ИИ. Данные модели благодаря их свойствам могут успешно применяться для прогнозирования и имитационного моделирования поведения электротехнических систем и комплексов различного назначения, включая СЭС МКД и ОЗ. ANN может быть использовано также для создания информационной системы, позволяющей

формировать консенсус-прогноз в целях уточнения результатов задачи прогнозирования временных рядов [2, 3].

Однако именно для МКД и ОЗ может быть применен также следующий упрощенный эвристический метод. Дело в том, что часовые графики потребления электроэнергии этих объектов относительно статистически устойчивы в разрезе суток соответствующих дней недели, что объясняется постоянством состава, характером и поведением множества однородных потребителей [13]. Причем чем больше число таких потребителей в объекте, тем более статистически устойчивы графики¹. Кроме того, с достаточной степенью достоверности можно утверждать, что на данных потребителей все основные влияющие факторы, такие как температура наружного воздуха, сила ветра, влажность, наличие или отсутствие централизованного отопления и горячего водоснабжения, действуют примерно в одинаковой степени.

Повышение статистической устойчивости означает улучшение качества прогноза процесса. Известно также, что характеристики периодических процессов при прочих равных условиях обладают повышенной устойчивостью на более длительных интервалах времени. Поэтому, например, при планировании и контроле режимов электроэнергетических систем органами оперативно-диспетчерского управления используются 30-минутные и часовые интервалы, которым соответствуют и $\Delta T_{пу}$, требуемые на рынках электроэнергии (мощности).

Предлагается осуществлять прогноз $P_{СЭС}(t)$ на основании типовых графиков, полученных для типовых сезонов и типовых дней недели, в скользящем режиме, примерно так, как осуществляется прогноз диспетчерских графиков в секторе балансирующего рынка, то есть корректировать потребление будущих периодов актуального типового графика по текущему потреблению.

Так, если в текущем интервале ΔT_j типовая нагрузка СЭС равна $P_{СЭС}^{тип}(\Delta T_j)$, а текущая – $P_{СЭС}(\Delta T_j)$, то в прогнозном следующем интервале ΔT_{j+1} принимаем:

$$P_{СЭС}(\Delta T_{j+1}) = P_{СЭС}^{тип}(\Delta T_{j+1}) \cdot \frac{P_{СЭС}(\Delta T_j)}{P_{СЭС}^{тип}(\Delta T_j)}.$$

Информационное обеспечение прогноза нагрузки СЭС. В качестве исходной информации для прогноза потребления СЭС должны использоваться следующие виды исходных данных (ИД):

1) ретроспективные ИД – данные о релевантных временных рядах нагрузки прошлых аналогичных периодов, полученные с помощью интеллектуальных приборов учета (ИПУ) с выбранной дискретностью $\Delta t_{усп}$;

2) данные о потреблении текущих суток на выбранных временных интервалах с той же дискретностью, что и по п. 1, до начала периода прогноза;

3) ИД о метеорологических условиях (текущих и на период прогноза) – температуре, влажности, скорости ветра. Принимая во внимание характер нагрузки МКД и ОЗ, можно утверждать, что основное влияние на точность прогноза будет оказывать температура наружного воздуха;

4) наличие или отсутствие проектного централизованного отопления и ГВС здания, так как включение или отключение индивидуальных электрических бойлеров в квартирах, а также электронагревателей влияет на прогноз

¹ Боровский А.В., Юменчук А.А. Модель стохастической электрической нагрузки в жилом секторе с использованием плотности вероятности Вейбулла. Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2024; 12(4).

электропотребления МКД в целом гораздо более существенно, чем изменение прочей нагрузки (освещение, бытовые приборы и пр.);

5) в случае централизованного теплоснабжения – состояние «включено»/«отключено» отопления и/или ГВС в периоде прогноза.

При применении метода ANN основной информационной проблемой прогноза является получение достаточного объема качественных ретроспективных данных о потреблении электроэнергии для обучения нейросети [5–10]. Эти данные могут быть получены только с помощью интеллектуальных ПУ (ИПУ), включенных или не включенных в интеллектуальную систему учета (ИСУ). В последнем случае данные снимаются «вручную». Поэтому если на вводных распределительных устройствах здания применены интегральные ПУ, их необходимо заменить на ИПУ, которые должны быть подключены к АСУ ЭЭС (SCADA). Выбор типа ИПУ¹ следует осуществлять при проектировании АСУ ЭЭС.

Для получения среднеинтервальной мощности в современных ИПУ имеется возможность изменять интервал усреднения проходящей через счетчик электроэнергии, как правило, от 5 мин до 1 ч и более. Исходя из вышеприведенных время-мощностных стандартных характеристик ЭЭС рекомендуется выбирать следующие интервалы усреднения (дискретизации временного ряда) $\Delta t_{\text{уср}}$ в ИПУ:

- для ЭЭС быстрой и сверхбыстрой скорости зарядки $\Delta t_{\text{уср}} = 5 - 10$ мин;
- для ЭЭС средней и медленной скорости зарядки $\Delta t_{\text{уср}} = 30$ мин.

Интервалы усреднения должны выбираться при проектировании АСУ ЭЭС с учетом конкретных типов применяемых шкафов.

Проверка критерия (2) в процессе прогнозирования возможности зарядки ЛЭМ в существующих СЭС представляет собой, по сути, известную балансовую задачу с применением результатов измерений, осуществляемых ИПУ [12]. При этом в ряде случаев необходимо учитывать погрешности измерений, так как на некоторых $\Delta t_{\text{уср}}$ может оказаться, что

$$P_{\text{ЛЭМ}}(\Delta t_{\text{уср}}) \ll P_{\text{СЭС}}(\Delta t_{\text{уср}}), \quad (3)$$

и вследствие этого

$$P_{\text{ЛЭМ}}(\Delta t_{\text{уср}}) \cong \delta_{\Sigma \text{изм}} = \delta_{\text{изм СЭС}}, \quad (4)$$

где $\delta_{\Sigma \text{изм}}$ – погрешность измерения сальдированного перетока на границах СЭС без ЭЭС; $\delta_{\text{изм СЭС}}$ – погрешность измерения нагрузки СЭС без ЭЭС.

На рис. 2 приведены схема для расчета $P_{\text{СЭС}}(\Delta t_{\text{уср}})$ и схема расстановки ИПУ для проверки критерия (2).

Из (1) получим уравнения для определения расчетного значения собственной нагрузки СЭС:

$$P_{\text{СЭС}}(\Delta t_{\text{уср}}) = P_{\text{ЭС}}(\Delta t_{\text{уср}}) - P_{\text{ЛЭМ}}(\Delta t_{\text{уср}}), \quad (5)$$

$$P_{\text{СЭС}}^{\text{изм}}(\Delta t_{\text{уср}}) = P_{\text{ЭС}}^{\text{изм}}(\Delta t_{\text{уср}}) - P_{\text{ЛЭМ}}^{\text{изм}}(\Delta t_{\text{уср}}), \quad (6)$$

где $P_{\text{СЭС}}^{\text{изм}}(\Delta t_{\text{уср}})$, $P_{\text{ЭС}}^{\text{изм}}(\Delta t_{\text{уср}})$, $P_{\text{ЛЭМ}}^{\text{изм}}(\Delta t_{\text{уср}})$ – соответственно измеренные ИПУ среднеинтервальные мощности нагрузки СЭС без ЭЭС, перетока из ЭЭС и потребления ЛЭМ.

¹ В соответствии с постановлением Правительства РФ от 19 июня 2020 г. № 890 «О порядке предоставления доступа к минимальному набору функций интеллектуальных систем учета электрической энергии (мощности)».

Суммарный переток мощности из ЭС по двум (в данном конкретном случае) линиям (вводам в СЭС) равен согласно рис. 2

$$P_{ЭС}(\Delta t_{\text{уср}}) = P_{ЭС1}(\Delta t_{\text{уср}}) + P_{ЭС2}(\Delta t_{\text{уср}}),$$

следовательно,

$$\begin{aligned} P_{СЭС}(\Delta t_{\text{уср}}) &= P_{ЭС1}(\Delta t_{\text{уср}}) + P_{ЭС2}(\Delta t_{\text{уср}}) - P_{ЛЭМ}(\Delta t_{\text{уср}}), \\ P_{СЭС}^{\text{изм}}(\Delta t_{\text{уср}}) &= P_{ЭС1}^{\text{изм}}(\Delta t_{\text{уср}}) + P_{ЭС2}^{\text{изм}}(\Delta t_{\text{уср}}) - P_{ЛЭМ}^{\text{изм}}(\Delta t_{\text{уср}}). \end{aligned} \quad (7)$$

Если соотношения между $P_{СЭС}^{\text{изм}}(\Delta t_{\text{уср}})$ и $P_{ЛЭМ}^{\text{изм}}(\Delta t_{\text{уср}})$ соответствует (3), (4), то из (7) можно исключить $P_{ЛЭМ}^{\text{изм}}(\Delta t_{\text{уср}})$. Оценим возможные погрешности более подробно.

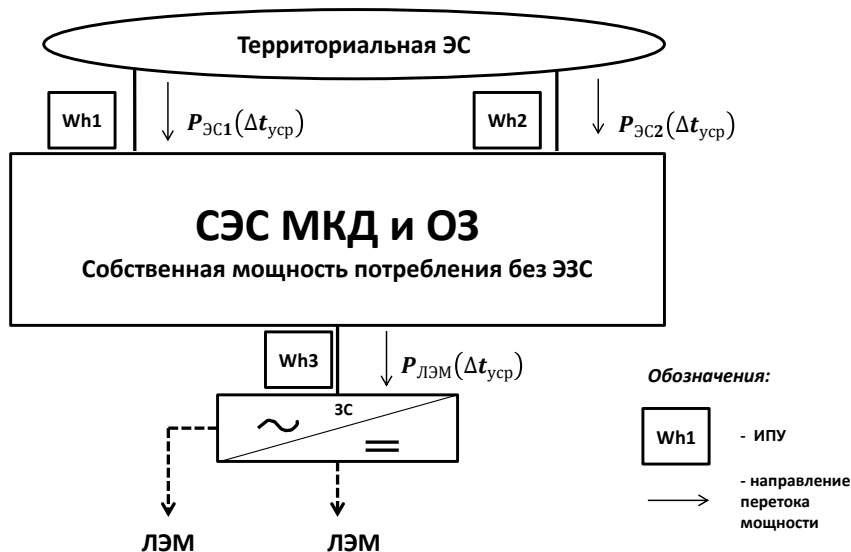


Рис. 2. Схема расчета перетоков мощности с расстановкой ИПУ в СЭС

Пределы допускаемой основной погрешности ИПУ определяются их классами точности и выражаются числами в процентах. Таким образом, погрешности измерения среднеинтервальной мощности на линиях 1 и 2 (см. рис. 2) при классе точности 0,5 равны:

$$\delta_{ЭС1} = \pm 0,005 * P_{ЭС1}^{\text{изм}}(\Delta t_{\text{уср}}), \delta_{ЭС2} = \pm 0,005 * P_{ЭС2}^{\text{изм}}(\Delta t_{\text{уср}}).$$

Когда, например, текущая мощность собственной нагрузки СЭС без ЭЭС равна 10000 кВт, $P_{ЛЭМ}^{\text{изм}}(\Delta t_{\text{уср}}) = 0$ (ЭЭС отключена) и обе линии связи с ЭС нагружены одинаково, то

$$\delta_{ЭС1} = \delta_{ЭС2} = \pm 0,005 * 5000 = \pm 25 \text{ кВт.}$$

Известно, что погрешность косвенных измерений находится как среднее геометрическое погрешностей измерений каждым прибором с некоторым коэффициентом [12], который в данном случае примем условно равным 1. В данном примере $\delta_{изм СЭС}$ составляет примерно 35 кВт, следовательно, применять критерий (2) к анализу включения ЭЭС мощностью менее 100 кВт не имеет смысла.

Для уменьшения подобной неопределенности, а также в целях контроля соблюдения договорной максимальной мощности в режиме онлайн рекомендуется установить на внешних питающих линиях СЭС дополнительно датчики

мощности, применяемые в системах диспетчерского контроля и управления (телемеханические датчики мощности с очень малым $\Delta t_{\text{уср}}$).

Если $P_{\text{НЭЭС}}$ меньше или равна погрешности измерения $P_{\text{дог}}$ (максимума возможной потребляемой мощности) МКД или ОЗ, то решение прогностических задач в АСУ ЭЭС нецелесообразно. Также нецелесообразен прогноз, когда $P_{\text{НЭЭС}}$ меньше трехкратной погрешности измерений $P_{\text{дог}}$ [12]. Если $P_{\text{НЭЭС}}$ больше трехкратной погрешности измерения $P_{\text{дог}}$, но в процессе эксплуатации ЭЭС возникают условия, когда $P_{\text{ЭЭС}}$ меньше или равна трехкратной погрешности измерения текущего значения $P_{\text{СЭС}}$, то алгоритм прогноза следует отключать на всем временном интервале существования данного условия.

Прогноз $P_{\text{ЛЭМ}}(t)$ представляет собой самую трудную с практической точки зрения прогностическую задачу, так как число, типы подключаемых ЛЭМ (а следовательно, и их характеристики зарядки) и моменты начала и окончания зарядки каждого ЛЭМ в реальном времени могут быть совершенно произвольными (T_3 , соответствующее степени зарядки емкости АБ, выбирается потребителем самостоятельно исходя из его распорядка). Иными словами, в каждый прогнозный момент времени t значение $P_{\text{ЛЭМ}}(t)$ зависит от множества ретроспективных и перспективных факторов, в том числе и от Δt^3 , определяющих потребляемые в данный момент мощности $P_{\text{ЛЭМ}i}(t)$ ($i = 1, 2, \dots, I$) каждого из подключенных к ЭЭС ЛЭМ:

$$P_{\text{ЛЭМ}}(t) = \sum P_{\text{ЛЭМ}i}(t) = \sum P_{\text{ЛЭМ}i}[t, t_{0i}, T_{3i}, F(\tau_i, T_{3i})],$$

где $F(\tau_i, T_{3i})$ – время-мощностная зарядная характеристика i – го ЛЭМ; τ_i, T_{3i} – «собственное» время зарядки и расчетное время окончания зарядки в координатах времени, указанных в технической документации.

Сразу примем допущение, что приведенные в документации зависимости $P_{\text{ЛЭМ}i}^{\text{д}}(\tau_i) = F(\tau_i, T_{3i})$ не отличаются от фактических характеристик, хотя, как известно [1], они могут изменяться в процессе эксплуатации.

Основная проблема заключается в том, что изготовители АБ для ЛЭМ предоставляют потребителям не время-мощностные характеристики зарядки, а зависимости емкости $C(\tau)$ аккумуляторов, тока $I(\tau)$ и напряжения $U(\tau)$ от времени (рис. 3), то есть необходимо рассчитать $P_{\text{ЛЭМ}}(\tau, T_3) = F(\tau, T_3)$ в условиях регламентированного в документации закона зарядки¹.

Как правило, применяют комбинации технологий зарядки при постоянном токе (CC), постоянном напряжении (CV), реже – при постоянстве электрической мощности (CP) [14]. Наиболее распространенный алгоритм, показанный на рис. 3, сочетает начальную фазу CC и конечную фазу CV, его условное обозначение CC – CV.

Из представленных на рисунке кривых видно, что время-мощностную характеристику АБ ЛЭМ можно рассчитать, перемножив $I(\tau)$ и $U(\tau)$ в аналитическом или в табличном виде.

Другая проблема состоит в том, что необходимо оценить потери электрической мощности в самом преобразователе AC/DC ЭЭС и в его входных и выходных

¹ Согласно ГОСТ Р 59846–2021 изготовитель АБ должен указать в технических условиях алгоритм проведения заряда, то есть зависимость тока и напряжения заряда от времени. В инструкции по эксплуатации АБ указываются следующие параметры заряда: номинальное напряжение, номинальная емкость, максимальный ток заряда, рекомендуемая температура зарядки, допустимое напряжение заряда, время заряда, а также допустимые условия эксплуатации.

цепях в процессе зарядки, что возможно осуществить с достаточной степенью точности через номинальный коэффициент полезного действия (КПД) агрегата.

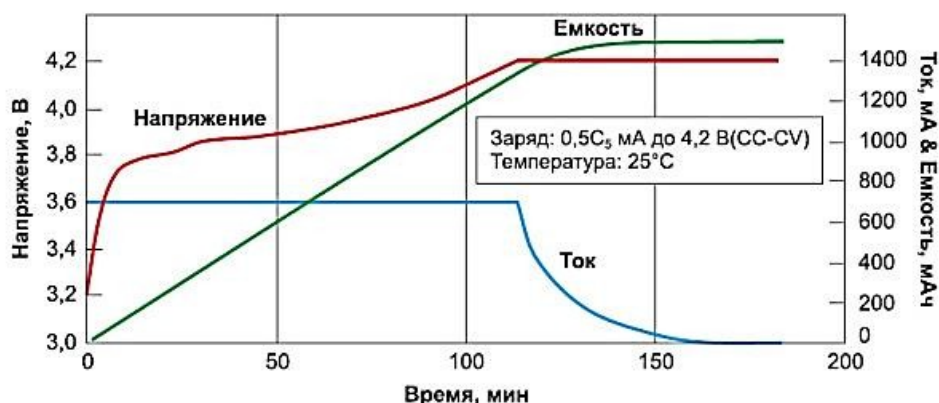


Рис. 3. Зарядные характеристики литиевых аккумуляторов компании EEMB
(URL: <https://www.compel.ru/lib?tc=6980>)

Характеристика заряда $0,5C_3$ означает, что ток заряда, составляющий 0,5 номинальной емкости C аккумулятора, должен полностью зарядить (или разрядить) его за 5 ч.

Архитектура и алгоритмическое обеспечение АСУ ЭЗС. Данная АСУ – двухуровневая. В качестве платформы верхнего уровня могут быть применены системы SCADA различных разработчиков, адаптированные под специфику СЭС; нижний уровень представляет собой штатные системы автоматического или автоматизированного управления (контроля, регулирования) самих АЗС, а также системы автоматики зарядки аккумуляторов ЛЭМ (при их наличии).

Объектом технологического управления АСУ ЭЗС являются устройства (шкафы) зарядки в заводском исполнении с подключенными к каждому из них ЛЭМ – от одного до максимально возможного числа согласно возможностям конструкции соответствующего устройства. Определение марки ЛЭМ, то есть типа внутренней АБ, с целью идентификации ее характеристики $F(\tau, T_3)$ должно осуществляться автоматически при подключении ЛЭМ к ЭЗС системой контроля и управления самой ЭЗС по сигналам от ЛЭМ.

Как указывалось выше, в процессе управления следует оценить время-мощностные характеристики всех фактически подключенных ЛЭМ ко всем установленным конструктивно независимым станциям (шкафам), чтобы сравнить их с $P_{\text{рас}}(t)$ и выбрать оптимальные режимы зарядки каждого ЛЭМ с учетом существующих ограничений. Следует иметь в виду, что ограничение по $P_{\text{рас}}(t)$ может привести к невозможности обеспечить зарядку вообще или к увеличению времени зарядки ЛЭМ (в пределах допустимого значения согласно технической документации), ожидаемого потребителем услуги, о чем он должен быть заранее предупрежден.

Таким образом, взаимодействие потребителя услуги и АЗС должно осуществляться при подключении ЛЭМ к свободному порту с автоматическим информированием владельца о возможном времени зарядки на специальном дисплее (как при зарядке сотового телефона), или в самом простом случае – на вывешенной табличке, предупреждающей о том, что время зарядки на данной АЗС может

увеличиваться по сравнению с паспортными данными АБ. Потребитель может либо принять данные условия предоставления услуги, либо отказаться от них и выбрать зарядку на другой ЭЗС вне данного МКД (ОЗ).

С учетом вышеизложенного в АСУ принципиально возможна реализация трех стратегий управления.

Стратегия 1. Управление вынужденной пониженной мощностью, а следовательно, скоростью зарядки автоматикой ЭЗС и/или ЛЭМ на каждой конструктивно независимой ЭЗС при свободном подключении ЛЭМ (потребителя) ко всем свободным портам. В этом случае потребитель услуги должен быть поставлен в известность о возможном ухудшении качества зарядки. На АЗС это соответствует невозможности обеспечить требуемый расход бензина всеми заправочными терминалами, что, разумеется, встречается достаточно редко и не имеет таких последствий вследствие небольшого времени заправки автомобилей.

Стратегия 2. Отключение ряда ЭЗС (шкафов) или разъемов в многоразъемных шкафах либо перевод их в режим ожидания с предупреждением об этом потребителей услуги, что означает ограничение пропускной способности заправки. Это ничем не отличается от ситуации с АЗС при выходе из строя нескольких заправочных терминалов или при невозможности обеспечить требуемый расход бензина, как и в случае стратегии 1.

Стратегия 3. Предварительная последовательная онлайн-оценка подключения каждого нового клиента к ЭЗС с учетом доступной динамики мощности в условиях прогнозной $P_{\text{рас}}(t)$. Иными словами, клиенту может быть отказано в подключении к порту или выделении ему «окна» с меньшей доступной мощностью (и соответственно с большим временем зарядки), если это допускается заводской технической документацией. Такая возможность появляется, в частности, при переходе к алгоритму зарядки $CP - CV$ [14]. Данная стратегия в отношении выделения «окна» меньшей доступной мощности соответствует стратегии 1.

Набор стратегий управления в АСУ определяется при проектировании ЭЗС. Перевод порта с подключенным ЛЭМ из режима ожидания в режим номинальной или вынужденно ограниченной скорости зарядки осуществляется АСУ автоматически на основании определения фактического мощностно-временного «окна» при решении сформулированных выше прогнозных задач.

Учитывая тот факт, что основным препятствием для коммерческой деятельности по оказанию электрозаправочных услуг являются рыночно-договорные ограничения, наименьшим потенциальным рискам будут подвержены инвесторы (владельцы) ЭЗС, являющиеся ГП, ЭСО, которые заключили соответствующие договоры на поставку электроэнергии (мощности) с потребителями МКД и ОЗ или аффилированными с ними лицами. В данном случае верхний уровень АСУ ЭЗС может быть реализован не на объектах, а централизованно, на серверах ГП (ЭСО), что уменьшит затраты в целом по проекту. Кроме того, данные инвесторы при расширении коммерческой деятельности в отношении услуг по зарядке ЛЭМ могут разрабатывать и применять типовые решения, что также скажется на прибыльности такой деятельности. Хорошие перспективы прогнозируются и у электросетевых компаний, оказывающих услуги по передаче электроэнергии и по технологическому присоединению владельцев МКД и ОЗ к электрической сети.

Выводы

1. Наилучшим решением проблемы зарядки ЛЭМ является учет ЭЗС в составе проектной документации для строительства МКД и ОЗС. В то же время имеется

возможность установки ЭЗС в уже эксплуатируемых зданиях с подключением к существующей СЭС на основе сформулированных в данной статье принципиальных подходов, реализуемых в двухуровневой АСУ. Ключевыми из них являются предложения по определению доступной для зарядки мощности при ограничениях по условию неперевышения договорных значений мощности, потребляемой от ЭС, а также при ограничениях, налагаемых схемно-режимными особенностями самой СЭС.

2. В качестве методической основы прогнозирования временных рядов нагрузки СЭС целесообразно применение нейросетевых технологий с использованием инструментария ИИ, конкретный выбор которых определяет интегратор системы. Допустимо также использование эвристических методов прогноза, один из которых предложен в данной статье.

3. Особое внимание при создании АСУ ЭЗС следует обратить на информационное обеспечение системы, требующее получения ретроспективных среднеинтервальных значений мощностей за возможно больший предшествующий период. При этом необходимо подобрать оптимальные интервалы усреднения мощности из имеющихся в современных ИПУ заводских настроек. Исходя из время-мощностных характеристик ЭСЗ для станций быстрой и сверхбыстрой зарядки рекомендуется принимать $\Delta t_{\text{уср}} = 5 - 10$ мин, для станций средней и медленной зарядки – $\Delta t_{\text{уср}} = 30$ мин.

4. При проектировании и эксплуатации АСУ ЭЗС следует предусмотреть случаи, когда планируемая (текущая) мощность зарядки будет соизмерима с погрешностями определения нагрузки СЭС без учета ЭЗС. Это требование актуально при условии подключения к ЭЗС одного-трех ЭЛМ медленной зарядки в часы максимальной собственной нагрузки СЭС, что наиболее вероятно в настоящее время при медленном увеличении парка ЛЭМ.

5. Взаимодействие потребителя услуги и ЭЗС ничем не отличается от традиционной схемы предоставления коммерческих услуг, когда потребитель предварительно информируется об особенностях предоставления услуги (с учетом ограничений) при подключении ЛЭМ к свободному порту ЭЗС. Потребитель может либо принять данные условия предоставления услуги, либо отказаться от них и выбрать зарядку на другой ЭЗС вне данного МКД (ОЗ).

6. Наименьшие риски реализации проекта установки АЗС в МКД и ОЗ будут у инвестора (владельца), в качестве которого выступает ГП или ЭСО. Перспективна организация оказания услуг по зарядке ЭЛМ на объектах и у электросетевых компаний.

7. В целях выбора или уточнения алгоритма прогноза располагаемой мощности для заряда ЛЭМ, требований к выбору ИПУ и их настроек, в том числе $\Delta t_{\text{уср}}$, а также для уточнения архитектуры и функций АСУ ЭЗС потенциальному инвестору рекомендуется выполнение НИОКР с реализацией пилотного проекта в одном из МКД или ОЗ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Юмт В.Е. [и др.]. Современные источники тока и зарядные станции для электромобилей: учеб. пособие. М.: МАДИ, 2017. 108 с. EDN: YRAUKF.
2. Журавлёв В.С., Осика Л.К. Применение сквозных цифровых технологий для решения задачи оптимизации расчетов потребителей розничных рынков электроэнергии за электрическую мощность // Функционирование и развитие электроэнергетики в эпоху цифровизации: сборник / под ред. Н.Д. Рогалева. М.: МЭИ, 2021. 272 с. EDN: PYGAYY

3. Журавлёв В.С., Осика Л.К., Шаповалов А.И. Концепция энергетического хаба // Главный энергетик. 2024. № 8.
4. Абдурахманов А.М., Володин М.В., Зыбин Е.Ю., Рябченко В.Н. Методы прогнозирования электропотребления в распределительных сетях (обзор) // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. 2016. Т. 3. № 1. С. 3–23. EDN: VOXROF
5. Pituk Bunnoon, Kusumal Chalermyanont, and Chusak Limsakul. A Computing Model of Artificial Intelligent Approaches to Mid-term Load Forecasting: a state-of-the-art-survey for the researcher // IACSIT International Journal of Engineering and Technology. 2010. Vol. 2. No. 1. Pp. 94–100.
6. Арутюнян Р.В. [и др.]. Прогноз электропотребления: анализ временных рядов, геостатистика, искусственные нейронные сети: препринт ИБРАЭ-99-05. М.: Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, 1999. 45 с. EDN: VXQBSP
7. Бэнн Д.В., Фармер Е.Д. Сравнительные модели прогнозирования электрической нагрузки: пер. с англ. М.: Энергоатомиздат, 1987. 200 с.
8. Тихонов Э.Е. Методы прогнозирования в условиях рынка: учеб. пособие. Невинномысск, 2006. 221 с. EDN: QRETXZ
9. Червяков Н.И., Тихонов Э.Е. Предсказание фрактальных временных рядов с помощью нейронных сетей // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2003. № 10. С. 19–24. EDN: TPQOLB
10. Шумилова Г.П., Готман Н.Э., Старцева Т.Б. Прогнозирование активной и реактивной нагрузки узлов ЭЭС с использованием инверсии искусственной нейронной сети // Управление электроэнергетическими системами – новые технологии и рынок: сб. науч. тр. Сыктывкар: Коми НЦ УрО РАН, 2004. С. 115–122.
11. Поляхов Н.Д., Приходько И.А., Ван Е. Прогнозирование электропотребления на основе метода опорных векторов с использованием эволюционных алгоритмов оптимизации // Со временные проблемы науки и образования. 2013. № 2.
12. Осика Л.К. Расчетные модели интеллектуальных измерений (Smart Metering) в задачах учета и сбережения электроэнергии: практ. пособие. М.: МЭИ, 2013. 422 с.
13. Соловьева А.С., Шведов Г.В. Сравнительный анализ зимних и летних графиков электрической нагрузки рабочих и выходных дней многоквартирных домов с электроплитами в системах электроснабжения крупных городов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2023. Т. 23. № 1. С. 27–37. DOI: 10.14529/power230103. EDN: WNEGUM
14. Jeon S.U. [et al.]. Study on Battery Charging Strategy of Electric Vehicles Considering Battery Capacity // IEEE Access. 2021. Vol. 9. Pp. 89757–89767. DOI: 10.1109/access.2021.3090763. EDN: BSQGTV

Статья поступила в редакцию 14.09.2025

PRINCIPLES OF SOLVING THE PROBLEM OF EV CHARGING FROM ELECTRIC CHARGING STATIONS INTEGRATED INTO EXISTING POWER SUPPLY SYSTEMS OF PUBLIC BUILDINGS AND APARTMENT BUILDINGS

L.K. Osika¹

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

E-mail: osikalk@yandex.ru

Abstract. Market and technological possibilities of solving the problem of providing EV with electric filling service by installing electric charging stations in already built and operated apartment buildings and public buildings are discussed. The method of determining the available charging capacity is analyzed depending on contractual restrictions on the retail electricity (capacity) market and circuit conditions at the point of connection of the station to the power supply system. Strategies and principles of technological control of electric vehicle charging in conditions of power shortage have been developed. It is concluded that it is advisable to make a forecast of the available charging capacity using one of the algorithms based on the theory of artificial neural networks, with training information in the form of retrospective time series of the load of the power supply system, external weather conditions and the presence (absence) of centralized heating and hot water supply. Heuristic forecasting methods also have good prospects.

Keywords: electric vehicle, electric filling station, apartment building, public building, power supply system, electric vehicle charging time, electric vehicle charging speed, available power for charging an electric vehicle, intelligent metering device, electric power measurement error.

REFERENCES

1. Yutt V.E. [i dr.]. Sovremennyye istochniki toka i zaryadnye stancii dlya elektromobilej [Modern power sources and charging stations for electric vehicles]: ucheb. posobie. M.: MADI, 2017. 108 p. (In Russian)
2. Zhuravlyov V.S., Osika L.K. Primenenie skvoznykh cifrovyykh tekhnologiy dlya resheniya zadachi optimizatsii raschyotov potrebitel'ey roznichnykh rynkov elektroenergii za elektricheskuyu moshchnost [Application of end-to-end digital technologies for solving the problem of optimizing calculations of retail electricity market consumers for electric power] // Funkcionirovanie i razvitiye elektroenergetiki v epokhu cifrovizatsii: sbornik / pod red. N.D. Rogaleva. M.: MEI, 2021. 272 p. (In Russian)
3. Zhuravlyov V.S., Osika L.K., Shapovalov A.I. Konceptsiya energeticheskogo haba [The concept of an energy hub] // Glavnyy energetik. 2024. No. 8. (In Russian)
4. Abdurahmanov A.M., Volodin M.V., Zybin E.Yu., Ryabchenko V.N. Metody prognozirovaniya elektropotrebleniya v raspredelitelnykh setyakh (obzor) [Methods for forecasting electricity consumption in distribution networks (review)] // Elektrotekhnika: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal. 2016. V. 3, No. 1. Pp. 3–23. (In Russian)



5. *Pituk Bunnoon, Kusumal Chalermyanont, and Chusak Limsakul.* A Computing Model of Artificial Intelligent Approaches to Mid-term Load Forecasting: a state-of-the-art-survey for the researcher // IACSIT International Journal of Engineering and Technology. 2010. Vol. 2. No. 1. Pp. 94–100.
6. *Arutyunyan R.V. [i dr.].* Prognoz elektropotrebleniya: analiz vremennyh ryadov, geostatistika, iskusstvennyye neyronnye seti: preprint IBRAE-99-05 [Electricity consumption forecast: time series analysis, geostatistics, artificial neural networks: preprint IBRAE-99-05]. M.: Institut problem bezopasnogo razvitiya atomnoj energetiki RAN, 1999. 45 p. (In Russian)
7. *Benn D.V., Farmer E.D.* Sravnitelnye modeli prognozirovaniya elektricheskoy nagruzki [Comparative models of electric load forecasting]. M.: Energoatomizdat, 1987. 200 p. (In Russian)
8. *Tihonov E.E.* Metody prognozirovaniya v usloviyah rynka [Forecasting methods in market conditions]: ucheb. posobie. Nevinnomyssk, 2006. 221 p. (In Russian)
9. *Chervyakov N.I., Tihonov E.E.* Predskazanie fraktal'nyh vremennyh ryadov s pomoshch'yu neyronnyh setej [Prediction of fractal time series using neural networks] // Nejrokompyutery: razrabotka, primenenie. 2003. No. 10. Pp. 19–24. (In Russian)
10. *Shumilova G.P., Gotman N.E., Starceva T.B.* Prognozirovanie aktivnoj i reaktivnoj nagruzki uzlov EES s ispolzovaniem inversii iskusstvennoj neyronnoj seti [Forecasting active and reactive load of power system nodes using artificial neural network inversion] // Upravlenie elektroenergeticheskimi sistemami – novye tekhnologii i rynek: sb. nauch. tr. Syktyvkar: Komi NC UrO RAN, 2004. Pp. 115–122. (In Russian)
11. *Polyahov N.D., Prihodko I.A., Van E.* Prognozirovanie elektropotrebleniya na osnove metoda opornyh vektorov s ispolzovaniem evolyucionnyh algoritmov optimizacii [Electricity consumption forecasting based on support vector method using evolutionary optimization algorithms] // Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya. 2013. No. 2. (In Russian)
12. *Osika L.K.* Raschyotnye modeli intellektualnyh izmerenij (Smart Metering) v zadachah uchyota i sberezheniya elektroenergii: prakt. posobie [Calculation models of smart metering in tasks of electricity accounting and conservation: practical guide]. M.: MEI, 2013. 422 p. (In Russian)
13. *Soloveva A.S., Shvedov G.V.* Sravnitelnyj analiz zimnih i letnih grafikov elektricheskoy nagruzki rabochih i vyhodnyh dnei mnogokvartirnyh domov s elektroplitami v sistemah elektrosnabzheniya krupnyh gorodov [Comparative analysis of winter and summer electrical load profiles of working and weekend days in apartment buildings with electric stoves in power supply systems of large cities] // Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika. 2023. Vol. 23. No. 1. Pp. 27–37. DOI: 10.14529/power230103. (In Russian)
14. *Jeon S.U. [et al.].* Study on Battery Charging Strategy of Electric Vehicles Considering Battery Capacity // IEEE Access. 2021. Vol. 9. Pp. 89757–89767. DOI: 10.1109/access.2021.3090763. EDN: BSQGTV

Original article submitted 14.09.2025

УДК 621.311.62:534.87:519.68

АЛГОРИТМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ПРЕДАВАРИЙНЫХ И АВАРИЙНЫХ СОСТОЯНИЙ КОМПЛЕКТНЫХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

К.В. Фролов, Л.М. Инаходова¹

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

E-mail: riksot@mail.ru, inahodova@mail.ru

Аннотация. Представлен метод алгоритмической обработки акустических сигналов для выявления предаварийных и аварийных состояний комплектных распределительных устройств (КРУ) 6–10 кВ. Актуальность обусловлена ростом аварийности КРУ на 10–15 % в 2024–2025 гг. по данным Ростехнадзора, что связано с частичными и дуговыми разрядами, приводящими к простоям и экономическим потерям в топливно-энергетическом комплексе. Цель работы – разработка метода непрерывного мониторинга на основе спектральной плотности мощности (СПМ), метода главных компонент и модели смешанного гауссова распределения с алгоритмом ожидания-максимизации (ЕМ). Использовалась экспериментальная установка с двумя акустическими датчиками для регистрации сигналов в трех режимах: нормальном, предаварийном и аварийном. Метод включает оценку СПМ по схеме Уэлча с окнами Хемминга, формирование спектральных признаков, снижение размерности и кластеризацию. Предложена режимно-диагностическая карта, стабилизированная гистерезисом. Результаты показали точность классификации 100 % на выборке 208386 отсчетов с мерой уверенности более 0,9 и диагональной матрицей ошибок. Новизна метода заключается в интеграции модели смешанного гауссова распределения с гистерезисом для повышения устойчивости в шумовых условиях. Практическая значимость метода заключается в создании основы для систем раннего предупреждения, способных снизить аварийность КРУ.

Ключевые слова: акустическая диагностика, частичные и дуговые разряды, спектральная плотность мощности, признаки спектра, кластеризация, режимно-диагностическая карта, непрерывный мониторинг, метод главных компонент.

Электрооборудование распределительных подстанций объектов ТЭК включает комплектные распределительные устройства (КРУ) 6–10 кВ, от надежности которых зависит непрерывность технологических процессов и промышленная



© Автор(ы), 2025

¹ Кирилл Владимирович Фролов, аспирант кафедры автоматизированных электроэнергетических систем.

Лолита Меджидовна Инаходова, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автоматизированных электроэнергетических систем.

безопасность потребителей. Ранние дефекты изоляции и коммутационной арматуры проявляются при появлении частичных и дуговых разрядов, своевременное выявление которых позволяет сокращать простои, снижать риск аварий и оптимизировать планово-предупредительные ремонты. Актуальность проблемы подтверждается данными Ростехнадзора: в 2024 году количество аварий и инцидентов на промышленных предприятиях, включая энергетические объекты, выросло на 15 % по сравнению с 2023 годом (с 1200 до 1380 случаев), а общая аварийность в сфере промышленной безопасности увеличилась на 13,3 % [1–4]. Это приводит к значительным экономическим потерям и рискам для ТЭК, где две трети смертельных случаев связаны с несоблюдением базовых правил безопасности на энергообъектах. В контексте цифровой трансформации отрасли востребованы методы непрерывного мониторинга, способные работать без участия персонала и устойчивые к шумам и дрейфам параметров среды.

Методы диагностики КРУ традиционно делят на электрические, оптические/ультрафиолетовые, тепловизионные и акустические [5]. Электрические методы (датчики тока/напряжения ВЧ, емкостные вводы) обеспечивают высокую чувствительность, но требуют врезки в электроцепи и подвержены электромагнитным наводкам в условиях КРУ. Оптические системы эффективны при наличии прямой видимости и характерного свечения, что ограничивает их применимость внутри металлокабелей. Тепловизионный контроль выявляет нагрев, однако на ранних стадиях разрядной активности температурные признаки часто отсутствуют или маскируются вентиляцией. Акустическая диагностика, напротив, использует излучение в звуковом диапазоне и может реализовываться бесконтактно, не вмешиваясь в силовую схему, при этом чувствительна к широкому спектру дефектов и менее уязвима к ЭМ-помехам.

Ключевая трудность акустического мониторинга – вариабельность сигналов: изменчивый акустический фон, отличия геометрии отсеков, положения датчиков, а также технологические шумы (вентиляция, коммутационные операции). Поэтому необработанный временной сигнал малоинформативен для прямого порогового контроля; необходима устойчивая спектрально-признаковая репрезентация и четкие алгоритмы, снижающие размерность и чувствительность к масштабирующим факторам [6]. Для решения поставленной задачи и получения результата предложен анализ сигналов, полученных с экспериментальной установки, которая моделирует реальные условия эксплуатации КРУ 6–10 кВ, и их обработка с помощью построенного алгоритма спектрального анализа и кластеризации спектральной плотности мощности (СПМ) для формирования режимно-диагностической карты состояний электрооборудования.

Экспериментальная установка (рис. 1) включает два акустических датчика, размещенных в зонах минимального электромагнитного воздействия для одновременного мониторинга всех элементов ячейки КРУ серий К-59, К-61, К-63, К-70. Сигналы оцифровываются АЦП с предварительным усилением и фильтрацией, передаются через контроллер на сервер для дальнейшей обработки [7, 8].

Регистрация сигналов производилась в трех режимах работы ячейки КРУ: нормальный, предаварийный, аварийный. Исходный дискретный сигнал $x[n]$ рассматривается как кусочно-стационарный процесс на окнах фиксированной длины N_w со скользящим перекрытием. Для каждого окна оценивается спектральная плотность мощности, на основе которой выделяются компактные спектральные признаки; далее выполняется понижение размерности методом главных компонент (РСА) и неконтролируемое разделение наблюдений на режимы

кластеризацией. В итоге формируется устойчивое во времени отнесение кластеров к трем режимам с введением гистерезиса, подавляющего дрожание решений. Выбор СПМ в качестве первичного представления базируется на тождестве Винера – Хинчина и стандартной схеме Уэлча для уменьшения дисперсии спектральной оценки [9].

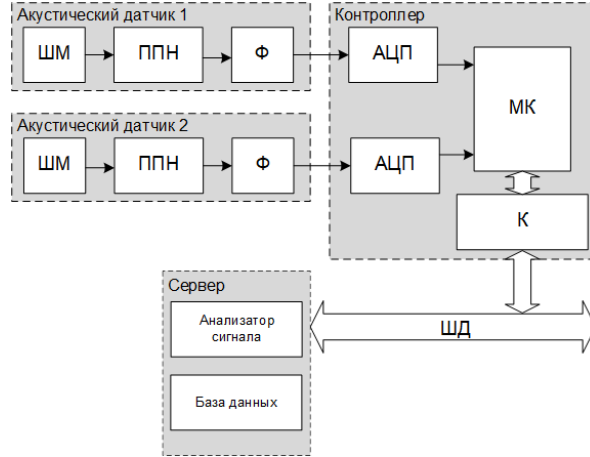


Рис. 1. Структурная схема экспериментальной установки:
ШМ – широкополосный микрофон; ППН – предусилитель; Ф – фильтр;
АЦП – аналогово-цифровой преобразователь; МК – микроконтроллер;
К – коммутатор; ШД – шина данных

Пусть на шаге анализа задано окно длиной N_w отсчетов и перекрытие $\rho \in [0,1)$. Из полной записи формируется последовательность фрагментов $x_l[n]$, где $l = 1, 2, \dots, L$; $n = 0, 1, \dots, N_w - 1$. Каждый фрагмент центрируется:

$$x_l^{(c)}[n] = x_l[n] - \bar{x}_l, \quad (1)$$

$$\text{где } \bar{x}_l = \frac{1}{N_w} \sum_{n=0}^{N_w-1} x_l[n].$$

При наличии квазистационарного дрейфа низких частот допускается высоко-частотная предфильтрация

$$x_l^{(b)}[n] = X\{x_l^{(c)}[n]\} \quad (2)$$

с частотой среза ниже диагностического диапазона, после чего дальнейшая обработка ведется с $x_l^{(b)}[n]$.

Все операции центрирования, линейной фильтрации и оконного усреднения корректно определены через линейные функционалы и интегралы суммирования, их свойства непрерывности и сходимости описаны в [10].

Оценивание СПМ выполняется по методу Уэлча с использованием оконной функции Хемминга w_n и схемы усреднения модифицированных периодограмм [9]. Определим дискретное преобразование Фурье окна:

$$X_l[k] = \sum_{n=0}^{N_w-1} x_l^{(b)}[n] w_n e^{-j2\pi kn/N_w}. \quad (3)$$

$$U = \frac{1}{N_w} \sum_{n=0}^{N_w-1} w_n^2, \quad \hat{P}_l[k] = \frac{1}{N_w U} |X_l[k]|^2, \quad \hat{P}[k] = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L \hat{P}_l[k], \quad (4)$$

$$f_k = \frac{k F_s}{N_w}, \quad k = 0, \dots, \frac{N_w}{2}, \quad (5)$$

где F_s – частота дискретизации; U – нормирующий множитель энергии окна; $\hat{P}[k]$ – оценка СПМ на частотной сетке f_k . Усреднение по перекрывающимся фрагментам уменьшает дисперсию $\hat{P}[k]$ относительно одиночной периодограммы ценой некоторого увеличения смещения и снижения частотного разрешения [10].

Формирование признаков строится на интегральных характеристиках СПМ, которые слабо чувствительны к случайным флуктуациям и масштабирующим факторам.

Пусть $\Omega = [f_{\min}, f_{\max}]$ – диагностический диапазон частот, разбитый на полосы $\{B_j\}_{j=1}^J$. Выделим полосные энергии по j полосе E_j :

$$E_j = \sum_{k \in B_j} \hat{P}[k] \Delta f, \quad \Delta f = \frac{F_s}{N_w}, \quad (6)$$

их энергетически нормированные версии E_j , устраняющие зависимость от общего уровня:

$$E_j = \frac{E_j}{\sum_{u=1}^J E_u}, \quad (7)$$

спектральный центроид C , второй центральный момент W , описывающие «центр тяжести» и рассеяние энергии по частоте:

$$C = \frac{\sum_k f_k \hat{P}[k]}{\sum_k \hat{P}[k]}, \quad W = \frac{\sum_k (f_k - C)^2 \hat{P}[k]}{\sum_k \hat{P}[k]}, \quad (8)$$

показатель наклона β лог-амплитуды на опорной подполосе B^* , фиксирующий баланс низких и высоких частот в B^* :

$$\beta = \arg \min_{\alpha, \beta} \sum_{k \in B^*} (\log \hat{P}[k] - \alpha - \beta \log f_k)^2, \quad (9)$$

плоскостность спектра SFM, различающую виды спектров:

$$\text{SFM} = \frac{\exp\left(\frac{1}{K} \sum_k \log \hat{P}[k]\right)}{\frac{1}{K} \sum_k \hat{P}[k]} \in (0, 1], \quad K = \frac{N_w}{2} + 1. \quad (10)$$

Корректность суммирования и переходов к логарифмам обеспечивается положительностью $\hat{P}[k]$, а интерпретация интегральных признаков опирается на стандартные конструкции интегрального исчисления [11].

Итоговый вектор признаков $\mathbf{f} \in \mathbb{R}^p$ составляется конкатенацией $\{E_j\}_{j=1}^J$ и скалярных признаков $\{C, W, \beta, \text{SFM}\}$.

Далее для устранения коррелированности признаков и снижения размерности применяется метод главных компонент [12]. Пусть $\{z_m\}_{m=1}^M$ – стандартизованные векторы, тогда ковариационная матрица

$$\Sigma = \frac{1}{M-1} \sum_{m=1}^M (z_m - \bar{z})(z_m - \bar{z})^T, \quad \bar{z} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M z_m \quad (11)$$

имеет спектральное разложение $\Sigma = V\Lambda V^T$ с собственными значениями $\lambda_1 \geq \dots \geq \lambda_p$ и собственными векторами V_i . Искомое k -мерное представление $y = W_k z$ строится из ортонормального базиса главных направлений $W_k = [v_1, \dots, v_k]$, где v_i – собственные векторы Σ . Критерий выбора k задается долей объясненной дисперсии [14]:

$$\sum_{i=1}^k \lambda_i / \sum_{i=1}^p \lambda_i \geq \eta, \quad \eta \in [0,90; 0,99]. \quad (12)$$

В контексте последующей неконтролируемой кластеризации такой линейный «сжатый» признак $y \in \mathbb{R}^k$ служит удобной, малозумной площадкой для выявления латентной структуры [13].

На следующем этапе применяется модель-ориентированная кластеризация, где кластеры интерпретируются как компоненты вероятностной смеси. Будем считать, что каждое наблюдение $y_m \in \mathbb{R}^k$ порождается скрытой компонентой $Z_m \in \{1, \dots, K\}$ с априорными весами $\pi = (\pi_1, \dots, \pi_K)$, $\sum_k \pi_k = 1$ и условным распределением $\mathcal{N}(\mu_k, \Sigma_k)$. Тогда маргинальная плотность имеет вид

$$p(y_m, \theta) = \sum_{k=1}^K \pi_k N(y_m, \mu_k, \Sigma_k), \quad \theta = \{\pi_k, \mu_k, \Sigma_k\}_{k=1}^K. \quad (13)$$

Параметры θ оцениваются методом ожидания-максимизации (ЕМ), который является общим решением для моделей со скрытыми переменными. Пусть $Y = \{y_m\}_{m=1}^M$. Тогда логарифмическое правдоподобие наблюдений

$$L(\theta, Y) = \sum_{m=1}^M \log \left(\sum_{k=1}^K \pi_k N(y_m, \mu_k, \Sigma_k) \right), \quad (14)$$

что неудобно максимизировать из-за логарифма от суммы. ЕМ вводит скрытые индикаторы принадлежности и максимизирует ожидаемое полное логарифмическое правдоподобие. На шаге Е вычисляются апостериорные вероятности принадлежности точки m кластеру k :

$$\gamma_{mk} = P(Z_m = k | y_m, \theta^{(t)}) = \frac{\pi_k^{(t)} N(y_m | \mu_k^{(t)}, \Sigma_k^{(t)})}{\sum_{j=1}^K \pi_j^{(t)} N(y_m | \mu_j^{(t)}, \Sigma_j^{(t)})}. \quad (15)$$

Величины $\gamma_{mk} \in [0; 1]$ реализуют мягкую кластеризацию, то есть каждое наблюдение частично принадлежит всем кластерам. На шаге M параметры обновляются по замкнутым формулам максимума ожидаемого полного логарифмического правдоподобия:

$$N_k = \sum_{m=1}^M \gamma_{mk}, \quad \pi_k^{(t+1)} = \frac{N_k}{M}, \quad \mu_k^{(t+1)} = \frac{1}{N_k} \sum_{m=1}^M \gamma_{mk} y_m, \quad (16)$$

$$\Sigma_k^{(t+1)} = \frac{1}{N_k} \sum_{m=1}^M \gamma_{mk} (y_m - \mu_k^{(t+1)})(y_m - \mu_k^{(t+1)})^T. \quad (17)$$

Итерации ЕМ не уменьшают $L(\theta, Y)$ и сходятся к стационарной точке – локальному максимуму. При фиксированном $K=3$, что совпадает с предметной постановкой (нормальное, предаварийное и аварийное состояния КРУ), ЕМ дает естественную меру уверенности в виде $\max_k \gamma_{mk}$, позволяющую вводить строгое правило принятия или отклонения смены режима во времени и тем самым стабилизировать режимно-диагностическую карту.

Классическая связь с k -средними подчеркивается как предельный частный случай вероятностной смеси: если предположить равные априоры π_k и сферические ковариации $\Sigma_k = \sigma^2 I$ и затем $\sigma^2 \rightarrow 0$, то максимизация правдоподобия смеси сводится к минимизации суммы внутрикластерных квадратов:

$$\min_{\{\mu_c\}, \{c_m\}} \sum_{m=1}^M \left\| y_m - \mu_{c_m} \right\|_2^2, \quad c_m = \arg \max_k \gamma_{mk}. \quad (18)$$

Сопоставление кластеров с эксплуатационными состояниями выполняется апостериорно по фрагментам с надежной экспертной маркировкой. Каждому кластеру присваивается режим $r \in \{N, P, A\}$ на основании вероятностной уверенности модели смешанного гауссова распределения и геометрической близости.

На синхронизированной по длительности полученной экспериментальным путем выборке длительностью $L = 208386$ отсчетов с размером окна $N_w = 2048$ с перекрытием 50 % получено устойчивое и полноразмерное разделение трех эксплуатационных состояний КРУ. В пространстве главных компонент первые две компоненты вместе объясняют 70,67 % дисперсии; третья добавляет еще 9,57 %, что дает 80,24 % для трех компонент (рис. 2), при этом облака наблюдений «Нормальный» (N), «Предаварийный» (P) и «Аварийный» (A) компактны и геометрически разнесены. В таблице представлены полученные параметры компонент смешанного гауссова распределения в РСА-плоскости.

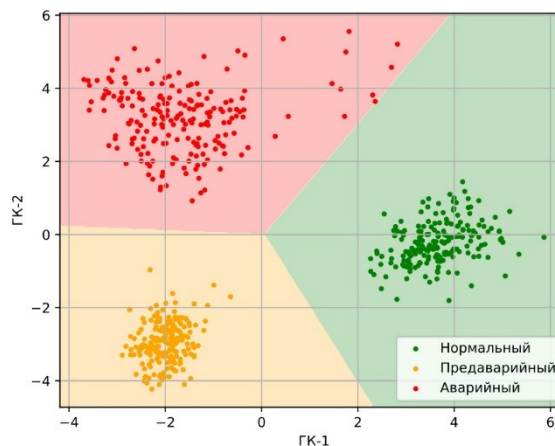


Рис. 2. Результаты анализа методом главных компонент

Параметры компонент смешанного гауссова распределения в PCA-плоскости

Компонента	Вес π_k	μ_x	μ_y	$\det(\Sigma_k)$	$\text{cond}(\Sigma_k)$
1	0,3333	3,663	-0,237	1,192e-01	2,08
2	0,3333	-1,998	-2,947	3,716e-02	2,71
3	0,3334	-1,664	3,183	1,096e+00	1,77

Веса π_k близки к $1/3$ для всех компонент, что согласуется с балансом данных. Средние координаты центра эллипса компоненты в PCA-плоскости μ_k лежат в разнесенных областях, формируя три устойчивых кластера. Детерминанты ковариаций $\det(\Sigma_k)$ показывают, что компонента 3 обладает наибольшей площадью рассеяния, компонента 2 – наименьшей. С физической точки зрения более широкий спектральный портрет возникает для режима с сильными разрядными проявлениями и неоднородным фоном, тогда как более компактный – для стабильного режима с узким спектральным выражением. Числа обусловленности 1,77–2,71 указывают на умеренную анизотропию эллипсов и умеренную численную устойчивость при вычислении величин γ_{mk} .

Неконтролируемые методы k -средних и модель смешанного гауссова распределения формируют три неперекрывающихся кластера, а полученные матрицы ошибок для обоих методов диагональны и составляют по 202 окна на диагонали для каждого режима (рис. 3). Это эквивалентно нулевым ошибкам I и II рода для всех классов ($\alpha=\beta=0$).

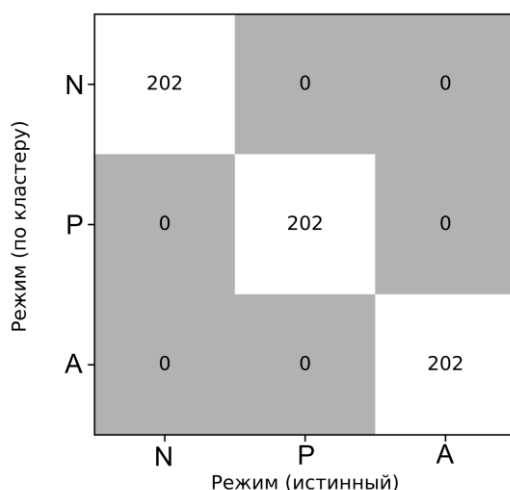


Рис. 3. Матрица ошибок

С практической точки зрения это означает, что выбранная признаковая репрезентация и понижение размерности формируют режимно-диагностическую карту, на которой состояния различаются без двусмысленности. Вероятностная модель

смешанного гауссова распределения дополняет геометрическую разделимость количественной мерой уверенности γ_{mk} , что позволяет вводить простое правило принятия решения по порогам и гистерезису без ухудшения качества.

Так как набор данных сформирован по одной записи на режим, в перспективе рассматривается адаптивное уточнение диагностической полосы с целью подтверждения обобщающей способности модели на расширенных корпусах данных с вариативной геометрией ячеек, типами дефектов и фоновым шумом. В совокупности результаты демонстрируют, что предложенная алгоритмическая обработка акустических сигналов обеспечивает требуемую диагностическую чувствительность к предаварийным и аварийным состояниям КРУ и может служить технологической основой для систем раннего предупреждения и поддержки решений в эксплуатационной практике [14, 15].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Росэнергонадзор. Отчет о состоянии энергетики РФ за 2024 г. М.: Минэнерго РФ, 2025. 150 с.
2. Ростехнадзор. Ежегодный отчет по состоянию промышленной безопасности за 2023–2024 гг.: с прогнозом на 2025 г. М.: Ростехнадзор, 2025. 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). URL: http://www.gosnadzor.ru/activity/trebovaniya_25_pr/ (дата обращения: 05.09.2025).
3. Ростехнадзор. Уроки из аварий в энергетике 2024 г. М.: Ростехнадзор, 2024. URL: <https://tk-servis.ru/news/1713516607/> (дата обращения: 05.09.2025).
4. Ростехнадзор. Сибирское управление. Сводка по авариям на энергоустановках. Новосибирск: Ростехнадзор, 2025. URL: <http://usib.gosnadzor.ru/info/> (дата обращения: 05.09.2025).
5. Хренников А.Ю. Основные методы диагностики состояния электрооборудования // Учеб.-метод. пособие. М.: ВЭИ, 2018. 120 с.
6. Беликов В.А., Галянин В.В., Орлов С.П. Анализ данных дистанционного зондирования земли для обнаружения нефтяных разливов // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2017. № 2 (54). С. 7–12. EDN: ZGBWEL
7. Фролов К.В. Создание информационно-измерительной системы защиты от дуговых и частичных разрядов в комплектных распределительных устройствах подстанций // Вестник Тихоокеанского государственного университета. 2024. № 2 (73). С. 17–30. DOI: 10.38161/1996-3440-2024-2-17-30. EDN: LZVVIS
8. Фролов К.В., Инаходова Л.М. Экспериментальное исследование информационных параметров акустического шума // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2024. № 2 (48). С. 25–31. DOI: 10.21685/2307-5538-2024-2-3. EDN: QMOYTX
9. Дворкович В.П., Дворкович А.В. Оконные функции для гармонического анализа сигналов. 2-е изд. М.: Техносфера, 2016. 208 с.
10. Оппенгейм А.В., Шафер Р.В. Цифровая обработка сигналов: пер. с англ. Новосибирск: НГТУ, 2003. Электрон. изд. (русс.). 916 с.
11. Фихтенгольц Г.М. Основы математического анализа: в 2 т. М.: Лань, 2008. Т. 1. 400 с.
12. Johnson R.A., Wichern D.W. Applied Multivariate Statistical Analysis. 6th ed. Upper Saddle River: Pearson, 2007. 773 p.
13. Рассел С., Норвиг П. Искусственный интеллект. Современный подход. Т. 3. Обучение, восприятие и действие; пер. с англ. М.: Диалектика, 2022. 640 с.
14. Пат. 2815081 С1 Российская Федерация. Устройство защиты от дуговых и частичных разрядов / Инаходова Л.М., Цынаева А.А., Фролов К.В. № 2023122367; заявл. 29.08.2023; опубл. 11.03.2024.
15. Пат. 2815919 С1 Российская Федерация. Способ защиты от дуговых и частичных разрядов / Инаходова Л.М., Цынаева А.А., Фролов К.В. № 2023129149; заявл. 10.11.2023; опубл. 25.03.2024.

Статья поступила в редакцию 10.09.2025

ALGORITHMIC PROCESSING OF ACOUSTIC SIGNALS FOR DETECTING PRE-EMERGENCY AND EMERGENCY STATES OF COMPLETE SWITCHGEAR

K.V. Frolov, L.M. Inakhodova¹

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskayast., Samara, 443100, Russian Federation

E-mail: rikso@mail.ru, inakhodova@mail.ru

Abstract. *The article presents a method for the algorithmic processing of acoustic signals to detect pre-emergency and emergency states of complete switchgear (CSG) units rated at 6–10 kV. The relevance is driven by a 10–15 % increase in CSG accident rates during 2024–2025, as reported by Rostekhnadzor, attributed to partial and arc discharges that cause downtime and economic losses in the fuel and energy complex. The aim of the study is to develop an approach for continuous monitoring based on spectral power density (SPD), principal component analysis (PCA), and a Gaussian mixture model (GMM) with the expectation-maximization (EM) algorithm. An experimental setup equipped with two acoustic sensors was utilized to record signals across three modes: normal, pre-emergency, and emergency. The method encompasses SPD estimation using the Welch method with Hamming windows, the formation of spectral features, dimensionality reduction, and clustering. A mode-diagnostic map, stabilized by hysteresis, is proposed. Results demonstrate a classification accuracy of 100 % on a dataset of 208,386 samples, with a confidence measure exceeding 0.9 and a diagonal error matrix. The novelty of the method lies in the integration of the Gaussian mixture model with hysteresis to enhance robustness under noisy conditions. The practical significance of the method lies in establishing a foundation for early warning systems capable of reducing CSG accident rates.*

Keywords: *acoustic diagnostics, partial and arc discharges, spectral power density, spectral features, clustering, mode-diagnostic map, continuous monitoring, principal component analysis*

REFERENCES

1. Rosenergonadzor. Otchet o sostoyanii energetiki RF za 2024 g. [Report on the State of the Russian Federation Energy Sector for 2024] M.: Minenergo RF, 2025. 150 p. (In Russian)
2. Rostekhnadzor. Ezhegodnyj otchet po sostoyaniyu promyshlennoj bezopasnosti za 2023–2024 gg.: s prognozom na 2025 g. [Annual Report on the State of Industrial Safety for 2023–2024: with a Forecast for 2025]. M.: Rostekhnadzor, 2025. 1 elektron. opt. disk (CD-ROM). URL: http://www.gosnadzor.ru/activity/trebovaniya_25_pr/ (accessed: 05.09.2025). (In Russian)
3. Rostekhnadzor. Uroki iz avarij v energetike 2024 g. [Lessons from Accidents in the Energy Sector in 2024]. M.: Rostekhnadzor, 2024. URL: <https://tk-servis.ru/news/1713516607/> (accessed: 05.09.2025). (In Russian)



© The Author(s), 2025

¹ Kirill V. Frolov, Postgraduate Student, Dept. of of Automated Electric Power Systems. Lolita M. Inakhodova (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor, Dept. of Automated Electric Power Systems.

4. Rostekhnadzor. Sibirskoe upravlenie. Svodka po avariyam na energoustanovkah [Summary of Accidents at Power Installations]. Novosibirsk: Rostekhnadzor, 2025. URL: <http://usib.gosnadzor.ru/info/> (accessed: 05.09.2025). (In Russian)
5. *Hrennikov A.Yu.* Osnovnye metody diagnostiki sostoyaniya elektrooborudovaniya [Main Methods for Diagnosing the Condition of Electrical Equipment: A Study Guide] // Ucheb.-metod. posobie. M.: VEI, 2018. 120 p. (In Russian)
6. *Belikov V.A., Galyanin V.V., Orlov S.P.* Analiz dannyh distancionnogo zondi-rovaniya zemli dlya obnaruzheniya neftnykh razlivov [Analysis of Remote Sensing Data for Oil Spill Detection] // Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki. 2017. No. 2(54). Pp. 7–12. (In Russian)
7. *Frolov K.V.* Sozdanie informacionno-izmeritel'noy sistemy zashchity ot dugovykh i chastichnykh razryadov v komplektnykh raspredelitel'nykh ustroystvakh podstancij [Development of an Information-Measuring System for Protection against Arc and Partial Discharges in Substation Switchgears] // Vestnik Tihookeanskogo gosudarstvennogo universiteta. 2024. No. 2(73). Pp. 17–30. DOI: 10.38161/1996-3440-2024-2-17-30. (In Russian)
8. *Frolov K.V., Inahodova L.M.* Eksperimental'noe issledovanie informatsionnykh parametrov akusticheskogo shuma [Experimental Study of Informative Parameters of Acoustic Noise] // Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol. 2024. No. 2(48). Pp. 25–31. DOI: 10.21685/2307-5538-2024-2-3. (In Russian)
9. *Dvorkovich V.P., Dvorkovich A.V.* Okonnye funktsii dlya garmonicheskogo analiza signalov [Window Functions for Harmonic Analysis of Signals]. 2-e izd. M.: Tekhnosfera, 2016. 208 p. (In Russian)
10. *Oppengejm A.V., Shafer R.V.* Cifrovaya obrabotka signalov [Digital Signal Processing]. Novosibirsk: NGTU, 2003. Elektron. izd. (russk.). 916 p. (In Russian)
11. *Fihhtengolc G.M.* Osnovy matematicheskogo analiza [Fundamentals of Mathematical Analysis]. M.: Lan, 2008. Vol. 1. 400 p. (In Russian)
12. *Johnson R.A., Wichern D.W.* Applied Multivariate Statistical Analysis. 6th ed. Upper Saddle River: Pearson, 2007. 773 p.
13. *Rassel S., Norvig P.* Iskusstvennyy intellekt. Sovremennyy podhod [Artificial Intelligence: A Modern Approach]. Vol. 3. Obuchenie, vospriyatie i dejstvie; per. s angl. M.: Dialektika, 2022. 640 p. (In Russian)
14. Pat. 2815081 C1 Rossijskaya Federaciya. Ustrojstvo zashchity ot dugovykh i chastichnykh razryadov [Device for protection against arc and partial discharges] / *Inahodova L.M., Cynaeva A.A., Frolov K.V.* No. 2023122367; zayavl. 29.08.2023; opubl. 11.03.2024. (In Russian)
15. Pat. 2815919 C1 Rossijskaya Federaciya. Sposob zashchity ot dugovykh i chastichnykh razryadov [Method for protection against arc and partial discharges] / *Inahodova L.M., Cynaeva A.A., Frolov K.V.* No. 2023129149; zayavl. 10.11.2023; opubl. 25.03.2024. (In Russian)

Original article submitted 10.09.2025