

ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ:

промышленность и транспорт

№ 2 (51)
2025



16+

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ





Издается
с января 2004 г.

ISSN 2500-0586

Главный редактор журнала
В. И. Лысак — академик РАН,
д-р техн. наук, профессор

Редакционная коллегия:

Е. В. Балакина — д.т.н., проф. ВолгГТУ
А. В. Баранов — д.ф.-м.н.,
проф. РГУ нефти и газа, г. Москва
А. Б. Голованчиков — д.т.н., проф. ВолгГТУ
А. Е. Городецкий — д.т.н.,
проф. ИГиМаш РАН, г. Санкт-Петербург
А. В. Дмитриев — д.т.н.,
проф. КГЭУ, г. Казань
А. Ю. Дунин — д.т.н., проф. МГТУ
(МАДИ), г. Москва
В. Ф. Желтобрюхов — д.т.н.,
проф. ВолгГТУ, г. Волгоград
А. В. Келлер — д.т.н., проф. Московского
политехнического университета, г. Москва
И. А. Коняхин — д.т.н., проф. ИТМО,
г. Санкт-Петербург
В. В. Коротаев — д.т.н., проф. ИТМО,
г. Санкт-Петербург
Г. О. Котиев — д.т.н., проф. МГТУ
им. Н. Э. Баумана, г. Москва
А. А. Львов — д.т.н., проф. СГТУ
им. Гагарина Ю. А., г. Саратов
В. А. Марков — д.т.н., проф. МГТУ
им. Н. Э. Баумана, г. Москва
Е. Р. Мошев — д.т.н.,
проф. ПНИПУ, г. Пермь
А. Е. Новиков — чл.-корр. РАН, д.т.н.,
проф. ВолгГТУ
Е. А. Федянов — д.т.н., проф. ВолгГТУ
Н. М. Филькин — д.т.н., проф. ИжГТУ
им. М. Т. Калашникова, г. Ижевск
А. Н. Шилин — д.т.н., проф. ВолгГТУ

Ответственный секретарь
П. С. Васильев — к.т.н., доц. ВолгГТУ
Тел. +7 (8442) 24-84-31

Журнал распространяется
по подписке.
Индекс журнала
по объединенному каталогу
«Пресса России» — 94193
https://www.pressa-rf.ru/cat/1/edition/y_e94193/

Тел. издательства ВолгГТУ:
+7 (8442) 24-84-08
+7 (8442) 24-84-05
e-mail: zavrio@vstu.ru

Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт научно-технический журнал

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору
в сфере связи, информационных технологий и массовых
коммуникаций (Роскомнадзор)
ПИ № ФС77-64543 от 22 января 2016 г.

№ 2 (51)
Июнь
2025

УЧРЕДИТЕЛЬ:
ФГБОУ высшего образования
«Волгоградский государственный технический
университет»
Периодичность: четыре раза в год

Адрес редакции:
РФ, 400005, Волгоград, просп. В. И. Ленина, 28
Гл. редактор: телефон: +7 (8442) 24-80-03
e-mail: lysak2@vstu.ru

Отв. секретарь: телефон: +7 (8442) 24-84-31
e-mail: pahp@vstu.ru

Официальный сайт Учредителя: www.vstu.ru

Печатается по решению редакционно-издательского совета
Волгоградского государственного технического университета

Авторское право на журнал в целом принадлежит
Учредителю, на отдельные статьи — сохраняется за авторами

*Перепечатка из журнала «Энерго- и ресурсосбережение:
промышленность и транспорт» категорически запрещена без
оформления договора в соответствии с действующим
законодательством РФ*

*При перепечатке материалов ссылка на журнал «Энерго-
и ресурсосбережение: промышленность и транспорт» обязательна*

Статьи печатаются бесплатно



Published since
January 2004 г.

ISSN 2500-0586

Editor-in-chief

V. I. Lysak – Academician of RAS,
D. Sc. (Technical), Professor

Editorial Board:

E. V. Balakina – D. Sc. (Engineering),
Prof., VSTU, Volgograd
A. V. Baranov – D. Sc. (Physical and Math.),
Prof., Gubkin University, Moscow.
A. B. Golovanchikov – D. Sc. (Engineering),
Prof., VSTU, Volgograd
A. E. Gorodetskij – D. Sc. (Engineering),
Prof., IPME, St. Petersburg
A. V. Dmitriev – D. Sc. (Engineering),
Prof. KSPEU, Kazan
A. Yu. Dunin – D. Sc. (Engineering),
Prof. MADI, Moscow
V. F. Zheltobryukhov – D. Sc. (Engineering),
Prof. VSTU, Volgograd
A. V. Keller – D. Sc. (Engineering),
Prof. Prof. Moscow Poly, Moscow
I. A. Konyakhin – D. Sc. (Engineering),
Prof. ITMO University, St. Petersburg
V. V. Korotaev – D. Sc. (Engineering),
Prof. ITMO University, St. Petersburg
G. O. Kotiev – D. Sc. (Engineering),
Prof. BMSTU, Moscow
A. A. L'vov – D. Sc. (Engineering),
Prof. SSTU, Saratov
V. A. Markov – D. Sc. (Engineering),
Prof. BMSTU, Moscow
E. R. Moshev – D. Sc. (Engineering),
Prof. PNRPU, Perm
A. E. Novikov – Corresponding Member
of RAS, D. Sc. (Engineering),
Prof. VSTU, Volgograd
E. A. Fedyanov – D. Sc. (Engineering),
Prof. VSTU, Volgograd
N. M. Filkin – D. Sc. (Engineering),
Prof. ISTU, Izhevsk
A. N. Shilin – D. Sc. (Engineering),
Prof. VSTU, Volgograd

Executive Secretary
P. S. Vasilyev – PhD, Associate Prof.
Тел. +7 (8442) 24-84-31

The journal is distributed by subscription.
Index of the magazine according to the unit-
ed catalog «Press of Russia» – 94193.
[https://www.pressa-
rf.ru/cat/1/edition/y_e94193/](https://www.pressa-rf.ru/cat/1/edition/y_e94193/)

VSTU Publisher tel.:

+7 (8442) 24-84-08

+7 (8442) 24-84-05

e-mail: zavrio@vstu.ru

© Volgograd State Technical University,
«Energo- i resursosberezhenie: promyshlennost' i transport», 2025

Energo- i resursosberezhenie: promyshlennost' i transport (Energy and Resource Saving: Industry and Transport) science-technical journal

Journal is registered in the Federal Service for supervision
of communications, information technology and mass media
(Roscomnadzor) registration certificate:
ПН N° (ФС77-64543, registration date: 22 January 2016

**№ 2 (51)
June
2025**

FOUNDER:

**Federal State Budgetary Educational Institution of Higher
Education «Volgograd State Technical University»**

Periodicity: four times per year

Editorial office address:

Russia, 400005, Volgograd, Lenin avenue, 28

Editor-In-Chief: tel.: +7 (8442) 24-80-03

e-mail: lysak2@vstu.ru

Executive Secretary: +7 (8442) 24-84-31

e-mail: pahp@vstu.ru

Official website: www.vstu.ru

Published by the decision of editorial review board
of Volgograd State Technical University

***The copyright for the journal in general belongs to the Founder,
for separate articles – retained by the authors***

Reprint from the journal «Energo- i resursosberezhenie: promyshlennost' i transport» is strongly forbidden -without conclusion of an agreement in accordance with the current legislation of the Russia Federation

When reprint the materials, the citation to the journal «Energo- i resursosberezhenie: promyshlennost' i transport» is obligatory

The articles are published for free

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

Атрашенко О. С. 46, 50, 53
Ахмедова О. О. 46, 50
Богале М. А. 6
Борисов А. С. 15
Голованов И. Ю. 58
Кетов Д. Ю. 23, 29
Козлов А. В. 58
Коновалова Л. А. 6, 36
Копейкина Т. В. 46, 50
Коптелова И. А. 15, 36

Лагуткин М. Г. 58
Мак Б. В. 15
Нефедьев А. И. 23, 29
Риль И. А. 43
Сошинов А. Г. 46, 50
Степанченко Д. В. 53
Таран Ю. А. 58
Храмов В. Н. 43
Шилин А. Н. 6, 36

AUTHOR INDEX

Akhmedova O. O. 46, 50
Atrashenko O. S. 46, 50, 53
Bogale M. A. 6
Borisov A. S. 15
Golovanov I. Yu. 58
Ketov D. Yu. 23, 29
Khramov V. N. 43
Konovalova L. A. 6, 36
Kopeykina T. V. 46, 50
Koptelova I. A. 15, 36

Kozlov A. V. 58
Lagutkin M. G. 58
Mac B. V. 15
Nefed'ev A. I. 23, 29
Ril' I. A. 43
Shilin A. N. 6, 36
Soshinov A. G. 46, 50
Stepanchenko D. V. 53
Taran Yu. A. 58

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Шилин А. Н., Коновалова Л. А., Богале М. А.</i> Модель искусственной нейросети для прогнозирования объема воды в водохранилище.....	6
<i>Коптелова И. А., Мак Б. В., Борисов А. С.</i> Определение оптического коэффициента полезного действия оптико-электронных приборов с помощью аппарата нечеткой логики.....	15
<i>Кетов Д. Ю., Нефедьев А. И.</i> Оценка погрешности информационно-измерительной системы для контроля технического состояния электроэнцефалографа.....	23
<i>Кетов Д. Ю., Нефедьев А. И.</i> Система фиксации нарушений в работе гистологических процессоров при первичной диагностике.....	29
<i>Шилин А. Н., Коптелова И. А., Коновалова Л. А.</i> Методика морфологического синтеза приборов на основе метода и анализа иерархий.....	36
<i>Риль И. А., Храмов В. Н.</i> Влияние динамической фокусировки лазерного пучка на параметры лазерной перфорации отверстий.....	43
<i>Сошинов А. Г., Копейкина Т. В., Атрашенко О. С., Ахмедова О. О.</i> Прогнозирование и управление сроком службы силовых трансформаторов.....	46
<i>Сошинов А. Г., Копейкина Т. В., Атрашенко О. С., Ахмедова О. О.</i> Обзор механизмов ценообразования для совместного хранения энергии.....	50
<i>Атрашенко О. С., Степанченко Д. В.</i> Анализ нагрузки на энергосистемы при массовом внедрении электромобилей: временные и территориальные аспекты.....	53
<i>Козлов А. В., Таран Ю. А., Лагуткин М. Г., Голованов И. Ю.</i> Анализ конструкций аппаратов с фильтрующим элементом и перспективы их совершенствования для нефтедобычи.....	58
К сведению авторов.....	67

CONTENTS

<i>Shilin A. N., Konovalova L. A., Bogale M. A.</i> An artificial neural network model for predicting the volume of water in a reservoir.....	6
<i>Koptelova I. A., Mac B. V., Borisov A. S.</i> Determination of optical efficiency of optoelectronic devices using a fuzzy logic device.....	15
<i>Ketov D. Yu., Nefed'ev A. I.</i> Error assessment of the information and measuring system for controlling the technical condition of an electroencephalograph.....	23
<i>Ketov D. Yu., Nefed'ev A. I.</i> System for recording disorders in the functioning of histological processors in primary diagnosis.....	29
<i>Shilin A. N., Koptelova I. A., Konovalova L. A.</i> The methodology of morphological synthesis of devices based on the method and analysis of hierarchies.....	36
<i>Ril' I. A., Khramov V. N.</i> The influence of the dynamic focusing of the laser beam on parameters of the holes laser perforation.....	43
<i>Soshinov A. G., Kopeykina T. V., Atrashenko O. S., Akhmedova O. O.</i> Forecasting and management of the service life of power transformers.....	46
<i>Soshinov A. G., Kopeykina T. V., Atrashenko O. S., Akhmedova O. O.</i> A review of pricing mechanisms for collective energy storage.....	50
<i>Atrashenko O. S., Stepanchenko D. V.</i> Analysis of the load on power systems during massive introduction of electric vehicles: temporal and territorial aspects.....	53
<i>Kozlov A. V., Taran Yu. A., Lagutkin M. G., Golovanov I. Yu.</i> Analysis of the designs of devices with a filter element and the prospects for their improvement for oil production.....	58

УДК 621.22
DOI: 10.35211/2500-0586-2025-2-51-6-15

А. Н. Шилин, Л. А. Коновалова, М. А. Богале

**МОДЕЛЬ ИСКУССТВЕННОЙ НЕЙРОСЕТИ
ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОБЪЕМА ВОДЫ В ВОДОХРАНИЛИЩЕ**

Волгоградский государственный технический университет
eltech@vstu.ru, mila27121989@mail.ru, mulem2as1977@gmail.com

Автор, ответственный за переписку:
Людмила Александровна Коновалова, mila27121989@mail.ru

Прогнозирование объема воды в водохранилищах критически важно для безопасной эксплуатации гидроэлектростанций и эффективного управления ресурсами. Поскольку эта задача нелинейна, в исследовании применен метод искусственной нейронной сети – многослойный персептрон (MLP). Были разработаны различные архитектуры моделей с вариативным числом нейронов в скрытом слое, учитывая отсутствие строгих правил их выбора. Точность моделей оценена через сравнение прогнозируемого и фактического притока воды с использованием статистических метрик, широко применяемых в гидрологическом моделировании. Результаты демонстрируют успешное предсказание паводкового стока в водохранилище, подтверждая эффективность подхода.

Ключевые слова: приток в коллектор, прогнозирование, искусственная нейронная сеть, многослойный персептрон, гидроэлектростанция

A. N. Shilin, L. A. Konovalova, M. A. Bogale

**AN ARTIFICIAL NEURAL NETWORK MODEL FOR PREDICTING
THE VOLUME OF WATER IN A RESERVOIR**

Volgograd State Technical University

Forecasting the water volume in reservoirs is critical for the safe operation of hydroelectric power plants and efficient resource management. Since this problem is nonlinear, the study applies the artificial neural network method - multilayer perceptron (MLP). Different model architectures with a variable number of neurons in the hidden layer were developed, given the lack of strict rules for their selection. The accuracy of the models is assessed by comparing the predicted and actual water inflow using statistical metrics, widely used in hydrological modeling. The results demonstrate successful prediction of flood runoff in the reservoir, confirming the effectiveness of the approach. *Keywords:* electric charging station, electric vehicle, modernization, infrastructure.

Keywords: inflow into the reservoir, forecasting, artificial neural network, multilayer perceptron, hydroelectric power plant

Введение

Обеспечение водными ресурсами – ключевая глобальная проблема, усугубляемая изменением климата. Водохранилища ГЭС играют важную роль в распределении водных ресурсов, однако управление ими требует контроля баланса притока и расхода, зависящих от метеорологических условий, потребления и экологических требований. Прогнозирование при-

тока критически важно для предотвращения наводнений и планирования энергопотребления. Точный прогноз осложняется множеством случайных факторов, что требует применения специализированных методов, таких как нейронные сети.

Искусственные нейронные сети (ИНС) [1] – математические модели, имитирующие работу биологических нейронов. Их нелинейность

и способность к обобщению позволяют эффективно обрабатывать данные даже при отклонениях от обучающих выборок. Интеграция ИНС в информационно-измерительные системы (с датчиками и управляющими ЭВМ) повышает точность прогнозов притока воды, обеспечивая устойчивое управление ресурсами.

Система автоматического регулирования уровня воды в водохранилище ГЭС

Для решения этой проблемы была разработана информационно-измерительная система (ИИС) регулирования уровня воды в водохранилище ГЭС [2; 3], представленная на рис. 1. ИИС содержит датчики основных факторов, влияющих на уровень воды. Это две группы: климатические и водные. Климатические датчики: температуры воздуха 1, уровня осадков 2, уровня снежного покрова 3 (в случае использования в северных широтах), влагосодержания почв 4, глубины промерзания 5, которые установлены на берегу реки. Водные датчики: испарения воды 6, находящиеся на поверхности воды, уровня воды 7, расхода притока 8 и водопотребления 9, размещенные под водой. Все датчики, климатические и водные, размещены по обеим сторонам плотины. Датчики 1–9 соединены с управляющей ЭВМ 13, содержащей нейронный процессор 14, который формирует прогноз уровня воды и приток воды в водохранилище и на основании этой информации планирует расход воды по потребителям с учетом их приоритетов и риска наводнения, и интерфейс 15. ЭВМ 13 осуществляет управление затвором водосброса 10 через электропривод 12.

Система автоматического регулирования уровня воды в водохранилище ГЭС реализуется следующим образом. Датчики ИИС 1–9 формируют массив данных для передачи на ЭВМ 13 с нейронным процессором 14, который симулирует искусственную нейронную сеть, обученную на прогнозирование с заданным горизонтом в N дней или месяцев уровня воды и притока воды. Нейронный процессор 14 выполняет прогноз, фактически аппроксимируя функции изменения уровня воды и притока воды в водохранилище на основе информации, полученной по каналам передачи данных от датчиков 1–9.

Нейронный процессор 14 работает в режимах обучения ИНС и опроса обученной ИНС для прогнозирования значения упомянутой величины и переобучения ИНС после сравнения спрогнозированного ею значения с реально за-

фиксированным значением. В режимах обучения и переобучения (повторного обучения) ЭВМ 13 с помощью программы обрабатывает массивы информации, сравнивая входные данные с реально зарегистрированными значениями уровня воды и притока воды в водохранилище. Полученные таким способом массивы именуются в теории нейроинформатики как «учебники» (переобучение подразумевает постоянное обновление «учебников» с течением времени). Далее с использованием стандартных алгоритмов (например, алгоритма, основанного на методе обратного распространения ошибки) нейронный процессор 14 выполняет обучение, то есть корректировку весов синаптических связей ИНС, после чего по достижении допустимой погрешности (непрерывно сравнивая выходное значение, отраженное в «учебнике», с тем значением, которое сгенерировала ИНС) прекращает обучение. После этого нейронный процессор 14 выполняет на основе текущих входных данных опрос обученной ИНС на предмет будущих значений уровня воды и притока воды в водохранилище, то есть осуществляет прогнозирование с заданным упреждением в N дней или месяцев. По мере того, как регистрируются реальные значения этих прогнозируемых величин (то есть по мере приближения к дате прогноза), возникает возможность сравнения реальных и сгенерированных ИНС значений, а также обновления «учебника» и переобучения ИНС.

При прогнозе, сформированном нейронным процессором 14, согласно которому через N дней или месяцев уровень воды в водохранилище может превысить форсированный подпорный уровень (ФПУ), а приток в водохранилище превысит максимальный расход воды через турбины, ЭВМ 13 осуществляет расчет поэтапного, плавного (по каждому из N дней до паводка) нарастания сработки (сработка водохранилища – понижение уровня воды при использовании накопленного ее запаса в большем количестве, чем поступает в водоем с водосбора) воды, то есть решая задачу определения водно-энергетического и водно-хозяйственного режима сработки-наполнения водохранилища с упреждением. После этого ЭВМ 13 с учетом средней погрешности прогнозирования, выполненного нейронным процессором 14, подает соответствующую команду на электропривод 12 затвора водосброса 10 с целью увеличения пропуска воды и увеличения мощности, гене-

рируемой электростанцией. На каждый из последующих дней до прогнозируемого паводка искусственная нейронная сеть 14 сдвигает окно прогнозирования также на один день (месяц) и выполняет новый (уточненный) прогноз указанных выше двух величин, корректируя предыдущий план сработки воды до паводка. В соответствии с откорректированным планом

ЭВМ 13 подает очередную команду на электропривод 12 затвора 10. Таким образом, реализуется плавное регулирование уровня воды в водохранилище до паводка во избежание резких сбросов воды в процессе паводка. Уменьшение сбросов воды мимо турбин (холостых сбросов) приводит к росту генерируемой электроэнергии.

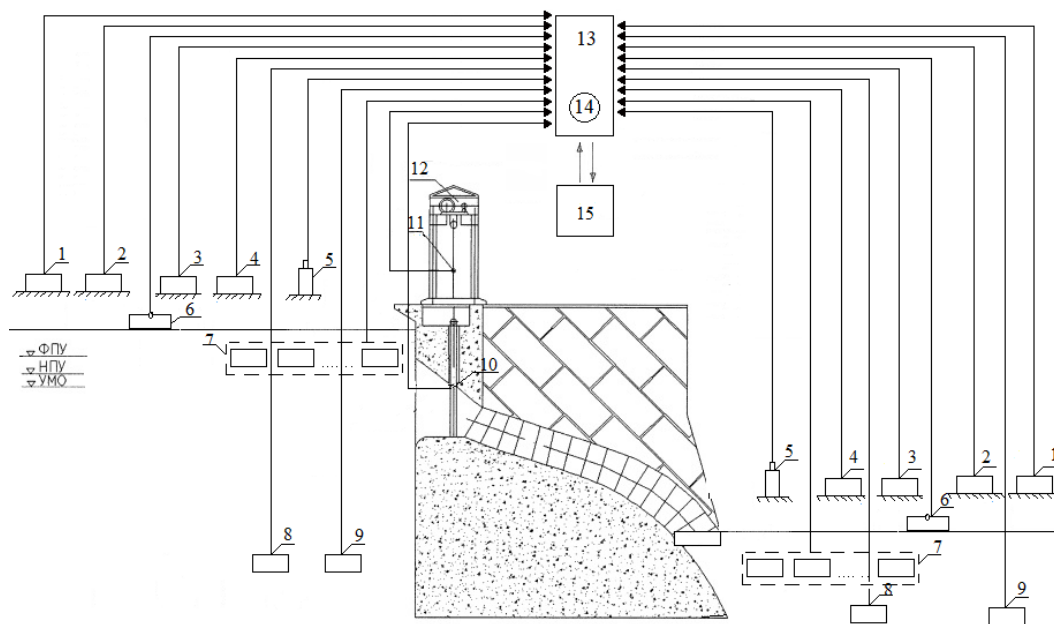


Рис. 1. Система автоматического регулирования уровня воды в водохранилище ГЭС

Во время паводка система регулирования уровня воды водохранилища работает в усиленном режиме. Агрегаты в верхнем бьефе водохранилища ГЭС работают аналогично агрегатам в нижнем бьефе. Предлагаемая система контроля уровня воды осуществляет мониторинг уровня воды в водохранилище посредством датчиков 1–9. Полученные данные обрабатываются ЭВМ 13, которая использует заложенный в ней алгоритм для определения мгновенной v_i (в i -й момент времени) и среднеквадратичной v_{cp} скоростей изменения уровня воды в водохранилище. Уровни воды вычисляются по формулам [4]:

$$v_{cp} = \sqrt{\frac{v_i^2 + v_{i+1}^2 + \dots + v_n^2}{n}}, \quad (1)$$

$$v_i = \lim_{\Delta t_i \rightarrow 0} \frac{\Delta x_i}{\Delta t_i},$$

где Δx_i – изменение уровня воды в водохранилище за промежуток времени Δt_i ; n – количество измерений.

Таким образом, ЭВМ 13, оснащенная нейронным процессором 14, выполняет функции обработки данных, рассчитывает скорость из-

менения уровня воды в водохранилище и принимает решение о регулировании затвора 10. Для этого используется значение среднеквадратичной скорости изменения уровня воды, которая определяет скорость открытия/закрытия затвора. При большом значении среднеквадратичной скорости изменения уровня воды выдержка по времени будет меньше, а скорость открытия/закрытия затвора будет выше. Наряду с этим использование значения скорости обеспечивает возможность оперативного управления затвором. Если уровень воды превышает оптимальную наивысшую отметку (НПУ) водной поверхности водохранилища, система переходит в режим повышенной готовности и проверяет состояние затвора 10. После анализа данных о среднеквадратичной скорости изменения уровня воды в водохранилище, вычисленной по показателям датчиков в бьефах, система определяет необходимую скорость открытия затвора 10 и время задержки для исключения случайного или слишком частого срабатывания системы регулирования. Вслед за этим система принимает решение об открытии

затвора 10 с определенными ранее параметрами. На протяжении регулирования система непрерывно осуществляет мониторинг параметров: уровня воды в разных точках, баланс прихода и расхода воды, исправности элементов системы регулирования. Когда система устанавливает снижение уровня воды ниже НПУ, осуществляется проверка возможности закрытия затвора 10, при которой система регулирования определяет наличие или отсутствие паводка, сравнивая данные о средней скорости изменения уровня воды, вычисленные по показаниям датчиков в бьефах. Если система в момент паводка обнаруживает угрозу для прибрежных территорий, она автоматически открывает затвор 10 на максимальную величину для быстрого сброса излишнего количества воды из водохранилища. Если система определяет, что открытие затвора 10 на максимальную величину необходимо, чтобы не привести к негативным последствиям, например, к разрушению дамбы или подтоплению населенных пунктов, то система может принять решение о постепенном открытии затвора 10 с задержкой времени. В процессе работы система непрерывно производит мониторинг положения

затвора 10, уровня воды в разных точках и исправности элементов системы регулирования. При неисправности какого-либо элемента системы регулирования, система автоматически переходит в режим аварийной остановки, чтобы предотвратить возможные аварии и катастрофы. Взаимодействие оператора с предлагаемой системой для возможности внесения корректировок в технологический процесс регулирования, проведения диагностики оборудования и наблюдения за контролируемой системой величинами осуществляется через ЭВМ 13.

Для настройки ИНС использованы данные ГЭС «Кока» (Эфиопия). На основе гидрологических параметров и притока воды (метеоданные за 2012–2013 гг., табл. 1) проведено обучение и тестирование моделей с вариативным числом узлов. Анализ водного баланса выявил влияние осадков, испарения и уровня водохранилища на приток. Данные разделены на обучающую (80 % – 20 месяцев) и тестовую (20 % – 4 месяца) выборки. Результаты подтвердили высокую точность прогноза притока, что демонстрирует эффективность ИНС для управления ресурсами.

Таблица 1

**Информация о входных и выходных переменных
в соответствии с наблюдениями метеостанции**

Дата	Испарение, мм	Осадки, мм	Уровень воды, м	Приток воды, млн. куб. м
	x_1	x_2	x_3	y
01/01/2012	204,6	28,7	109	10,65
02/01/2012	134	20	107,9	6,23
03/01/2012	210,8	20	107	27,1
04/01/2012	198	12,23	106	22,17
05/01/2012	189,1	14,36	105	89,73
06/01/2012	171	93,1	104,5	68,89
07/01/2012	161,2	251,9	106	377,3
08/01/2012	151,9	251,9	108,5	893,49
09/01/2012	141	133,7	110,7	267,38
10/01/2012	192	20	110,5	43,94
11/01/2012	192	20	109,7	24,6
12/01/2012	186	20	109	11,83
01/01/2013	204,6	28,7	108	8,65
02/01/2013	134	20	107,5	7,66
03/01/2013	210,8	20	106,5	23,49
04/01/2013	198	12,23	105,5	44,59
05/01/2013	189,1	14,36	105	39

Окончание табл. 1

Дата	Испарение, мм	Осадки, мм	Уровень воды, м	Приток воды, млн. куб. м
	x_1	x_2	x_3	y
06/01/2013	171	93,1	104	68,63
07/01/2013	161,2	251,9	107	482,06
08/01/2013	151,9	251,9	109,5	833,89
09/01/2013	141	133,7	110	405,95
10/01/2013	192	20	110,4	45,13
11/01/2013	192	20	109,5	25,97
12/01/2013	186	20	109	12,48

Программа Python [5] автоматически выполнила нормализацию данных в соответствии с требованиями к их формату на входе нейронной сети (см. рис. 2).

```
array([[0.00498163, 0.0687195, 0.9192709, 0.7462683 ],
       [0.02352186, 0.03241958, 1.0000001, 0.44776154],
       [0.01796542, 0.03241958, 0.8333334, 0.2985077 ],
       [0.09410996, 0.00888722, 0.7174479, 0.14925385],
       [0.07062192, 0.3374223, 0.48177087, 0.07462692],
       [0.41822016, 1.0, 0.35416663, 0.2985077 ],
       [1.0, 1.0, 0.23307288, 0.67164135],
       [0.29433313, 0.5068219, 0.09114587, 1.000001 ],
       [0.04250164, 0.03241958, 0.7552084, 0.97014904],
       [0.02070419, 0.03241958, 0.7552084, 0.8507471 ],
       [0.00631157, 0.03241958, 0.6770834, 0.7462683 ],
       [0.0027275, 0.0687195, 0.9192709, 0.5970144 ],
       [0.0016117, 0.03241958, 0.0, 0.5223875 ],
       [0.01945315, 0.03241958, 1.0000001, 0.3731346 ],
       [0.04323423, 0.0, 0.8333334, 0.22388077],
       [0.03693393, 0.00888722, 0.7174479, 0.14925385],
       [0.07032888, 0.3374223, 0.48177087, 0.0 ],
       [0.53629154, 1.0, 0.35416663, 0.44776154],
       [0.932827, 1.0, 0.23307288, 0.8208952 ]], dtype=float32)
```

Рис. 2. Структурный синтез нейронной сети

При проектировании нейронной сети использована формула, являющаяся следствием теорем Арнольда – Колмогорова – Хехта-Нильсена, которая определяет необходимое число синаптических весов. С помощью этой форму-

лы определено минимальное число нейронов, необходимых для приближения любой непрерывной функции на заданном компакте с заданной точностью. Формула имеет следующий вид [6]:

$$\frac{N_y \cdot Q}{1 + \log_2 Q} \leq N_w \leq N_y \left(\frac{Q}{N_x} + 1 \right) (N_x + N_y + 1) + N_y, \quad (2)$$

где N_y – размерность выходного сигнала; Q – число элементов обучающей выборки; N_w – необходимое число синаптических весов; N_x – размерность входного сигнала. С помощью этой формулы получены следующие результаты: $3,76 \leq N_w \leq 37,5$. При этом число нейронов скрытого слоя двухслойного персептрона определяется формулой:

$$N = \frac{N_w}{N_x + N_y}. \quad (3)$$

С помощью вышеприведенных формул при $N_x = 3$, $N_y = 1$, $Q = 20$ получены минимальные

и максимальные значения $N = 1$ и $N = 9$. Далее определена модель с нейронами (выбрав от 1 до 9 в зависимости от производительности) в первом скрытом слое и 1 нейроном в выходном слое, чтобы предсказать приток. Использованы функция потерь средней абсолютной ошибки и эффективная версия Adam для стохастического градиентного спуска. Модель рассчитана на 295 тренировочных периодах.

Обучение нейронной сети является одним из основных этапов в разработке и использовании таких сетей. На этом этапе нейронная сеть

настраивается на конкретную задачу путем обучения на обучающих данных. Процесс включает следующие шаги: подготовка данных – обучающие данные должны быть предварительно подготовлены и структурированы таким образом, чтобы они были пригодны для обучения сети. Это может включать в себя предобработку данных, такую как нормализация, удаление выбросов или заполнение пропущенных значений; определение архитектуры сети: нейронная сеть состоит из слоев нейронов, которые соединены между собой. На этом этапе определяется структура сети, включая количество слоев, количество нейронов в каждом слое и типы активационных функций; инициализация весов: веса нейронной сети инициализируются случайными значениями. Это начальные значения, с которых начинается процесс обучения сети; прямой проход: обучающие данные передаются через нейронную сеть, происходит вычисление выходного значения сети; расчет функции потерь: функция потерь используется для определения разницы между выходными данными, полученными от нейронной сети, и ожидаемыми выходными данными. Чем меньше значение функции потерь, тем лучше результаты сети; распространение ошибки: ошибка, вычисленная на предыдущем шаге, распространяется обратно через сеть, влияя на веса каждого нейрона. Этот процесс называется обратным распространением ошибки; обновление весов: веса нейронной сети обновляются, используя различные алгоритмы оптимизации, такие как стохастический градиентный спуск или adam; повторение процесса. Весь процесс повторяется множество раз, пока сеть не достигнет приемлемого уровня точности на обучающих данных. Обучение нейронной сети может быть времязатратным процессом, особенно для сложных моделей или больших объемов данных. Поэтому обычно используются специализированные вычислительные ресурсы, например графические процессоры (GPU), для ускорения обучения.

В Python обратное распространение является наиболее распространенным алгоритмом обучения нейронных сетей. Это делает возможным градиентный спуск для многослойных нейронных сетей. TensorFlow обрабатывает обратное распространение автоматически, поэтому глубокое понимание алгоритма не требуется.

Важной частью построения модели является разделение данных для обучения и тестирования. Это гарантирует, что получена модель, ко-

торая может обобщать за пределами обучающих данных, и что производительность и выходные данные будут статистически значимыми.

Для прогноза притока воды на плотине Кокинской ГЭС были использованы метеорологические и гидрологические данные за 2012–2013 гг., которые были предварительно обработаны путем удаления шума и нормализации данных (рис. 2). Прогнозирование осуществлялось методом ИНС на основе многослойного перцептрона (MLP), написанного на языке программирования Python с использованием передаточной функции RELU и различных архитектур.

Предлагаемая нейронная сеть (персептрон) обучена прогнозировать приток для следующего временного шага на основе входных характеристик текущего временного шага. Это означает, что для любого заданного входного сигнала сеть выдает прогноз всего на один временной шаг вперед. Входные данные нейронной сети состоят из характеристик для одного временного шага, а выходные данные – это входные данные для следующего временного шага. Эта структура не меняется в зависимости от желаемого горизонта прогнозирования. Сеть всегда обрабатывает данные одного временного шага, чтобы предсказать ближайший следующий временной шаг. Обычно для небольшого набора данных (ограниченных данных) лучше подходит модель прогнозирования с одним временным шагом.

Обучаем нашу модель на данных за 20 месяцев и тестируем модель на данных за 4 месяца. Поскольку базовая модель может прогнозировать только на один шаг вперед, используем метод, называемый рекурсивным прогнозированием, чтобы расширить прогнозы на будущее на несколько временных шагов.

Персептрон (или нейронная сеть) изначально предназначен для прогнозирования следующего временного шага на основе текущих входных характеристик. Он, по своей сути, не учитывает различные горизонты прогнозирования. Используя рекурсивное прогнозирование, расширяем прогнозы на несколько временных шагов, итеративно корректируя входные данные на основе предыдущих прогнозов, чтобы получить прогнозы для различных горизонтов.

Опрос обученной сети и проверка ошибки прогноза на контрольной выборке. Если значение ошибки находится в допустимых пределах, то задача считается решенной, и обученная нейронная сеть допускается к дальнейшему практическому применению.

Производительность каждой модели (A–D) оценивается с использованием среднеквадратичной ошибки (MSE) и коэффициента эффективности (R^2), которые являются одними из наиболее часто используемых статистических

методов в гидрологическом моделировании. Эти методы могут измерить, насколько хорошо регрессия соответствует данным. Уравнения (4) и (5), используемые для расчета MSE и R^2 соответственно, приведены ниже:

$$MSE = \frac{\sum_{i=0}^n (y_i - y_{io})^2}{n} \quad (4)$$

$$R^2 = \left(\sum_{i=1}^n (y_{io} - y_{mean})^2 \right) - \left(\sum_{i=1}^n (y_i - y_{io})^2 \right) / \left(\sum_{i=1}^n (y_{io} - y_{mean})^2 \right), \quad (5)$$

где y_i и y_{io} – прогнозируемые и фактические значения выходных данных соответственно, y_{mean} – среднее значение фактического значения, а n – общее количество наблюдений. Минимальная ошибка относится к достоверности производительности компьютерной модели. Значение R^2 находится в диапазоне от 0 до 1. Как только коэффициент $R^2 = 1$, модель совершенна, но если он равен 0,5 или ниже, модель неудовлетворительная. Нулевое значение MSE означает идеальную модель [7].

В данной статье была использована структура из четырех моделей, включая один входной слой, один скрытый слой с разным числом нейронов и один выходной слой. Во входном

слое было установлено 3 нейрона для каждой модели. Обучающий набор данных, составляющий 80 % от общего объема данных, использовался для настройки весовых коэффициентов нейронных сетей. В соответствии как со значениями MSE , так и R^2 , представленными в табл. 2, линии тренда объясняют более 90 % вариаций в данных, что означает, что прогнозирование очень хорошее. Модель D из шести нейронов в скрытом слое является лучшей среди других моделей и может рассматриваться как идеальная модель. Таким образом, прогнозируемые значения притока соответствуют целевым значениям, и поэтому валидность моделей для прогнозирования расхода доказана.

Таблица 2

Модели искусственных нейронных сетей, рассмотренные в исследовании

Модели	Тип сети	Функция активации	Архитектура	Оптимизатор	MSE	R ²
A	MLP	RELU	3-9-1	ADAM	0,001769	0,934316
B	MLP	RELU	3-8-1	ADAM	0.001701	0,936846
C	MLP	RELU	3-7-1	ADAM	0.001792	0,933467
D	MLP	RELU	3-6-1	ADAM	0.001499	0,944323

Выводы

В этом исследовании многослойные персептронные нейронные сети были использованы для прогнозирования притока воды с использованием гидрологических и метеорологических данных с различных измерительных станций на водоразделе Кока-ГЭС. Важным шагом является предварительная обработка собранных необработанных данных перед построением сети. MLP подходит и широко используется в гидрологических приложениях, подобных этому исследованию. Большая часть данных была собрана для обучения моделей.

Различные архитектуры были определены на основе итераций. Статистические оценки MSE и R^2 доказали валидность моделей.

Естественно, что для повышения точности моделирования процесса прогнозирования притока воды в водохранилища с помощью нейронных сетей необходимо гораздо большее количество обучающих выборок.

На графиках (рис. 3) показаны тенденции, которые описывают взаимосвязь между прогнозируемыми и фактическими значениями притока воды за четыре месяца (сентябрь – декабрь).

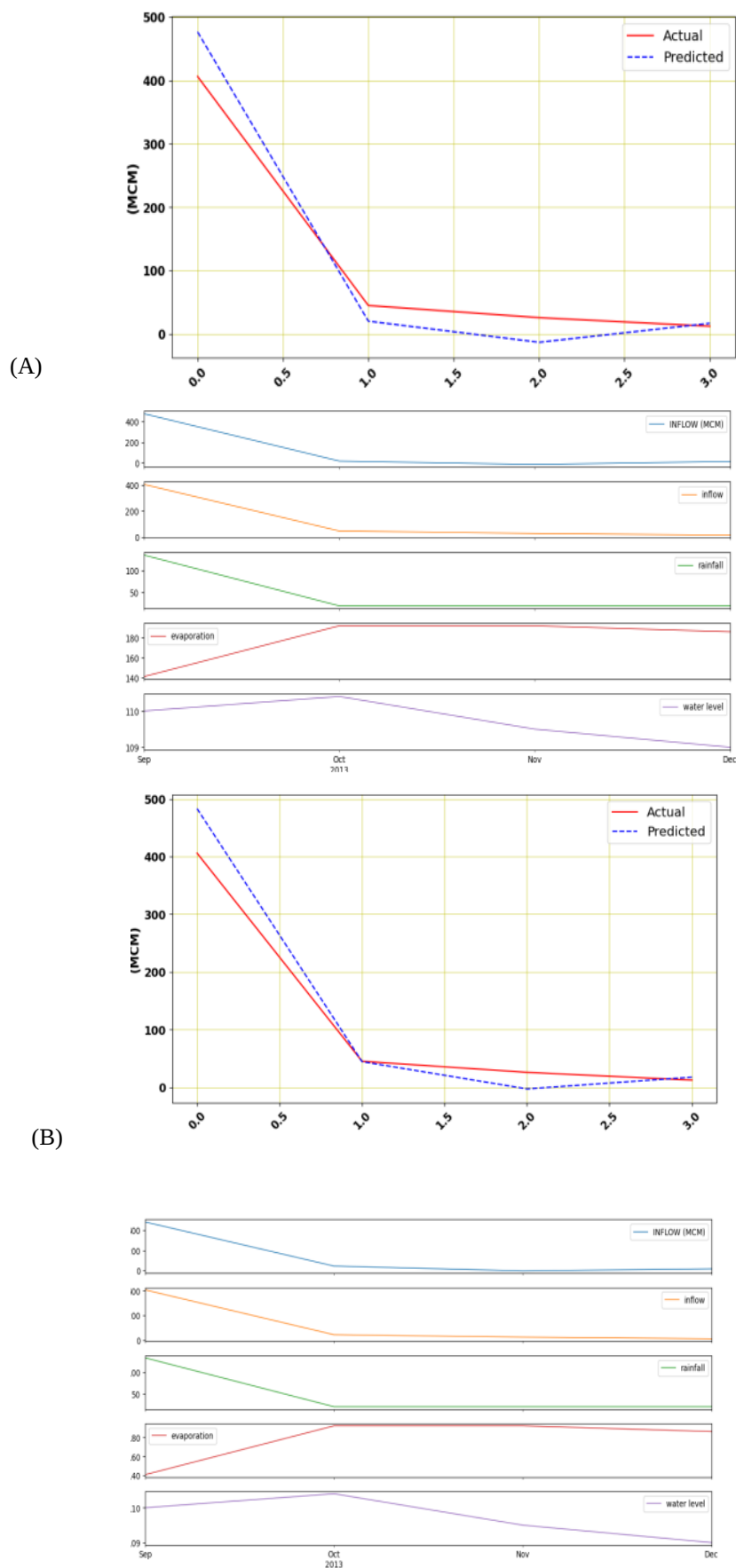
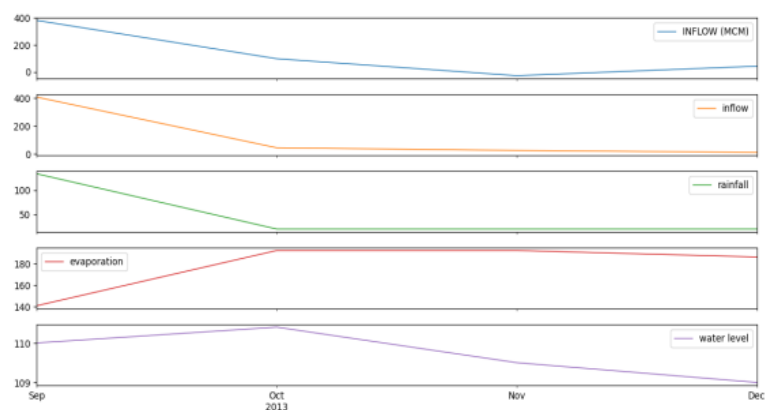
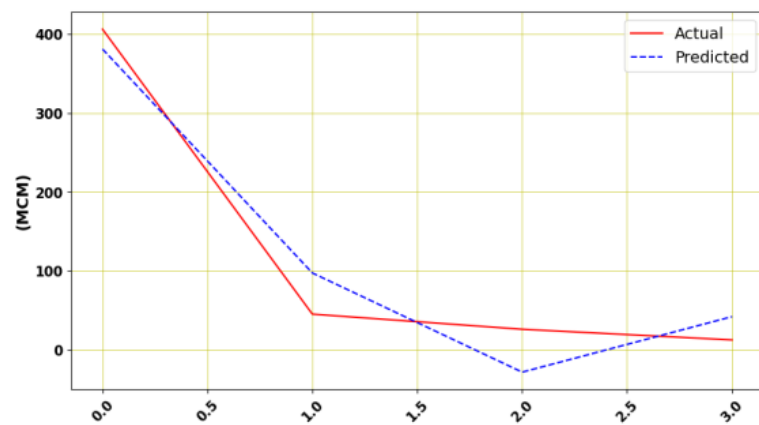


Рис. 3. Многослойные модели персептронов (A–D) (см. также с. 14)

(C)



(D)

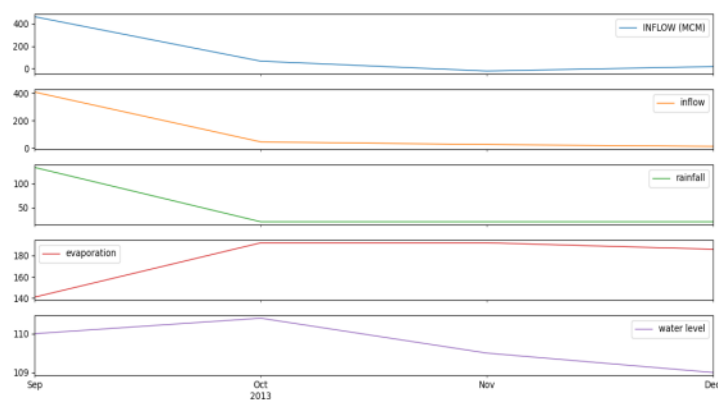
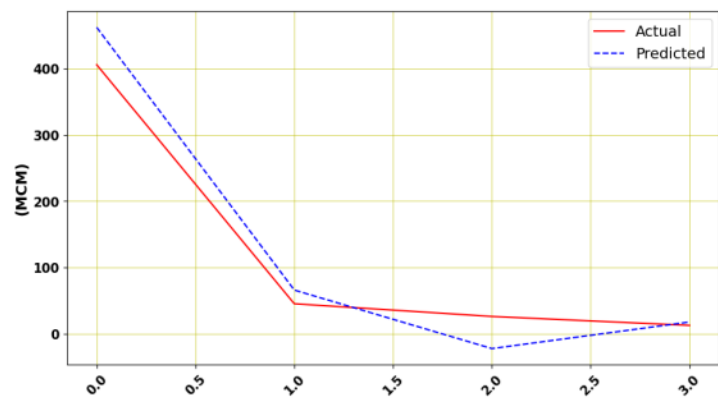


Рис. 3. Окончание

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Хайкин, С. Нейронные сети: полный курс / С. Хайкин; под ред. Н. Н. Куссуль; пер. с англ. Н. Н. Куссуль, А. А. Шелестова. – 2-е изд., испр. – М.: Вильямс, 2006. – 1104 с.
2. Пат. 2820563 Российская Федерация, МПК G05D 9/12. Способ автоматического регулирования уровня воды в водохранилище ГЭС / А. Н. Шилин, С. С. Дементьев, Л. А. Коновалова, М. А. Богале; заявитель ФГБОУ ВО ВолгГТУ. – № 2820563; заявл. 20.05.2023; опубл. 15.01.2024. – 12 с.
3. Полез. модель 226828 Российская Федерация, МПК G01F 23/76. Плавающий измеритель испарения открытой воды / А. Н. Шилин, Л. А. Коновалова, М. А. Богале; заявитель ФГБОУ ВО ВолгГТУ. – № 226828; заявл. 10.03.2023; опубл. 25.12.2024. – 8 с.
4. Козырев, А. В. Система автоматического регулирования уровня воды в водохранилище ГЭС: пат. РФ № 2629456 / А. В. Козырев, А. В. Лашин, В. А. Семенов, В. И. Турунин; заявл. 20.05.2016; опубл. 29.08.2017. – Бюл. № 24. – 9 с.
5. Ильичев, В. Ю. Создание программ на языке Python для исследования множества Мандельброта / В. Ю. Ильичев, А. В. Качурин // E-Scio. – 2021. – № 5 (56). – С. 362–371.
6. Ясницкий, Л. Н. Введение в искусственный интеллект / Л. Н. Ясницкий. – М.: Наука, 2008. – 320 с.
7. Chicco, D. The coefficient of determination R-squared is more informative than SMAPE, MAE, MAPE, MSE and RMSE in regression analysis evaluation / D. Chicco, M. J. Warrens, G. Jurman // PeerJ Computer Science. – 2021. – Vol. 7. – P. e623. – DOI: 10.7717/peerj-cs.623.

УДК: 621.383

DOI: 10.35211/2500-0586-2025-2-51-15-22

*И. А. Коптелова, Б. В. Мак, А. С. Борисов***ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИЧЕСКОГО КОЭФФИЦИЕНТА
ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ
С ПОМОЩЬЮ АППАРАТА НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ****Волгоградский государственный технический университет**

shilina@yandex.ru, macbienbg@gmail.com, alexanderbor0134@mail.ru

Автор, ответственный за переписку:

Ирина Александровна Коптелова, shilina@yandex.ru

Предложена методика определения отношения оптического коэффициента полезного действия оптико-электронного прибора с помощью аппарата нечеткой логики. Оптический коэффициент полезного действия, предложенный М. М. Мирошниковым показывает какая часть потока излучения преобразуется в полезный сигнал. Поскольку все спектральные характеристики оптоэлектронных элементов прибора получены экспериментально, то использование аппарата нечеткой логики позволяет значительно упростить расчет их спектральной совместимости.

Ключевые слова: коэффициент полезного действия (КПД), коэффициент излучения, пирометрия, оптико-электронные приборы, аппарат нечеткой логики

*I. A. Koptelova, B. V. Mac, A. S. Borisov***DETERMINATION OF OPTICAL EFFICIENCY OF OPTOELECTRONIC
DEVICES USING A FUZZY LOGIC DEVICE****Volgograd State Technical University**

A method for determining the ratio of the optical efficiency of an optoelectronic device using a fuzzy logic apparatus is proposed. The optical efficiency coefficient proposed by M. M. Miroshnikov shows which part of the radiation flux is converted into a useful signal. Since all the spectral characteristics of the optoelectronic elements of the device have been obtained experimentally, the use of fuzzy logic makes it possible to significantly simplify the calculation of their spectral compatibility.

Keywords: efficiency, radiation coefficient, pyrometry, optoelectronic devices, fuzzy logic apparatus

Уравнения преобразования сигналов в ОЭП

При проектировании оптико-электронных приборов основным условием их работоспособности является спектральная совместимость элементов оптоэлектронного тракта. Функциональная зависимость спектральной плотности

энергетической светимости абсолютно черного тела определяется законом Планка [1]. Для практических расчетов формула Планка является сложной, и поэтому при анализе спектральных характеристик целесообразно использовать относительную (безразмерную) величину

функции спектральной плотности энергетической светимости [1]:

$$y(\lambda, T) = \frac{M_{\lambda}^o(\lambda, T)}{M_{\lambda_m}^o(\lambda_m, T)} = 142,32 \cdot x_{\lambda}^{-5} \left(e^{\frac{4,9651}{x_{\lambda}}} - 1 \right)^{-1}, \quad (1)$$

$$\text{где } x_{\lambda} = \frac{\lambda}{\lambda_m} = \frac{\lambda T}{c_2} \cdot \frac{1}{0,2014} = 4,9651 \frac{\lambda T}{c_2}.$$

Величина потока излучения, поступающего на вход фотоприемника, определяется выражением [2]:

$$U_{\Phi} = \frac{q}{4} \left(\frac{D_{\text{ВХ}}}{f} \right)^2 \frac{S_{\lambda, \text{max}} R_H R_i R_{\text{УС}}}{(R_H + R_i)} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} s(\lambda) \varepsilon(\lambda, \Theta) \tau(\lambda) M_{\lambda}^o(\lambda, \Theta) d\lambda, \quad (3)$$

где R_i – внутреннее сопротивление фотоприемника; R_H – сопротивление нагрузки; $K_{\text{УС}}$ – коэффициент усиления усилителя фототока; $S_{\lambda, \text{max}}$ – максимальная спектральная чувствительность фотоприемника; S_{λ} – абсолютная спектральная чувствительность фотоприемника; $s(\lambda) = S_{\lambda} / S_{\lambda, \text{max}}$ – относительная спектральная чувствительность фотоприемника.

Спектральные коэффициенты $\varepsilon(\lambda, \Theta)$, $\tau(\lambda)$ и $s(\lambda)$ задаются в виде таблиц и графиков, и по этой причине использовать аналитическое уравнение (3) в расчетах практически невозможно. Поэтому для вычисления выходного напряжения (3) используются численные методы.

Если фоторезистор (ФР) имеет толщину фоточувствительного элемента H , длину l и ширину d , то суммарный ток через него при приложении внешнего напряжения [3]:

$$I = GV_n = \sigma_0 \frac{dH}{l} V_n + \Delta\sigma \frac{dH}{l} V_n = I_T + I_{\Phi}, \quad (4)$$

где G – общая проводимость ФР, Ом^{-1} ; I_T – темновой ток ФР; I_{Φ} – фототок ФР, А; $\Delta\sigma$ – приращение удельной проводимости ФР при освещении, $\text{Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$; σ_0 – собственная темновая удельная проводимость ФР, $\text{Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$; V_n – напряжение питания.

Темновой ток ФР определяет уровень его собственных шумов, а следовательно, его пороговый поток и обнаружительную способность, поэтому его стремятся уменьшить за счет уменьшения d или H или σ_0 при охлаждении. Фототок в установившемся режиме для собственного полупроводника [3]:

$$\Phi = \frac{q}{4} \left(\frac{D_{\text{ВХ}}}{f} \right)^2 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon(\lambda, \Theta) \tau(\lambda) M_{\lambda}^o(\lambda, \Theta) d\lambda, \quad (2)$$

где q – площадь щелевой диафрагмы; $D_{\text{ВХ}}$ – диаметр входного зрачка; f – фокусное расстояние объектива; $\varepsilon(\lambda, \Theta)$ – коэффициент излучения поверхности нагретого изделия; $\tau(\lambda)$ – коэффициент пропускания оптики; $M_{\lambda}^o(\lambda, \Theta)$ – спектральная плотность энергетической светимости изделия.

Напряжение на выходе усилителя фототока вычисляется по формуле [7]:

$$I_{\Phi} = \frac{e}{hc} \{ \alpha(\lambda) \eta(\lambda) \lambda \} [\tau(u_e + u_h)] \frac{H}{l^2} \Phi_{e, \lambda} V_n, \quad (5)$$

где $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ А.с – заряд электрона; u_e и u_h – подвижности электронов и дырок, $\text{см}^2/(\text{В.с})$; h – толщина пластинки полупроводника ПОИ; c – скорость распространения электромагнитных колебаний; $\eta(\lambda)$ – квантовый выход полупроводника, фотон $^{-1}$; $\alpha(\lambda)$ – спектральный показатель поглощения, см^{-1} ; $\Phi_{e, \lambda}$ – спектральная плотность потока излучения.

Откуда монохроматическая токовая чувствительность ФР на основе собственной проводимости определяется выражением [3]:

$$S_{I, \lambda} = \frac{I_{\Phi}}{\Phi_{e, \lambda}} = \frac{e}{hc} \{ \alpha(\lambda) \eta(\lambda) \lambda \} [\tau(u_e + u_h)] \frac{H}{l^2} V_n. \quad (6)$$

В выражениях (5) и (6) фигурные скобки содержат параметры, определяющие монохроматическую чувствительность ФР, а квадратные – физические параметры полупроводника. Из выражений видно, что фототок и монохроматическая чувствительность ФР пропорциональны толщине H и обратно пропорциональны квадрату его длины l^2 . Данное выражение справедливо при малом монохроматическом потоке.

Критерии совместимости позволяют выбирать элементы с совместимыми характеристиками. В качестве основного критерия совместимости оптических элементов системы целесообразно использовать спектральный коэффициент полезного действия (КПД) χ преобразователя [2], определяющий какая часть из общего интегрального потока излучения может быть использована или преобразована [3; 4]:

$$\chi = \frac{\int_0^{\infty} s(\lambda) \Phi_{e\lambda}(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} \Phi_{e\lambda}(\lambda) d\lambda} = \frac{\int_0^{\infty} s(\lambda) \varphi_{e\lambda}(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} \varphi_{e\lambda} d\lambda}, \quad (7)$$

где $\Phi_{e\lambda m}$ – максимальная спектральная плотность входного потока излучения; $\Phi_{e\lambda}(\lambda)$ – спектральное распределение спектральной плотности входного потока излучения; $\varphi_{e\lambda}(\lambda) = \Phi_{e\lambda}(\lambda)/\Phi_{e\lambda m}$ – относительное распределение спектральной плотности входного потока излучения.

Этот критерий определяет работоспособность преобразователя.

Выбор объектива, характеризующегося коэффициентом пропускания $\tau(\lambda)$, должен осуществляться по условию максимального значения спектрального КПД χ . По этому условию выбирается и фотоприемник, а именно [5]:

$$\chi = \frac{\int_0^{\infty} s(\lambda) \tau(\lambda) y(\lambda, T) d\lambda}{\int_0^{\infty} \tau(\lambda) y(\lambda, T) d\lambda} = \frac{\int_0^{\infty} s(\lambda) y_1(\lambda, T) d\lambda}{\int_0^{\infty} y_1(\lambda, T) d\lambda}, \quad (8)$$

где $y_1(\lambda, T) = \tau(\lambda) y(\lambda, T)$ – безразмерная величина функции спектральной плотности энергетической светимости на выходе оптического элемента.

Абсолютная спектральная чувствительность фотоприемника S_λ зависит от материала чувствительного слоя и от отдельного экземпляра, а относительная спектральная чувствительность зависит только от материала, и эта характеристика является общей для большого количества фотоприемников [2]. Поэтому эту харак-

теристику удобно использовать на первом уровне выбора фотоприемников.

Длины волн, соответствующие максимальным значениям функций для температур $\theta_1=873$ К; $\theta_2=1273$ К, имеют значения:

$$\lambda_{1\max} = \frac{2896}{\theta_1} = 3,32 \text{ мкм};$$

$$\lambda_{2\max} = \frac{2896}{\theta_2} = 2,28 \text{ мкм}$$

Практически весь спектр излучения нагретого изделия при некоторой температуре находится в диапазоне от $0,5\lambda_{2\max}$ до $3\lambda_{1\max}$. На основании этого определяется спектральный диапазон измерительного преобразователя:

$$\lambda_{\min} = 0,5\lambda_{2\max} = 1,14 \text{ мкм};$$

$$\lambda_{\max} = 3\lambda_{1\max} = 9,96 \text{ мкм}$$

Определение оптического коэффициента полезного действия

Зависимость спектральной плотности излучения в относительных единицах для заданных температур [1]. Для проектирования оптико-электронных приборов разработана база данных для оптического материала, источников излучения и фотоприемников [6]. По относительной спектральной чувствительности фоторезистора ФСА (PbS), монокристалла из InSb, Ge:Hg при 30 К [3; 4] и спектральной плотности излучения для АЧТ в относительных единицах при температурах: $\theta_1=1273$ К; 2 – $\theta_2=873$ К; 3 – $\theta_3=773$ К; 4 – $\theta_4=573$ К; 5 – $\theta_5=373$ К, построены графики, определяющие КПД приемников [5] на рис. 1.

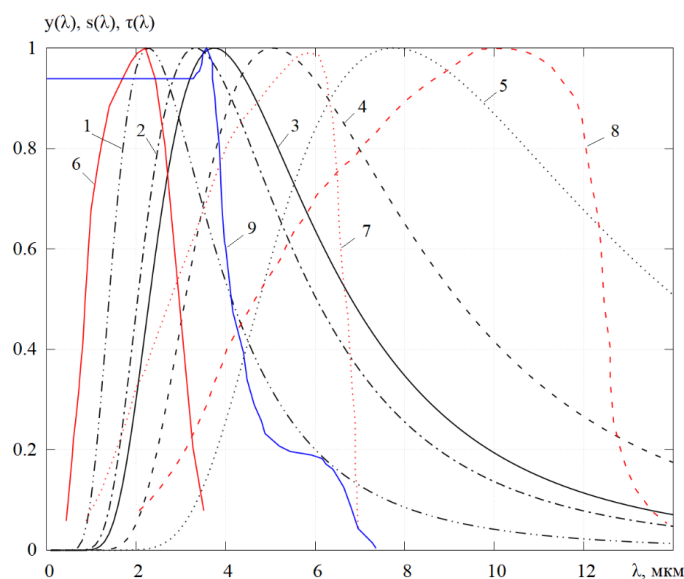


Рис. 1. Графики спектральной плотности излучения для АЧТ в относительных единицах при температурах: 1 – $\theta_1=1273$ К; 2 – $\theta_2=873$ К; 3 – $\theta_3=773$ К; 4 – $\theta_4=573$ К; 5 – $\theta_5=373$ К, относительной спектральной чувствительности фоторезистора: 6 – PbS, 7 – InSb, 8 – Ge:Hg, 9 – силикат

Из выражения (8) и спектральных характеристик на рис. 1 с помощью компьютерной

программы определяем КПД приемников излучения.

Таблица 1

Определение точности КПД фотоприемников с пропускающим оптическим материалом для АЧТ в относительных единицах при температурах

Тип прибора	Фоторезисторы $s(\lambda)$	$\chi_{\text{точн}} (\%)$				
		1273 К	873 К	773 К	573 К	373 К
1	PbS	58,275	37,447	30,403	15,183	2,892
2	InSb	48,642	61,075	64,803	73,139	81,037
3	Ge:Hg	16,970	26,219	29,537	38,538	53,431

С помощью компьютерных программ и программы Gnuplot строится график, изображающий кривые зависимости КПД приемников по формуле (8) от изменения температуры на рис. 2.

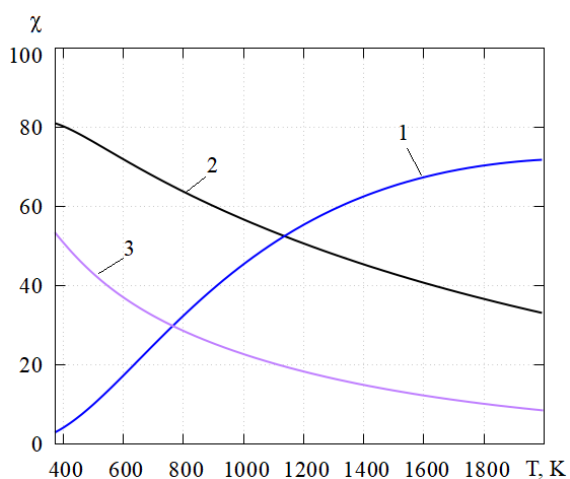


Рис. 2. Кривые зависимости КПД приемников от изменения температуры:
1 – PbS; 2 – InSb; 3 – Ge:Hg

Аппарат нечеткой логики

Необходимо отметить, что для вычисления КПД необходимы спектральные характеристики оптических и оптико-электронных элементов оптико-электронного прибора. Все спектральные относительные характеристики определяются экспериментально, представлены в виде графиков, имеют сложную форму и при-

ведены в справочниках. Поэтому расчеты КПД могут быть выполнены только с помощью численных методов. Для реализации этих методов необходима оцифровка большого количества характеристик, а при морфологическом синтезе осуществляется перебор большого количества элементов, что требует очень большого объема вычислений. Решение этой проблемы возможно при аппроксимации спектральных характеристик трапецеидальной формой, для построения которой необходимо четыре координаты, а для узких характеристик возможна аппроксимация треугольной формой с тремя координатами. Математические операции с такими функциями используются в теории нечеткой логики. Для выполнения этих операций разработаны пакеты программ, что позволяет значительно сократить время перебора вариантов с учетом совместности элементов по оптическому КПД. Причем координаты этой функции могут быть выбраны так, что площадь под трапецеидальной функцией равна площади под аппроксимируемой функцией. На рис. 3 приведена симметричная трапецеидальная функция принадлежности, которая описывается зависимостью [7]:

$$\mu_{A^{(i)}}(x_i) = \begin{cases} 0 & \text{для } x > z \text{ или } x < y \\ 1 & \text{для } c - \frac{1}{2} \leq x \leq c + \frac{1}{2} \\ s(z - y) & \text{для } y \leq x \leq c - \frac{1}{2} \\ s(z - x) & \text{для } c + \frac{1}{2} \leq x \leq z \end{cases} \quad (9)$$

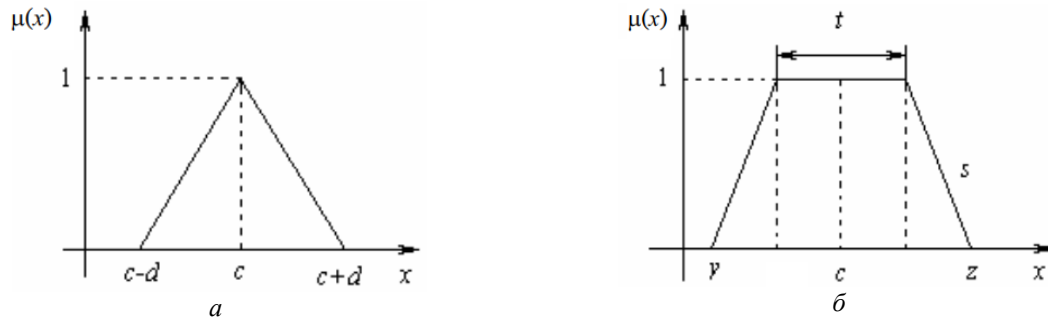


Рис. 3. Функции принадлежности:
а – треугольная; б – трапецидальная

Чтобы ускорить расчеты, упрощаем обработку спектральных плотностей излучения АЧТ, используя аппроксимации трапецевидной по изменению температуры, которые приводят спектральные плотности излучения АЧТ к простому интуитивному приближению с небольшой ошибкой.

Приблизительная спектральная плотность излучения АЧТ трапецией ABCD:

– Прямая АВ касается спектральной характеристики плотности излучения АЧТ на пересечении $y_{\lambda < \lambda_{\max}} = 0.5$ и $y = 0$ и $y = 1$ соответственно.

– Прямая CD касается спектральной характеристики плотности излучения АЧТ на пересечении $y_{\lambda > \lambda_{\max}} = 0.5$ и $y = 1$ и $y = 0$ соответственно.

Положения четырех точек А, В, С, D показаны на рис. 4.

При изменении температуры Т изменится спектральная плотность излучения абсолютно черного тела, а также изменится положение 4-х

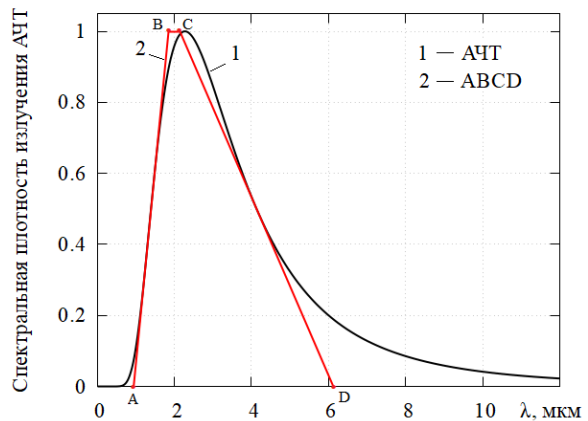


Рис. 4. График спектральной плотности излучения АЧТ по методу трапецевидной аппроксимации

вершин трапеции. Изучим изменение координат этих 4-х точек на λ -оси при изменении температуры Т от 373 до 11273 К. Широкая амплитуда температуры помогает уменьшить погрешность при обработке данных на следующем шаге для нахождения функций зависимости λ_A , λ_B , λ_C , λ_D от температуры Т.

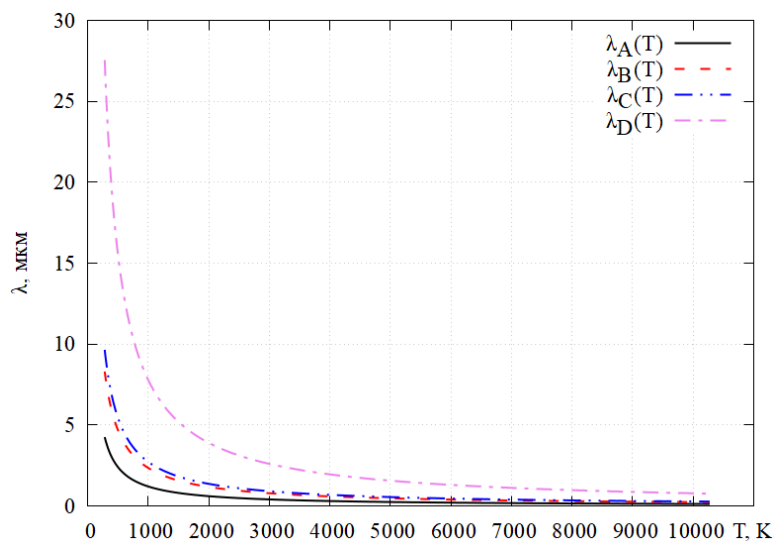


Рис. 5. Графики функций $\lambda_A(T)$, $\lambda_B(T)$, $\lambda_C(T)$, $\lambda_D(T)$ в зависимости от температуры

Из графика на рис. 5 предположим, что функции зависимости λ_A , λ_B , λ_C , λ_D от температуры T имеют тот же вид, что и выражение закона смещения Вина, то есть:

$$\begin{aligned}\lambda_A(T) &= \alpha(T)^{-1} & \lambda_B(T) &= \beta(T)^{-1} \\ \lambda_C(T) &= \gamma(T)^{-1} & \lambda_D(T) &= \rho(T)^{-1}\end{aligned}\quad (10)$$

где α , β , γ , ρ – коэффициенты; T – температура. С помощью программы *Gnuplot* и ее функ-

ции *fit* получены коэффициенты: $\alpha = 1202,89$, $\beta = 2349,25$, $\gamma = 2729,07$, $\rho = 7795,66$, то есть:

$$\begin{aligned}\lambda_A(T) &= 1202,89(T)^{-1} & \lambda_B(T) &= 2349,25(T)^{-1} \\ \lambda_C(T) &= 2729,07(T)^{-1} & \lambda_D(T) &= 7795,66(T)^{-1}\end{aligned}\quad (11)$$

В диапазоне температур от 373 К до 1273 К аппроксимация дает хорошие результаты с очень низкой погрешностью.

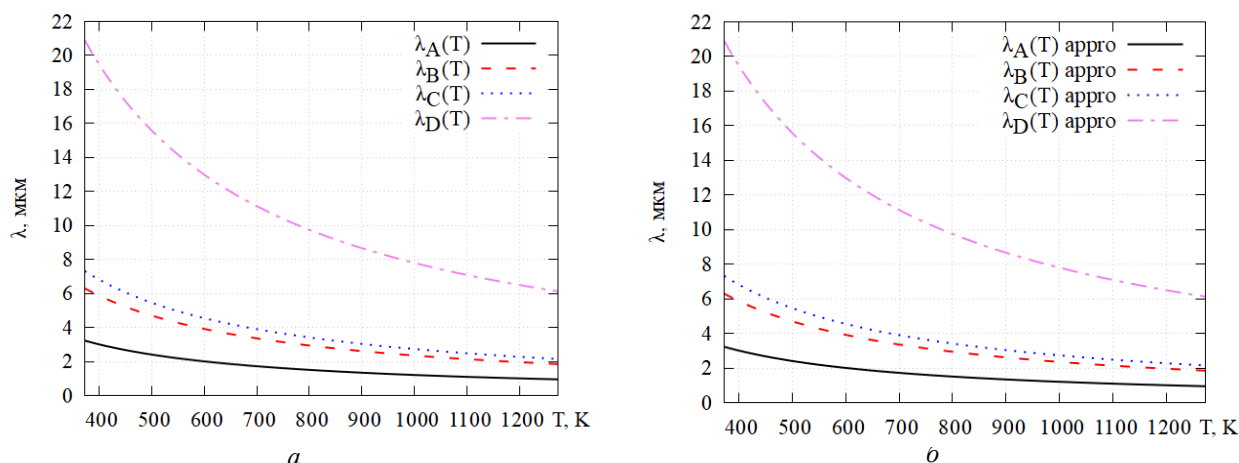


Рис. 6. Графики функций $\lambda_A(T)$, $\lambda_B(T)$, $\lambda_C(T)$, $\lambda_D(T)$ и их аппроксимации в диапазоне температур от 373 К до 1273 К

С помощью языка программирования Dev-C++ получаем результирующий набор точек λ_A , λ_B , λ_C , λ_D при значениях температур

$T_1 = 1273$ К; $T_2 = 873$ К; $T_3 = 773$ К; $T_4 = 573$ К; $T_5 = 373$ К (табл. 2).

Таблица 2

Результирующий набор точек λ_A , λ_B , λ_C , λ_D при заданных значениях температуры

Коэффициент	T_1 1273 К	T_2 873 К	T_3 773 К	T_4 573 К	T_5 373 К
λ_A , мкм	0,94	1,38	1,56	2,10	3,22
λ_B , мкм	1,85	2,69	3,04	4,10	6,30
λ_C , мкм	2,14	3,13	3,53	4,76	7,32
λ_D , мкм	6,12	8,93	10,08	13,61	20,90

По данным табл. 2 можно построить графики спектральной плотности АЧТ, относительной спектральной чувствительности фоторезистора и силикатного оптического материала по методу трапецевидной аппроксимации, представленному на рис. 7.

Например, на рис. 8 приведены приближенные спектральные характеристики фотоприемников – InSb с силикатным оптическим материалом и АЧТ при 1273 К. Отношение площадей под кривыми 4 и 1 – есть коэффициент полезного

действия $\chi = (S_4/S_1)$. С помощью теории нечетких множеств площадь под кривой 4 определяется как логическое произведение множеств площадей под всеми трапецевидальными характеристиками. Этот способ вычисления использует всего несколько точек и поэтому позволяет повысить быстродействие вычислений. Вычисленные таким способом значения χ отличаются от вычисленных с помощью точной формулы значений, но на выбор варианта совместимости эта погрешность не оказывает практического влияния.

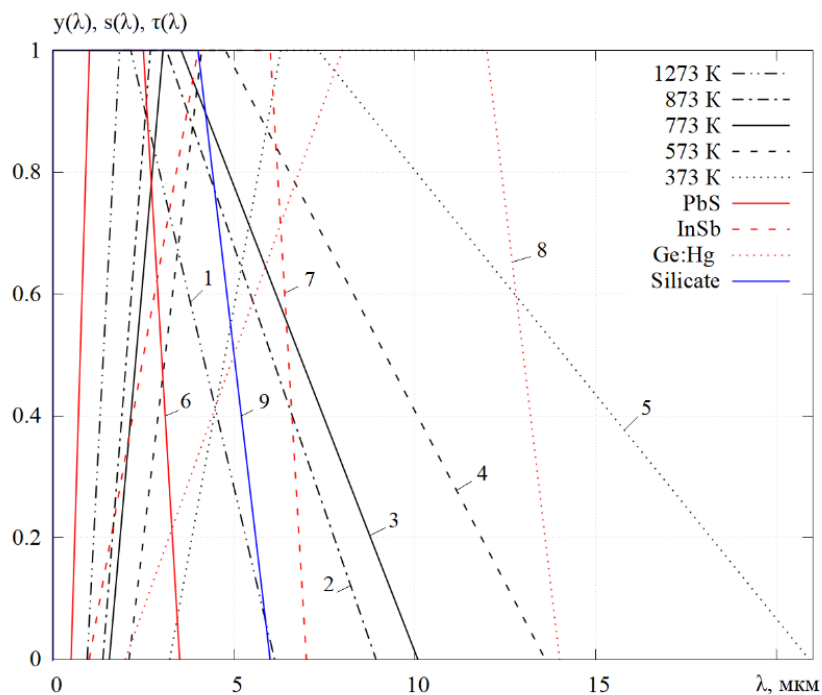


Рис. 7. Графики спектральной плотности излучения для АЧТ в относительных единицах при температурах:
1 – $\theta_1=1273$ K; 2 – $\theta_2=873$ K; 3 – $\theta_3=773$ K; 4 – $\theta_4=573$ K; 5 – $\theta_5=373$ K, 6 – PbS, 7 – InSb, 8 – Ge:Hg и 9 – силикат

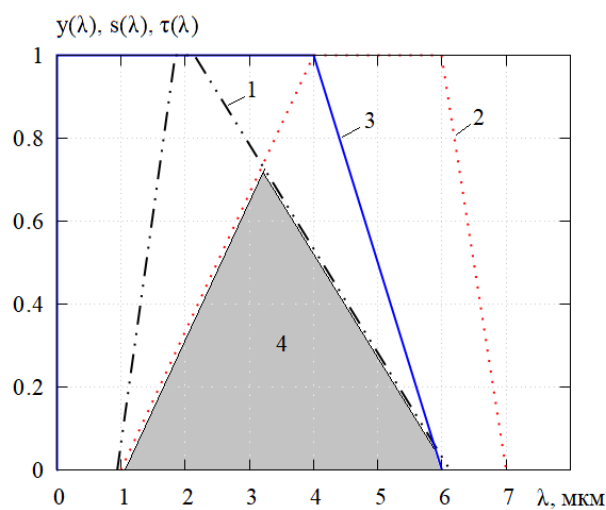


Рис. 8. Графики спектральной плотности излучения для АЧТ при температуре:
1 – 1273 K, приемник: 2 – InSb, пропускающий оптический материал: 3 – силикатный оптический материал

КПД приемников излучения с пропускаемым оптическим материалом согласно табл. 3.

Таблица 3

Определение приближения КПД фотоприемников с пропускающим оптическим материалом для АЧТ в относительных единицах при температурах

Тип прибора	Фоторезисторы $s(\lambda)$	$\chi_{\text{приб}} (\%)$				
		1273 K	873 K	773 K	573 K	373 K
1	PbS	64,75	26,9	18,78	6,02	0,10
2	InSb	76,8	67,5	60,45	35,05	9,10
3	Ge:Hg	34,78	18,40	18,40	18,40	8,90

Абсолютная погрешность:

$$\Delta = |\chi_{\text{приб}} - \chi_{\text{точн}}|, \quad (12)$$

где $\chi_{\text{приб}}$ – коэффициент полезного действия приближения; $\chi_{\text{точн}}$ – коэффициент полезного действия точности.

Относительная погрешность:

$$\delta(\%) = \frac{\Delta}{\chi_{\text{точн}}} \cdot 100 \% = \frac{|\chi_{\text{приб}} - \chi_{\text{точн}}|}{\chi_{\text{точн}}} \cdot 100 \% \quad (13)$$

Результаты расчета абсолютной погрешности и относительной погрешности приемников с пропускаемым оптическим материалом АЧТ при 873 К по формулам (12) и (13) приведены в табл. 4.

Таблица 4

Абсолютная и относительная погрешность приемников с пропускаемым оптическим материалом АЧТ при заданных значениях температуры

Температура, К	Фоторезисторы s(λ)					
	PbS		InSb		Ge:Hg	
	Δ(%)	δ(%)	Δ(%)	δ(%)	Δ(%)	δ(%)
1273	6,48	11,11	28,16	57,89	17,81	104,95
873	10,55	28,17	6,43	10,52	7,82	29,82
773	11,62	38,23	4,35	6,72	11,14	37,71
573	9,16	60,35	38,09	52,08	20,14	52,25
373	2,79	96,54	71,94	88,77	44,53	83,34

Выводы

Из вышеприведенных расчетов и анализа видно, что у приемника излучения с одним и тем же оптическим материалом, соответствующим разным фотоприемникам (ФСА – PbS, InSb и Ge:Hg), КПД будут меняться. На рис. 2 видно, что КПД фоторезистора ФСА увеличивается с ростом температуры. Напротив, КПД приемников InSb и Ge:Hg снижается с повышением температуры. Поэтому для измерения высоких температур следует применять фотоприемник фоторезистора ФСА, а для измерения низких температурах следует использовать фотоприемник глубоководного фоторезистора Ge:Hg. Метод трапецевидной аппроксимации увеличит скорость обработки, поскольку нужно определить только четыре вершины трапеции.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Криксунов, Л. З. Справочник по основам инфракрасной техники / Л. З. Криксунов. – М.: Сов.радио, 1978. – 400 с., ил.
2. Мирошников, М. М. Теоретические основы оптико-электронных приборов / М. М. Мирошников. – Л.: Машиностроение, 1983. – 696 с.
3. Ишанин, Г. Г. Приемники оптического излучения: учебник / Г. Г. Ишанин, В. П. Челибанов; под ред. про-

фессора В. В. Коротаева. – СПб.: Изд-во «Лань», 2021. – 304 с.: ил.

4. Ишанин, Г. Г. Приемники излучения: учебное пособие для вузов / Г. Г. Ишанин, Э. Д. Панков, В. П. Челибанов. – СПб.: Папирус, 2003. – 527 с.

5. Коптелова, И. А. Морфологический синтез оптико-электронных систем измерения размеров нагретых деталей / И. А. Коптелова, А. Н. Шилин // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2003. – № 3. – С. 51–61.

6. Ишанин, Г. Г. Источники и приемники излучения: учебное пособие для студентов оптических специальностей вузов / Г. Г. Ишанин, Э. Д. Панков, А. Л. Андреев, Г. В. Польшиков. – СПб.: Политехника, 1991. – 240 с.: ил. – ISBN 5-7325-0164-9.

7. Коптелова, И. А. Использование уравнений совместимости элементов в методике морфологического синтеза оптико-электронных приборов / И. А. Коптелова, А. Н. Шилин, М. В. Гиркин // Известия ВолгГТУ: межвуз. сб. науч. ст. № 3 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2009. – (Серия «Электроника, измерительная техника, радиотехника и связь»; вып. 3). – С. 64–69.

8. Бабичев, А. П. Справочник / Физические величины / А. П. Бабичев, Н. А. Бабушкина, А. М. Братковский и др.; под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с. – ISBN 5-283-04013-5.

9. Брамсон, М. А. Справочные таблицы по инфракрасному излучению нагретых тел. В 2 т. – М.: Наука, 1964. – 318 с.

10. Шейнцлин, А. Е. Излучательные свойства твердых материалов: справочник. Под общ. ред. А. Е. Шейнцлина. – М.: «Энергия», 1974. – 472 с.

УДК 621.3.089.62

DOI: 10.35211/2500-0586-2025-2-51-23-29

*Д. Ю. Кетов¹, А. И. Нефедьев^{1,2}***ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ
ДЛЯ КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЦЕФАЛОГРАФА**¹ Волгоградский государственный медицинский университет² Волгоградский государственный технический университет

ya_st@bk.ru, nefediev@rambler.ru

Автор, ответственный за переписку: Алексей Иванович Нефедьев, nefediev@rambler.ru

В статье приводятся результаты оценки погрешности информационно-измерительной системы, предназначенной для контроля технического состояния электроэнцефалографа. Разработанная информационно-измерительная система позволяет обеспечить автоматизированный контроль электроэнцефалографов и уменьшить погрешность измерения с 5–7 % до 0,00187 %. Разработана методика дистанционной автоматизированной поверки электроэнцефалографов, которая позволяет проводить дистанционный контроль технического состояния электроэнцефалографов на месте их эксплуатации, что уменьшает затраты на контроль технического состояния на 50 %.

Ключевые слова: информационно-измерительная система, методика, неисправность, дистанционная диагностика, поверка, автоматизированный контроль

*D. Yu. Ketov¹, A. I. Nefed'ev^{1,2}***ERROR ASSESSMENT OF THE INFORMATION AND MEASURING SYSTEM
FOR CONTROLLING THE TECHNICAL CONDITION OF AN ELECTROENCEPHALOGRAPH**¹ Volgograd State Medical University² Volgograd State Technical University

The article presents the results of the error assessment of the information and measuring system designed to monitor the technical condition of the electroencephalograph. The developed information and measuring system allows for automated monitoring of electroencephalographs and reduces the measurement error from 5–7 % to 0,00187 %. A method for remote automated verification of electroencephalographs has been developed, which allows for remote monitoring of the technical condition of electroencephalographs at the place of their operation, which reduces the costs of monitoring the technical condition by 50 %.

Key words: information and measuring system, methodology, malfunction, remote diagnostics, verification, automated control

В настоящее время в качестве испытательного оборудования для оценки состояния электроэнцефалографического оборудования в медицинских учреждениях используют функциональные генераторы ГФ-05 и Диатест-04. Они имеют ограниченный функционал, не позволяющий в полной мере реализовывать описанные в эксплуатационной документации методики контроля технического состояния. Ввиду отсутствия у данных генераторов возможности моделирования сигналов необходимой формы и с нужными характеристиками встает вопрос о необходимости поиска нестандартных решений, что не всегда дает необходимый результат. В ГФ-05 есть возможность формировать многообразие тестовых сигналов, но при этом в нем отсутствует подтверждение полученной модели тестового сигнала соответствия реальной элек-

троэнцефалограмме (то есть можно сформировать сигнал, не имеющий никакого отношения к реальной электроэнцефалограмме) [1; 2].

Также при контроле за техническим состоянием необходимо выбирать адекватную методику испытаний, которая бы учитывала параметры, отраженные в нормативно-технической и эксплуатационной документации на изделие Р 50.2.087-2013 [3]. В данной рекомендации в качестве тестовой приводится только одна форма сигнала, реализующая возможность анализа амплитудно-временных зависимостей, которая при этом не дает никакой информации о правильности воспроизведения формы сигнала. Для решения поставленной задачи была разработана информационно-измерительная система, структурная схема которой представлена на рис. 1.

На рис. 1 изображена схема, отображающая принцип работы автоматизированного ком-

плекса для проведения контроля технического состояния электроэнцефалографа [4].

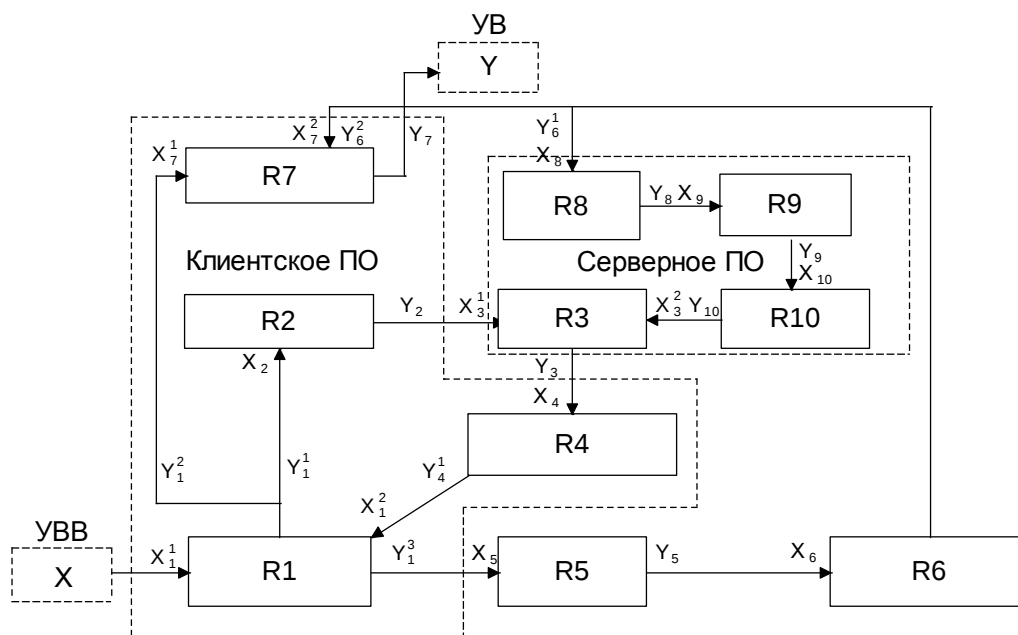


Рис. 1. Структурная схема проведения сетевого инструментального контроля технического состояния ЭЭГ-прибора

На рисунке обозначены: UBB – устройство ввода; UB – устройство вывода; R_1 – функция формирования испытательного ЭЭГ-сигнала; R_2 – функция расчета статистических характеристик испытательного ЭЭГ-сигнала; R_3 – функция сравнения значений статистических характеристик испытательного сигнала с имеющимися в БД; R_4 – функция обработки ответа с БД; R_5 – функция функционального генератора (ФГ); R_6 – функция электроэнцефалографа; R_7 – функция сравнения двух ЭЭГ-сигналов; R_8 – функция сегментирования ЭЭГ-сигнала; R_9 – функция расчета статистических характеристик просегментированного ЭЭГ-сигнала; R_{10} – функция БД.

В итоге после оптимизации системы была получена конечная структурная схема (рис. 2):

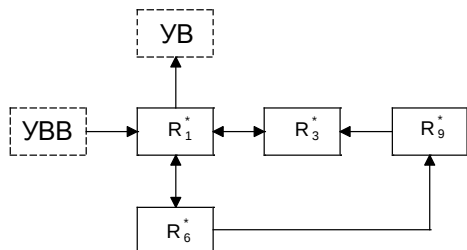


Рис. 2. Общая структурная схема автоматизированного комплекса для проведения сетевого инструментального контроля технического состояния электроэнцефалографа

Далее рассчитаем полную относительную погрешность автоматизированного комплекса для проведения контроля технического состояния электроэнцефалографа. В тех случаях, когда погрешности вызываются несколькими независимыми друг от друга случайными причинами, то складываются не сами погрешности, а их квадраты. Поэтому полная относительная погрешность измеряемой величины через ее случайную и приборную погрешности выражается формулой:

$$\delta_n = k \sqrt{\delta_{\text{эвм}}^2 + \delta_{\text{dac}}^2 + \delta_{\text{us}}^2 + \delta_{\text{фнч}}^2 + \delta_{\text{см}}^2},$$

где k – коэффициент, определяемый доверительной вероятностью P . Для $P = 0,95$ коэффициент $k = 1,1$; $\delta_{\text{эвм}}^2$ – относительная погрешность представления числа в ЭВМ с плавающей запятой; δ_{dac}^2 – полная относительная погрешность ЦАП; δ_{us}^2 – относительная погрешность операции усиления; $\delta_{\text{фнч}}^2$ – относительная погрешность фильтра низкой частоты; $\delta_{\text{см}}^2$ – относительная погрешность смещения.

Здесь предполагается, что погрешностям соответствуют приблизительно одинаковые доверительные вероятности. Из формулы следует, что в случае, когда одна из погрешностей даже в небольшое число раз меньше другой, то ее

вклад в полную погрешность оказывается незначительным. В таком случае меньшей погрешностью можно пренебречь. В некоторых случаях при многократных измерениях получается одно и то же значение измеряемой величины. Это означает, что случайная погрешность не превышает наименьшего значения, которое может быть измерено данным прибором.

В таких случаях полная погрешность целиком определяется допустимой приборной погрешностью. Вышеприведенное уравнение представляет собой полную погрешность в виде суммы составляющих погрешности, обусловленных соответствующими выполняемыми измерительными преобразованиями [4].

Измерительную процедуру, выполняемую

на ЭВМ, можно представить следующим образом. В ЭВМ числа с плавающей запятой используют формат *IEEE*. Значения с одиночной точностью и типом *float* имеют 4 байта, состоят из бита знака, 8-разрядной двоичной экспоненты *excess-127* (порядок) и 23-битной мантиисы. Мантииса представляет число от 1,0 до 2,0. Поскольку бит высокого порядка мантиисы всегда равен 1, он не сохраняется в числе. Это представление обеспечивает для типа *float* диапазон примерно от $3,4E-38$ до $3,4E+38$ (табл. 1).

Для записи числа в ячейке машины отводятся $k+1$ разряд для фиксации порядка со своим знаком и $n+1$ разряд для мантиисы, то есть место, занимаемое в коде числа кодом мантиисы и кодом порядка, заранее фиксировано (рис. 3).

Таблица 1

Параметры чисел

Тип	Значимые цифры	Число байтов	Длина экспоненты	Длина мантиисы
<i>float</i>	6 - 7	4	8 бит	23 бита
<i>double</i>	15 - 16	8	11 бит	52 бита

	1	...	k-2	k-1	k		1	2	...	n
Знак порядка	Порядок			Знак числа		Мантииса				

Рис. 3. Запись числа в ячейке ЭВМ

В машинах с плавающей запятой абсолютная погрешность представления числа определяется следующим образом:

$$\Delta = \Delta a \cdot 2^m$$

где Δa – погрешность представления мантиисы, которая определяется так же, как абсолютная погрешность представления чисел в машине с фиксированной запятой, то есть

$$\Delta a = 2^{-(n+1)},$$

$$\Delta_{\min} = 2^{-(n+1)} \cdot 2^{-(2k-1)} = 2^{-(n+2k)} = 2^{-(23+8)} \approx 2^{-31} \approx 1 \cdot 10^{-9};$$

$$\Delta_{\max} = 2^{-(n+1)} \cdot 2^{(2k-1)} = 2^{2k-n-2} = 2^{8-23-2} \approx 2^{-17} \approx 1 \cdot 10^{-6}.$$

Относительная погрешность представления чисел в машинах с плавающей запятой определяется по общему правилу:

$$\varepsilon_{\min} = \frac{\Delta a}{a_{\max}} = \frac{2^{-(n+1)}}{1-2^{-n}} = 2^{-(n+1)} = 2^{-(23+1)} \approx 2^{-24} \approx 1 \cdot 10^{-8};$$

$$\varepsilon_{\max} = \frac{\Delta a}{a_{\min}} = \frac{2^{-(n+1)}}{2^{-1}} = 2^{-n} = 2^{-23} \approx 1 \cdot 10^{-8}.$$

где m – порядок числа, который изменяется в пределах:

$$-(2^k - 1) \leq m \leq (2^k - 1).$$

Следовательно, в отличие от машин с фиксированной запятой, в машинах с плавающей запятой абсолютная погрешность представления чисел зависит от порядка числа: минимальная при наибольшем отрицательном m и максимальная при наибольшем положительном m , и определяется следующим образом:

$$\varepsilon = \left| \frac{\Delta}{A} \right| = \frac{\Delta a \cdot 2^m}{a \cdot 2^m} = \frac{\Delta a}{a},$$

то есть ε не зависит от порядка числа и изменяется в пределах:

Относительная погрешность изображения чисел во всем диапазоне представления практически постоянна, и для чисел с нормализованной мантиссой зависит от количества разрядов мантиссы – чем их больше, тем мень-

ше погрешность представления.

В табл. 2 представлены диапазоны изменения и точность стандартных 32-х и 64-х разрядных форматов вещественных чисел с плавающей запятой.

Таблица 2

Диапазоны изменения и точность стандартных 32-х и 64-х разрядных форматов вещественных чисел

Формат	32-х разрядный	64-х разрядный
Обозначение типа	<i>float</i>	<i>double</i>
Точность, разрядов	≈6	15
Точность, Эпсилон	$1.192092896 \cdot 10^{-7}$	$2.2204460492503131 \cdot 10^{-16}$
Максимальное число	$3.402823466 \cdot 10^{+38}$	$1.7976931348623158 \cdot 10^{+308}$
Минимальное число	$1.175494351 \cdot 10^{-38}$	$2.2250738585072014 \cdot 10^{-308}$
Максимальная экспонента	≈38	≈308
Минимальная экспонента	≈-37	≈-307

Относительная погрешность представления числа в ЭВМ с плавающей запятой типа *float*:

$$\delta_{\text{эвм}} \approx 1 \cdot 10^{-8} \text{ \%}.$$

Погрешность представления числа в ЭВМ с плавающей запятой в небольшое число раз меньше остальных погрешностей, поэтому ее вклад в полную погрешность оказывается незначительным [5]. В таком случае данной погрешностью можно пренебречь.

Произведем расчет погрешности функционального генератора.

Производители ЦАП обычно указывают характеристики, позволяющие оценить его полную погрешность. Такими характеристиками являются аддитивная погрешность (*Offset*), мультипликативная погрешность, дифференциальная нелинейность (*DNL*), интегральная нелинейность (*INL*). В технической документации на ЦАП представлены:

- разрядность 12 *bit*;
- разрешающая способность 1/4095, или 0,024 5% от полной шкалы, или -72,2 дБ;
- скорость преобразования 1 *MSPS*;

Погрешности ЦАП:

1. Гарантированная монотонность 10 *bit*;
2. Младший значащий разряд (*LSB*) – минимальное входное напряжение, разрешаемое АЦП (единичный шаг в шкале преобразования). Младший значащий разряд определяется формулой:

$$1 \text{ (МЗр)} = 1 \text{ LSB} = U_{\text{оп}} / 2^P = 1,8 \text{ В} \cdot 1/4095 = 0,0004 \text{ В},$$

где $U_{\text{оп}}$ – опорное напряжение = 1,8 В, P – разрядность ЦАП = 12 *bit*;

3. Дифференциальная нелинейность

$$\pm 2 \text{ LSB (МЗР)} = \pm 0,0008 \text{ В};$$

4. Интегральная нелинейность

$$\pm 4 \text{ LSB (МЗР)} = \pm 0,0016 \text{ В};$$

Необходимо учитывать инструментальную погрешность – аппаратную погрешность, определяемую нестабильностью ИОН, погрешностью ключей, резистивных матриц и выходных ОУ. Основными факторами, вызывающими возникновение погрешностей элементов, являются: технологический разброс параметров; влияние изменений окружающей среды (в основном температуры); изменение параметров во времени (старение); воздействия внешних и внутренних шумов и помех. Поэтому характеристики преобразования реальных ЦАП отличаются от идеальных формой, значением ступеней и расположением относительно осей координат. Все инструментальные погрешности проявляются в основном в виде параметров, характеризующих степень совпадения реальной статической характеристике (*CX*) с идеальной.

Такими параметрами являются:

- смещение нуля – параллельный сдвиг реальной *CX*;
- изменение коэффициента передачи – отклонение крутизны реальной *CX* от идеальной;
- нелинейность преобразования – отклонение реальной *CX* от идеальной прямой.

1. Аддитивная погрешность по своей природе является смещением передаточной характеристики ЦАП от ее идеального представления (рис. 4):



Рис. 4. Аддитивная погрешность ЦАП

Эта ошибка остается константной для всех входных значений. Она может быть скомпенсирована при калибровке схемы, и равна: $\delta_{Add} = 7,5 \text{ ppm} = 0,00075 \%$ от общего диапазона входных значений ЦАП.

2. Интегральная нелинейность (INL) – это погрешность, которая вызывается отклонением линейной функции передаточной характеристики (рис. 5).

Интегральную нелинейность определяют путем сравнения напряжений, при которых происходят кодовые переходы. Для идеального

АЦП эти переходы будут происходить при значениях входного напряжения, точно кратных МЗР (младшему значащему разряду):

$\delta_{INL} = \pm 0,0014 \%$ от общего диапазона входных значений ЦАП.

3. Дифференциальная нелинейность определяется как отклонение (с учетом знака) расстояния между двумя соседними уровнями $U_{\text{вых}}$ от идеального значения (рис. 6):

$\delta_{DNL} = \pm 0,0007 \%$ от общего диапазона входных значений ЦАП.

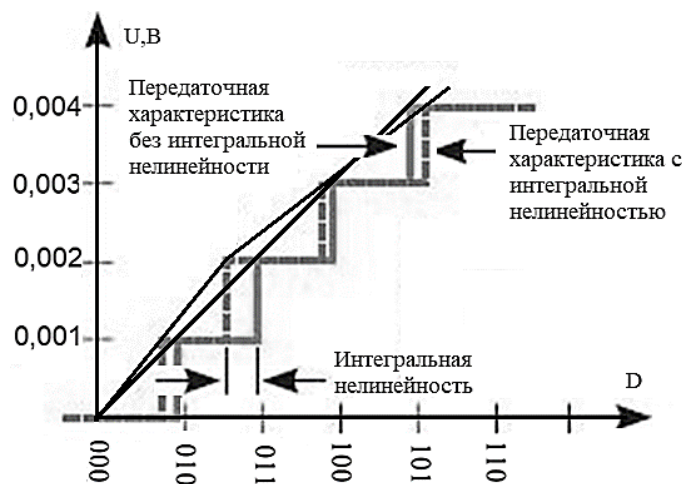


Рис. 5. Интегральная нелинейность ЦАП

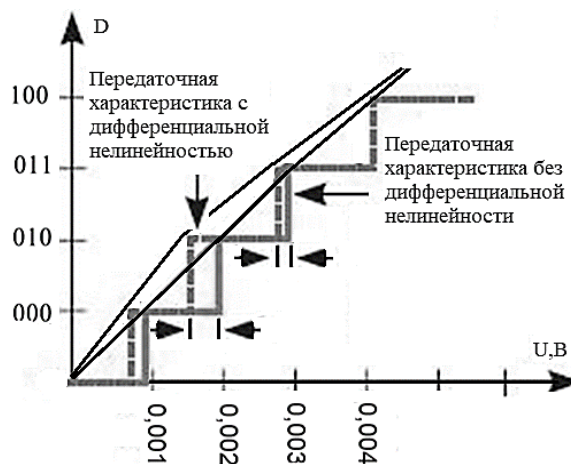


Рис. 6. Дифференциальная нелинейность ЦАП

4. Ошибка от изменения коэффициента передачи/усиления характеризуется отклонением реальной СХ от крутизны идеальной. Так как ошибка от усиления изменяет наклон всей СХ, то относительная ошибка будет на каждом шаге преобразования. Эта ошибка не коррелирована с сигналом и имеет равномерное распределение. Ее среднеквадратическое значение совпадает с среднеквадратичным отклонением распределения и имеет значение: $\delta_{KB} \approx 0,00011\%$ от общего диапазона входных значений ЦАП.

Полная относительная погрешность ЦАП:

$$\delta_{dac} = \sqrt{\delta_{add}^2 + \delta_{INL}^2 + \delta_{DNL}^2 + \delta_{KB}^2} = \pm 0,0016\%.$$

Блоки усиления сигнала, фильтрации и смещения были построены на базе малошумящего операционного усилителя TL074 (Texas Instruments). Его основные характеристики:

- входное напряжение смещения ($U_{см}$): 10 мВ;
- скорость нарастания выходного напряжения (V_U): 13 В/мкс;
- граничная частота усиления ($F_{гр}$): 3 МГц;
- коэффициент ослабления синфазного сигнала ($K_{осс}$): 70 дБ.

Для малошумящего операционного усилителя TL074, применяемого в данной системе, ошибка усиления равна $\delta_y = 0,0005\%$ от общего диапазона входных значений, $\delta_T = 0,5 \text{ ppm}/^\circ\text{C} = 0,00005\%/^\circ\text{C}$. Температурное смещение отсчитывается при отклонении температуры от 25°C . Учитывая, что ЦАП работает в нормальных условиях по ГОСТ 8.395–80, температурным смещением можно пренебречь:

$$\delta_{us} = \sqrt{\delta_y^2 + \delta_t^2} = \pm 0,0005\%$$

Рассчитаем относительную погрешность фильтра низкой частоты, для этого преобразуем схему, исключив из нее конденсаторы. Измененная схема показана на рис. 7.

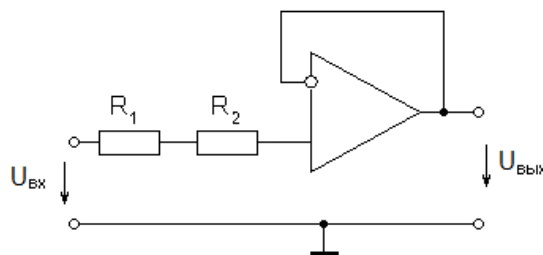


Рис. 7. Преобразованная схема фильтра низкой частоты

Погрешность от неточности коэффициента усиления отсутствует, так как коэффициент равен 1. Погрешность от влияния входных токов также отсутствует, так как коэффициент равен 1.

Погрешность, вызванная напряжением смещения:

$$\delta_{uc} = \frac{U_c}{U_{ВхMax}} 100\% = 0,00005\%,$$

$$\delta_{ФНЧ} = \sqrt{\delta_{uc}^2} = \pm 0,00005\%.$$

Погрешность фильтра низкой частоты в небольшое число раз меньше остальных погрешностей, поэтому ее вклад в полную погрешность оказывается незначительным. В таком случае данной погрешностью можно пренебречь.

Аналогичным образом рассчитаем погрешность смещения сигнала, которая будет зависеть только от погрешности, вызванной напряжением смещения:

$$\delta_{sm} = \sqrt{\delta_{uc}^2} = \pm 0,00005\%.$$

Погрешность смещения сигнала в небольшое число раз меньше остальных погрешностей, поэтому ее вклад в полную погрешность оказывается незначительным. В таком случае данной погрешностью можно пренебречь.

Тогда полная относительная погрешность измерений:

$$\delta_n = 1,1 \cdot \sqrt{\delta_{эм}^2 + \delta_{дас}^2 + \delta_{ис}^2 + \delta_{ФНЧ}^2 + \delta_{см}^2} = \\ = 1,1 \cdot \sqrt{(0,0016)^2 + (0,0005)^2} \approx 0,00187 \, \%.$$

В процессе исследования была разработана информационно-измерительная система для контроля технического состояния электроэнцефалографа на основе функционального генератора.

Разработанный функциональный генератор сигналов произвольной формы обеспечивает возможность формирования как стандартных форм сигналов, так и сигналов специальной формы, что позволит снизить затраты на эксплуатацию и проведение испытаний, расширить области применения (реальные условия, автономный режим), позволит построить многоканальные распределенные системы, в том числе автоматизированные системы, и обеспечит возможность оперативной передачи измерительных данных.

Проведенный метрологический анализ ИИС для автоматизированного контроля технического состояния электроэнцефалографа показал, что относительная погрешность измерения испытательного сигнала не превышает 0,00187 %, что подтверждает высокую степень соответствия испытательных сигналов реальным сигналам головного мозга. Разработана ИИС для ав-

томатизированного контроля технического состояния электроэнцефалографа, которая позволяет обеспечить автоматизированный контроль электроэнцефалографов и уменьшить погрешность измерения с 5–7 % до 0,00187 %. Разработанная методика дистанционной автоматизированной поверки электроэнцефалографов с использованием разработанной ИИС позволяет проводить дистанционный контроль технического состояния электроэнцефалографов на месте их эксплуатации, что уменьшает затраты на контроль технического состояния на 50 %.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кетов, Д. Ю. Информационно-измерительная система автоматизированного контроля технического состояния электроэнцефалографа : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Д. Ю. Кетов, 2023. – 179 с.
2. Ketov, D., Nefedev A., Bezborodov S. Hardware and Software Equipment for Monitoring the Technical Condition of the Electroencephalograph // Series on Biomechanics. – Vol. 36. – No. 2 (2022). – P. 55–62.
3. Кетов, Д. Ю. Применение DDS-генератора для мониторинга технического состояния электроэнцефалографа / Д. Ю. Кетов, А. И. Нефедьев // Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. – 2022. – № 1(38). – С. 45–49.
4. Кетов, Д. Ю. Автоматизированный сетевой стенд для оперативных испытаний энцефалографа / Д. Ю. Кетов, Ю. П. Муха // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 11 (176) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2015. – (Серия «Электроника, измерительная техника, радиотехника и связь»; вып. 12). – С. 84–88.
5. Кетов, Д. Ю. Автоматизированный сетевой программный комплекс, предназначенный для проведения инструментального контроля технического состояния электроэнцефалографа / Д. Ю. Кетов, Ю. П. Муха, М. Л. Черножуков, С. С. Либенко // Телекоммуникации. – 2019. – № 4. – С. 42–48. – EDN XAOJCL.

УДК 621.3.089.62

DOI: 10.35211/2500-0586-2025-2-51-29-35

Д. Ю. Кетов¹, А. И. Нефедьев^{1,2}

СИСТЕМА ФИКСАЦИИ НАРУШЕНИЙ В РАБОТЕ ГИСТОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОРОВ ПРИ ПЕРВИЧНОЙ ДИАГНОСТИКЕ

¹ Волгоградский государственный медицинский университет

² Волгоградский государственный технический университет

ya_st@bk.ru, nefediev@rambler.ru

Автор, ответственный за переписку: Алексей Иванович Нефедьев, nefediev@rambler.ru

В статье приводятся результаты разработки системы фиксации нарушений в работе гистологических процессоров при первичной диагностике, что позволяет врачу уточнить диагноз и определить морфологические особенности патологического процесса. Данная система является на данный момент более точной и удобной, так как позволяет выявить неисправность в конкретный момент времени и фиксировать причину неисправности. Главным преимуществом разработанной системы является возможность одновременного контроля нескольких аппаратов. Также данная система может быть использована для расширения штатной системы автоматического контроля.

Ключевые слова: автоматизированная система, нарушение, патологический процесс, неисправность, первичная диагностика, контроль

D. Yu. Ketov¹, A. I. Nefed'ev^{1,2}

**SYSTEM FOR RECORDING DISORDERS IN THE FUNCTIONING
OF HISTOLOGICAL PROCESSORS IN PRIMARY DIAGNOSIS**

¹ **Volgograd State Medical University**

² **Volgograd State Technical University**

The article presents the results of the development of a system for recording disturbances in the operation of histological processors during primary diagnostics, which allows the doctor to clarify the diagnosis and determine the morphological features of the pathological process. This system is currently more accurate and convenient, as it allows you to identify a malfunction at a specific point in time and record the cause of the malfunction. The main advantage of the developed system is the ability to simultaneously monitor several devices. This system can also be used to expand the standard automatic control system.

Keywords: automated system, violation, pathological process, malfunction, primary diagnostics, control

В медицинских учреждениях, исследовательских лабораториях и судебно-медицинской экспертизе проводят гистологическое исследование аутопсийного, биопсийного материала, что позволяет врачу уточнить диагноз и определить морфологические особенности патологического процесса. При диагностике заболеваний, для определения структурных изменений органов и тканей человека, широко применяют специализированное устройство, используемое при подготовке образцов ткани для гистологического исследования. При работе с большими объемами материала применяют автоматизированные гистологические системы линейного и карусельного типа. Они ускоряют процесс обезвоживания за счет постоянного перемешивания жидкости в емкостях, с последующими операциями проводки в промежуточных смесях и обработки в несколько этапов парафинами.

При подготовке материала требуется правильность выполнения заданных программ и режимов работы и корректной настройки оборудования. А предотвращение ошибок на этапе гистологической обработки является актуальной практической задачей, которую постоянно приходится решать в любой патоморфологической лаборатории.

При возникновении неисправностей в работе данного оборудования инженер сталкивается с рядом проблем. Одна из них – большая длительность выполнения программ порядка 14–24 часа, что затрудняет диагностику. Сервисные инженеры, как правило, в таких случаях проводят испытания на коротких программах, что не всегда позволяет выявить причины неисправности. В результате делаются некорректные заключения об исправности оборудования и неумелых действиях медицинского персонала с последующим снятием оборудования с гарантии.

Другая проблема связана с тем, что работа оборудования проходит как в дневное, так и в ночное время. В отсутствие медицинского персонала оборудование фактически предоставлено само себе. В случае возникновения нештатной ситуации в оборудовании отсутствуют системы автоматического контроля за его работой. В результате это может привести к порче самого оборудования и возникновению опасных ситуаций. В процессе работы используются агрессивные жидкости (ксилол) и парафины, нагретые до температуры плавления, которые могут вызывать как порчу защитных элементов корпуса, так и повреждения внутренних элементов и плат управления. Поэтому актуальна разработка системы, позволяющей при первичной диагностике собирать максимальное количество информации о состоянии прибора.

В настоящее время для обнаружения подобных сбоев используют системы видеофиксации. Они осуществляют визуальный контроль для предварительной оценки ситуации. Но данные системы слабо развиты и не обладают всем необходимым функционалом.

Также в процессе работы гистологических процессоров можно столкнуться со следующими проблемами:

1) Неверное выполнение алгоритмов заданных программ (возможность одновременного выполнения трех разных программ в гистологическом процессоре МТпоинт TLP-144). Данное оборудование может работать с несколькими корзинками материала. В случае возникновения алгоритмического сбоя происходит попытка перемещения двух корзинок в одну ванну с промежуточными смесями (ксилол) или парафинами, в результате чего может произойти порча оборудования и материала. Сбой очередности выполнения заданных этапов программы ведет к нарушению технологии проведения гистологических образцов.

2) Неверная установка температуры подогрева всех ванночек, что может приводить к перегреву парафинов и порче образцов, либо недостаточному прогреву парафинов по всему объему и, как следствие, застреванию корзинки в ванночке и сбрасыванию корзинки с руки манипулятора.

3) Чувствительность оборудования к внешним питающим сетям. Используются дополнительные источники бесперебойного питания (МТпоинт TLP-144).

4) Нарушение в работе функции перемешивания ведет к неравномерному пропитыванию образца, обеспечивая менее точные и надежные результаты.

5) Нарушение в работе времени задержки корзины способствует менее точному и неконтролируемому стеканию реагентов, и возможному попаданию их в соседние ванночки, что

в свою очередь ухудшает качество проводки.

Для выявления характера неисправности требуется постоянное наблюдение за оборудованием и использование специализированных диагностических систем, предназначенных для работы в указанных временных интервалах. В настоящее время применяют ряд методов контроля и вспомогательное измерительное оборудование, которые не показали достаточной эффективности и не позволяют проводить комплексную диагностику.

В результате была разработана автоматизированная система для фиксации нарушений в работе гистологического оборудования, структурная схема которого представлена на рис. 1, в состав которой входит портативный измерительный комплекс и программное обеспечение для оценки и отображения результатов измерения [1].

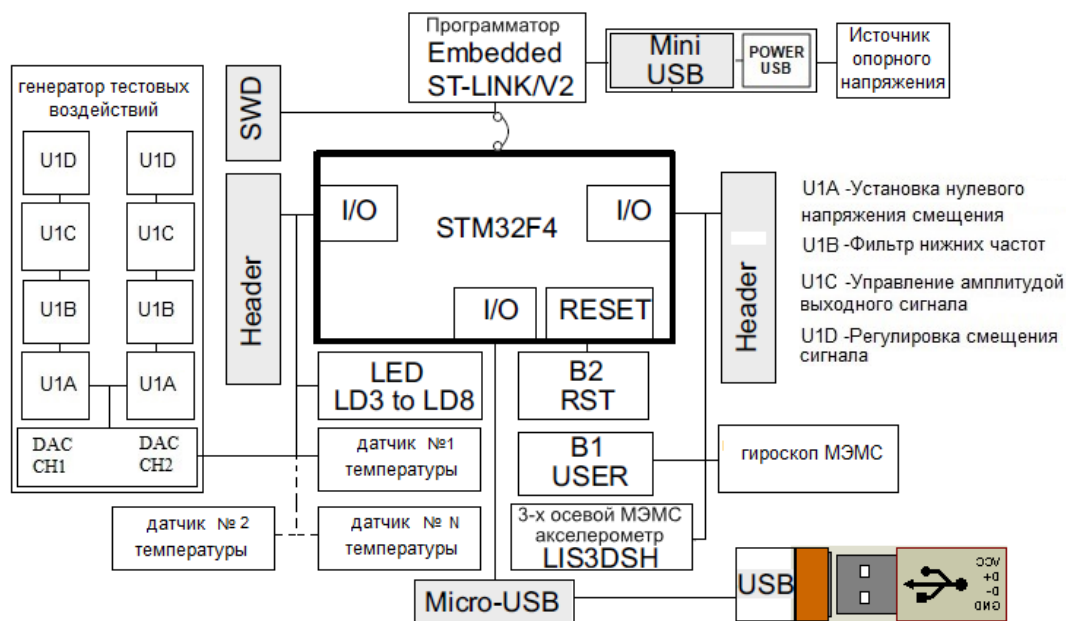


Рис. 1. Структурная схема автоматизированного испытательного стенда

Разработанная система рассчитана на работу по длительным программам (порядка 24 часов) и даже в случае нерегулярного проявления неисправности способна ее зафиксировать.

В системе, для поиска указанных выше неисправностей, используется следующий набор тестовых воздействий и данных с измерительных датчиков:

1) Запись данных с трехосевого акселерометрического датчика MEMS LIS3DSH для фиксации положения, направления движения, времени перемещения руки манипулятора с образцами. Под поставленные задачи был выбран

высокоэффективный микроэлектромеханический цифровой акселерометр с ультранизким энергопотреблением, схема которого представлена на рис. 2.

Акселерометр может быть запрограммирован для выполнения специфического алгоритма: детектирование движений определенной сигнатуры, когда сенсор за счет своего функционала способен зарегистрировать требуемый профиль ускорений и выполнить какое-либо действие (генерация прерывания хост-контроллеру) в соответствии с этим профилем (реакция устройства на действия, которые оно совершает

при взаимодействии с тем или иным электронным устройством или объектом). Эта особенность позволяет снизить вычислительную на-

грузку на хост-контроллер, уменьшить суммарное энергопотребление и расширить функционал системы в целом.

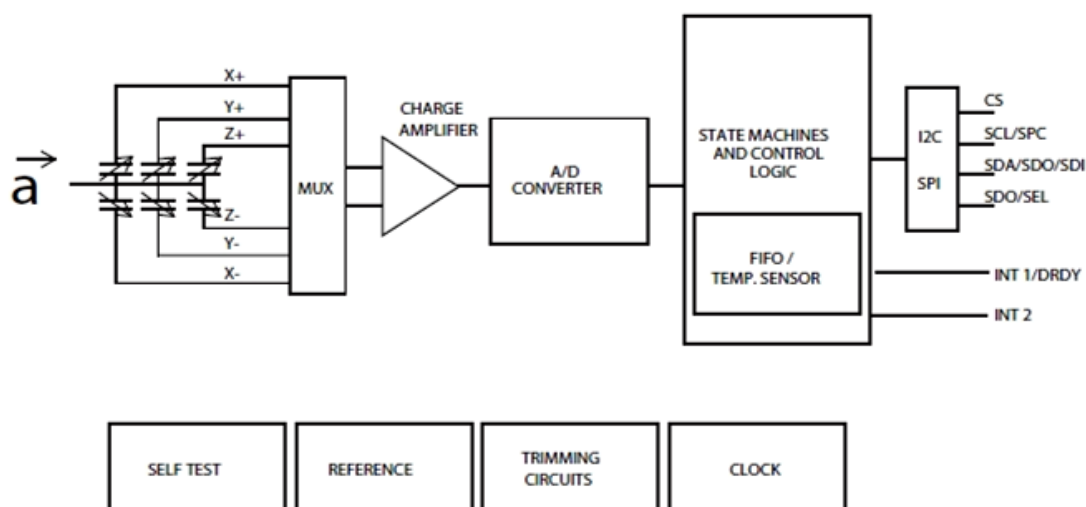


Рис. 2. Блок-схема (MEMS) трехосевого акселерометра

Основные характеристики MEMS LIS3DSH:

Диапазон питающего напряжения 1,71–3,6 В;

Режим ультранизкого энергопотребления менее 11 мкА;

Динамический изменяющийся предел измерений $\pm 2g/\pm 4g/\pm 6g/\pm 8g/\pm 16g$;

16-разрядный формат выходных данных;

Генерирование сигналов прерывания по определенному шаблону движения;

Встроенный температурный сенсор;

Встроенный режим самотестирования;

Диапазон рабочих температур от -40°C до $+85^{\circ}\text{C}$;

Стойкость к ударам до 10000 g;

Чувствительность mg/digit 0,06;

Частота среза, Гц 1600.

В результате работы автоматизированной системы с применением данного датчика были получены следующие результаты (рис. 3). На графике зафиксировано движение руки манипулятора при опускании образца в ванночку с ксилолом – окно 2. Можно оценить длительность выполнения операции, направление движения, характерное ускорение в процессе выполнения операции (по высоте и наклону вертикальной части кривой), наличие вибраций и равномерность движения, в целом зафиксировать возможные отклонения от штатных режимов работы (удар о препятствие – окно 1, сброс материала, падение руки манипулятора с образцами). Также можно обнаружить нару-

шения в работе функции перемешивания – окно 4, длительность погружения в каждую емкость. В данном примере на графике произведено 10 повторений операции перемешивания. Также зафиксировать нарушения в работе времени задержки корзины над ванной при стекании реагентов.

В результате осуществляется как визуальное наблюдение, так и программный контроль за правильностью работы алгоритмов при тестировании по различным программам, записанным в памяти гистологического аппарата для получения первичной информации о характере неисправности и последующее составление алгоритма дальнейшего поиска неисправного блока. У инженера есть возможность просмотреть запись работы руки манипулятора длительностью 24 часа.

2) Многоканальный блок с датчиками температур позволяет фиксировать распределение температур со всех ванночек. Позволяет оценить степень прогрева парафинов по всей емкости, нагрев ванны с промежуточными смесями (ксилोल). Данная возможность позволяет обнаружить проблему застревания корзинки в ванночке и последующего сбрасывания корзинки с руки манипулятора. Также неправильный нагрев всех жидкостей и парафинов для предотвращения нарушения технологии проводки.

3) Блок контроля параметров питающей сети и формирования помех предназначен для ге-

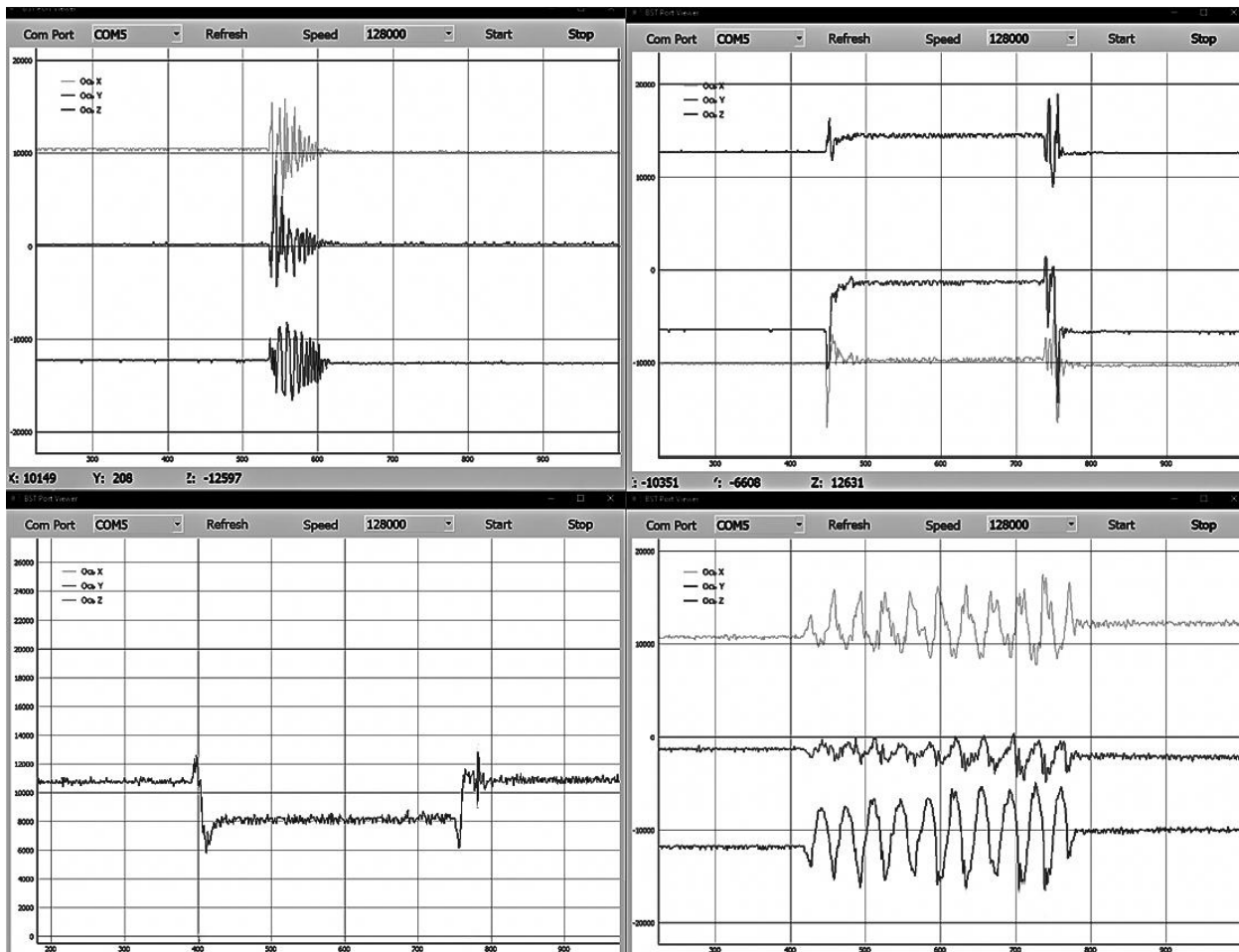


Рис. 3. График для фиксации положения руки манипулятора с образцами, направления движения, времени перемещения

нерации сетевых наводок. Генератор тестовых воздействий формирует наводки по заданным параметрам и необходимой формы воздействующего сигнала. Также позволяет оценить основные параметры питающей сети и вести их запись продолжительностью 24 часа. Есть возможность оценить показатели и нормы качества электрической энергии такие как отклонение частоты – отклонение значения основной частоты напряжения электропитания от номинального значения, Δf , Гц

$$\Delta f = f_m - f_{nom}$$

где f_m – значение основной частоты напряжения электропитания, Гц, измеренное в интервале времени 10 с (в соответствии с требованиями ГОСТ 30804.4.30, подраздел 5.1 – отклонение частоты в синхронизированных системах электроснабжения не должно превышать $\pm 0,2$ Гц в течение 95 % времени интервала в одну неделю и $\pm 0,4$ Гц в течение 100 % времени интервала в одну неделю); f_{nom} – номинальное значение частоты напряжения электропитания, Гц.

Медленные изменения напряжения электропитания (как правило, продолжительностью более 1 мин) обусловлены обычно изменениями нагрузки электрической сети. Показателями, относящимися к медленным изменениям напряжения электропитания, являются отрицательное $\delta U(-)$ и положительное $\delta U(+)$ отклонения напряжения электропитания в точке передачи электрической энергии от номинального/согласованного значения, %:

$$\delta U_{(-)} = \left[\frac{(U_0 - U_{m(-)})}{U_0} \right] \cdot 100;$$

$$\delta U_{(+)} = \left[\frac{(U_{m(+)} - U_0)}{U_0} \right] \cdot 100$$

где $U_{m(-)}$, $U_{m(+)}$ – значения напряжения электропитания, меньшие U_0 и большие U_0 соответственно, усредненные в интервале времени 10 мин в соответствии с требованиями ГОСТ 30804.4.30, подраздел 5.12; U_0 – напряжение, равное стандартному номинальному напряжению U_{nom} .

В том числе колебания напряжения, фликер и прочие характеристики в соответствии с ГОСТ 32144-2013.

В результате использования данной системы отпадает необходимость использования коротких программ, которые не всегда позволяют имитировать ситуацию, при которой произойдет сбой.

Портативный измерительный комплекс, место установки которого представлено на рис. 4, представляет собой специализированное изме-

рительное оборудование, которое предназначено для испытаний гистологических систем линейного типа в течение длительного времени.

Автоматизированный испытательный стенд представляет собой совокупность рабочей области для закрепления тестируемого устройства и измерительного оборудования, необходимого для снятия показателей реакции медицинского прибора на внешнюю нагрузку.

Его структурная схема представлена на рис. 4 [2; 3].

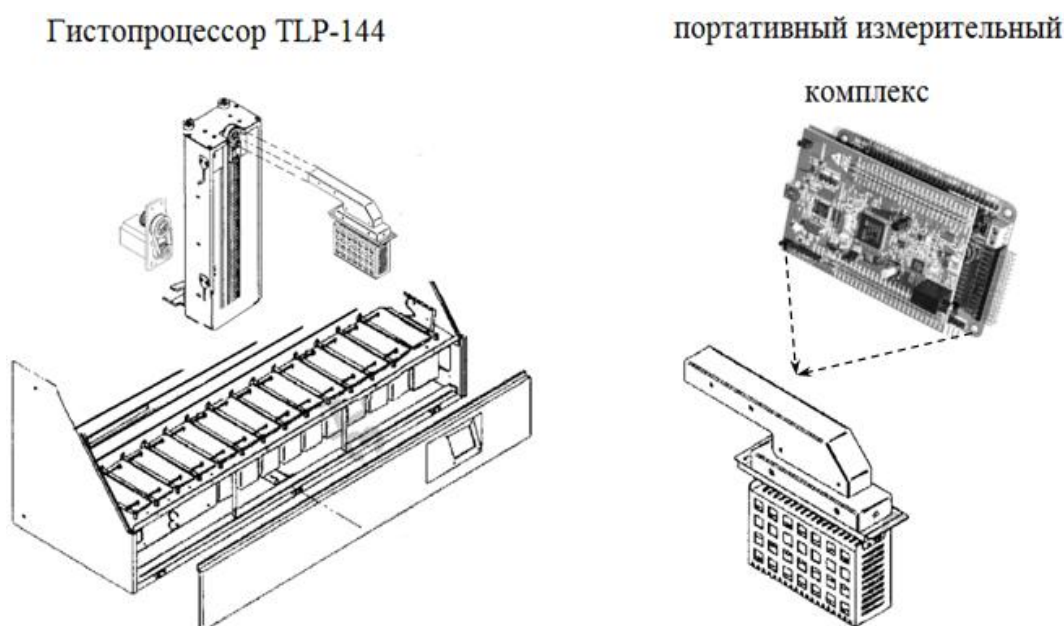


Рис. 4. Точка установки портативного измерительного комплекса

В процессе работы диагностической системы запускается программное обеспечение, которое осуществляет визуализацию данных получаемых от аппаратной части устройства (рис. 5) [4].

Инженеру требуется произвести предварительную настройку скорости опроса устройства, запустить процесс записи данных с акселерометрического датчика, и выбрать программу работы гистопроцессора линейного типа (ПО проверяет положение руки манипулятора и устанавливается нулевое положение, также выбирается одна из программ подготовки образцов 12–24 часов).

Далее требуется ожидание корректного выполнения программы диагностируемого оборудования или обнаружение ошибки. Во время работы гистопроцессора все данные будут регистрироваться и отображаться в графической форме, представленной на рис. 5, и записываться на компьютере инженера.

Следующим шагом инженеру требуется провести анализ полученных графиков и выявить, на каком из этапов испытуемый аппарат начал некорректную работу, или произошел сбой – сброс корзины с образцами [5].

Разработанная ИИС позволяет по снятой измерительной информации производить анализ корректности работы испытуемого оборудования. Для этого анализируется:

- алгоритм перемещения корзины от одной емкости к другой согласно программе проводки;
- алгоритм перемещения двух корзин одновременно, в соответствии с двумя различными программами;
- работа защиты от перебоев питания;
- выполнение программы после отключения электропитания;
- длительность погружения в каждую емкость;
- и другие параметры.

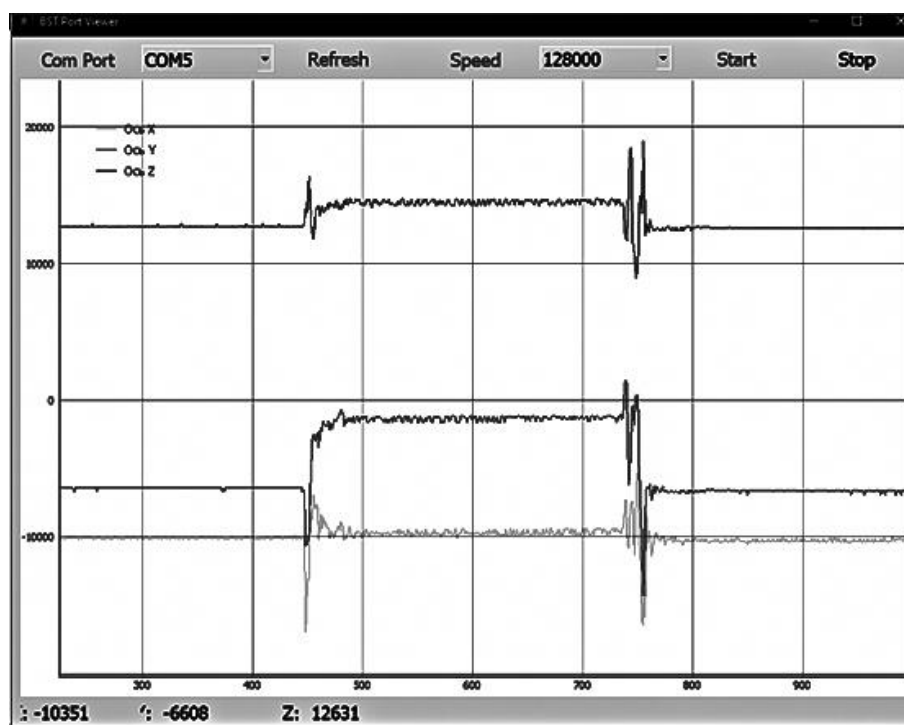


Рис. 5. Графическая форма

Этот метод диагностики является на данный момент более точным и удобным, так как позволяет выявить неисправность в конкретный момент времени и фиксировать причину неисправности. Главным преимуществом системы также является возможность одновременного контроля нескольких аппаратов.

Данную разработку также можно порекомендовать к использованию в качестве расширения штатной системы автоматического контроля.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кетов, Д. Ю. Информационно-измерительная система автоматизированного контроля технического состояния электроэнцефалографа : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Д. Ю. Кетов, 2023. – 179 с.

2. Ketov D., Nefedev A., Bezborodov S. Hardware and Software Equipment for Monitoring the Technical Condition of the Electroencephalograph//Series on Biomechanics. – Vol. 36. – No. 2 (2022). – P. 55–62.

3. Кетов, Д. Ю. Применение DDS-генератора для мониторинга технического состояния электроэнцефалографа / Д. Ю. Кетов, А. И. Нефедьев // Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. – 2022. – № 1(38). – С. 45–49.

4. Кетов, Д. Ю. Автоматизированный сетевой стенд для оперативных испытаний энцефалографа / Д. Ю. Кетов, Ю. П. Муха // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 11 (176) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2015. – (Серия «Электроника, измерительная техника, радиотехника и связь»; вып. 12). – С. 84–88.

5. Автоматизированный сетевой программный комплекс, предназначенный для проведения инструментального контроля технического состояния электроэнцефалографа / Д. Ю. Кетов, Ю. П. Муха, М. Л. Черножуков, С. С. Либенко // Телекоммуникации. – 2019. – № 4. – С. 42–48. – EDN XAOJCL.

УДК 681.3

DOI: 10.35211/2500-0586-2025-2-51-36-43

*А. Н. Шилин, И. А. Коптелова, Л. А. Коновалова***МЕТОДИКА МОРФОЛОГИЧЕСКОГО СИНТЕЗА ПРИБОРОВ
НА ОСНОВЕ МЕТОДА И АНАЛИЗА ИЕРАРХИЙ****Волгоградский государственный технический университет**

eltech@vstu.ru, shilina@yandex.ru, mila27121989@mail.ru

Автор, ответственный за переписку:

Людмила Александровна Коновалова, mila27121989@mail.ru

Проектирование информационно-измерительных и управляющих систем (ИИУС) – сложная задача, требующая выбора компонентов (датчиков, фильтров, исполнительных механизмов) из множества доступных технологий. Особенно актуально это для интеллектуальных электромеханических систем (SEMS), где необходимо учитывать совместимость и приоритет параметров. Существующие методы, такие как морфологический синтез на основе анализа иерархий, формализуют выбор элементов. Однако их недостаток – необоснованность сложных матричных операций, что может привести к неоптимальным решениям. Цель исследования: для достижения цели, заключающейся в оптимизации выбора элементов ИИУС необходимо провести сравнительный анализ различных методик матричной обработки экспертных оценок и выбрать оптимальный вариант. Результаты: проведено исследование матричных операций морфологического синтеза и выявлено, что сложные матричные операции выполняют функцию усреднения экспертных оценок. Было предложено: решить операцию усреднения оценок с помощью более простых операций, что позволяет уменьшить трудоемкость синтеза ручным способом.

Ключевые слова: информационно-измерительные и управляющие системы, SEMS, эвристические методы проектирования, метод анализа иерархий, парные сравнения, матрица смежности, комплексные приоритеты

*A. N. Shilin, I. A. Koptelova, L. A. Konvalova***THE METHODOLOGY OF MORPHOLOGICAL SYNTHESIS
OF DEVICES BASED ON THE METHOD AND ANALYSIS OF HIERARCHIES****Volgograd State Technical University**

Design of information measurement and control systems (IIAS) – a complex task requiring the selection of components (sensors, filters, actuators) from a variety of available technologies. This is especially true for intelligent electromechanical systems (SEMS), where compatibility and parameter priority must be taken into account. Existing methods, such as morphological synthesis based on hierarchy analysis, formalize the selection of elements. However, their disadvantage is the unreasonableness of complex matrix operations, which can lead to suboptimal solutions.

The purpose of the study: in order to achieve the goal of optimizing the selection of IISS elements, it is necessary to conduct a comparative analysis of various methods of matrix processing of expert assessments and choose the best option. Results: A study of matrix operations of morphological synthesis was conducted and it was revealed that complex matrix operations perform the function of averaging expert estimates. It was proposed to solve the averaging of estimates using simpler operations, which reduces the complexity of manual synthesis.

Keywords: information-measuring and control systems, SEMS, heuristic design methods, hierarchy analysis method, pair comparisons, adjacency matrix, complex priorities

Введение

В связи с масштабной цифровизацией промышленных областей актуальность применения информационно-измерительных и управляющих систем (ИИУС) быстро возрастает. Эта тенденция обусловлена множеством факторов, среди которых можно выделить необходимость повышения эффективности производственных процессов, улучшение качества продукции, а также адаптацию к быстро меняющимся условиям рынка. Современные требования к производству требуют от предприятий гибкости,

способности к быстрой реакции на внешние изменения и возможности интеграции новых технологий, что невозможно без внедрения высокотехнологичных систем управления. ИИУС стали ключевым инструментом для достижения этих целей, так как они позволяют осуществлять мониторинг и анализ производственных процессов в реальном времени. Проектирование ИИУС является непростой задачей, так как выбор основных элементов системы должен быть обоснованным. Компонентов ИИУС множество. Это датчики, усилители, фильтры, уст-

ройства обработки информации, исполнительные механизмы, устройства позиционирования измерительных преобразователей. Проблема выбора связана с тем, что на сегодняшний день существует большое разнообразие вариантов основных элементов системы. Сложность заключается в выборе одного варианта из множества, который бы удовлетворял сразу нескольким критериям с условием их приоритетности.

Особенно актуальна проблема подбора элементов для интеллектуальных электромеханических систем SEMS (Smart Electro Mechanical Systems), которые в своем составе содержат механические и электромеханические устройства, подсистемы. Вариантов датчиков (фотоприемников) значительно больше, чем количество вариантов электромеханических систем. Но необходимо учитывать совместимость элементов ИИУС и электромеханических устройств при проектировании SEMS. Таким образом, это является довольно сложной и трудоемкой задачей.

Совсем недавно выбор решения в различных сферах жизни рассматривался как процесс, имеющий ярко выраженный субъективный характер, зависящий от личного опыта, знаний и интуиции специалистов. В этом контексте принятию решения часто предшествовал длительный анализ информации, который, как правило, был ограничен доступными данными и временем его обработки. Однако в условиях быстрого изменения внешней среды и усложнения практических задач, строгость и точность этого подхода начинают вызывать все больше опасений. Рынки становятся непредсказуемыми, информационные потоки увеличиваются в объемах, а сами задачи требуют комплексного подхода и быстрой реакции. В связи с этим на передний план выходит необходимость применения современных научных методов аналитики, которые способны справляться с большими объемами данных и обеспечивать функциональность, необходимую для объективного анализа ситуации. Существующие методы больше не могут финансировать сложные или многогранные условия, и постепенно осознается, что принятые решения могут быть улучшены путем использования объективных, основанных на данных, подходов. В результате этой эволюции на свет начали появляться специальные информационно-аналитические технологии, которые опираются на новые математические методы, обладающие высокой вычис-

лительной мощностью и способные обрабатывать большие объемы информации с высокой степенью детализации.

Так как при выборе определенного компонента для конкретной задачи необходимо учитывать приоритетный список технических характеристик, который имеет каждый элемент ИИУС, то мы имеем дело с многокритериальной задачей принятия решения. Многокритериальные задачи представляют собой сложный класс задач интеллектуальной деятельности человека. Наличие нескольких критериев усиливает нагрузку на ограниченную естественными пределами оперативную память человека. А это, в свою очередь, делает задачу более неопределенной, требующей нестандартного мышления. Сложность таких задач состоит в том, что, как правило, не существует варианта, который бы был лучшим сразу по всем параметрам. Поэтому выбор оптимального решения непосредственно связан с решением проблемы замещения (компенсации). Это проблема сопоставления по предпочтению потерь по одним критериям с выигрышами по другим.

В многокритериальных методах принятия решения одно из ключевых понятий, на котором базируются различные подходы, это относительная (сравнительная) важность (значимость) критериев. Первоначально для оценки критериев использовались простые высказывания, такие как «один критерий важнее другого» и «критерии равноважны». Эти утверждения, хотя и предоставляли некоторую основу для анализа, были излишне упрощенными и не учитывали множество факторов, которые могли влиять на выбор. Поэтому необходимостью стало более детальное определение, которое могло бы выразить степень важности одного критерия относительно другого. В процессе дальнейшего развития теории было предложено использовать более количественный подход, позволяющий сообщить о важности критериев в числовом выражении. Таким образом, возникло понятие «один критерий важнее другого во столько-то раз», которое дало возможность более точно провести сравнительный анализ. Эта концепция значительно расширила горизонты многокритериального анализа, предоставив более гибкие инструменты для работы с комплексными и многогранными задачами, и разработали теорию «количественной важности». Основы теории важности критериев находят свое применение в разнообразных практи-

ческих задачах, например, при выборе основных и наиболее значимых элементов ИИУС. Интеграция количественной оценки важности критериев позволяет принимать более обоснованные и взвешенные решения на основе объективных данных. Практическое применение данной теории позволяет использовать имеющуюся информацию о предпочтениях, что, в свою очередь, способствует более эффективному отбору решений.

Для проектирования сложных технических систем на практике широко применяют эвристические методы. Эвристические методы решения задач организуют и направляют творческий поиск, повышая эффективность, целенаправленность и оперативность проектирования. Для разработки эвристических методов проектирования необходимо обобщение большого числа решенных задач в различных областях техники. Поэтому наибольший эффект при использовании эвристических методов может быть получен специалистами, которые обладают большим опытом и высоким творческим потенциалом.

Из проведенного анализа существующих методов проектирования технических систем можно сделать следующие выводы [1]. Все эвристические методы проектирования делятся на два основных класса: трансформационные и морфологические методы.

Трансформационные методы решения базируются на ряде принципов. На стадии анализа формируется план решения задачи синтеза. Реализация его осуществляется с помощью различных преобразований (трансформаций) прототипа с помощью эвристических приемов. Весь цикл решения задачи (анализ–синтез) может многократно повторяться с различными прототипами и эвристическими приемами. Но нужно отметить, что трансформационные методы не всегда продуктивны и при многократном повторении цикла. Чисто эвристические операции получения из прототипа нового технического решения (ТР) могут быть выполнены только человеком, так как ЭВМ не может предугадывать, фантазировать, строить гипотезы и не обладает интуицией. Трансформационные методы не поддаются автоматизации, потому что не формализованы. Это привело к возникновению морфологических методов.

Морфологические методы базируются, как правило, на комбинаторном принципе поиска решений. Это позволяет найти наибольшее число всех возможных вариантов решения по-

ставленной проблемы путем комбинирования основных структурных элементов системы. Суть метода состоит в следующем. В системе выделяют несколько характерных признаков, где каждый характеризует какой-то параметр или характеристику системы, от которых зависит решение проблемы. Каждому выделенному признаку соответствует список его различных вариантов-альтернатив. Признаки с альтернативами находятся в таблице – в «морфологическом ящике». Новые варианты решения можно выявить, перебирая всевозможные сочетания этих альтернатив.

Морфологическое множество решений – описание всех потенциально возможных (мыслимых) решений данной задачи можно получить на стадии морфологического анализа. Морфологический подход позволяет построить описание целого класса систем на базе известных ТР, а следовательно, и получить множество решений.

Морфологическое множество (ММ) представляет собой мощный инструмент для многомерного анализа и классификации систем, что позволяет исследователям выявлять и структурировать различные параметры и характеристики объектов изучения. Основой этого метода является морфологическая таблица (МТ), в которой каждая строка соответствует определенному исследуемому объекту, классифицируемому по значимым признакам. Это означает, что МТ служит основой для многомерного систематического подхода, который не только упорядочивает, но и расширяет представление о возможностях, предлагаемых различными значениями этих признаков. Важной особенностью морфологической таблицы является то, что в ней фиксируются не только известные, но и все допустимые значения признаков, что позволяет учесть множество альтернативных аспектов. Эти аспекты могут генерировать новые и неожиданные вариации технологических решений (ТР), которые ранее могли оставаться незамеченными. Тем не менее, из-за большого количества включенных параметров, некоторые варианты могут оказаться малополезными или недостижимыми с практической точки зрения. Таким образом, морфологические таблицы обладают определенной избыточностью, которую необходимо учитывать при дальнейшем анализе. На следующем этапе морфологического синтеза исследователи начинают отбор оптимальных ТР из полученного множества. Это

требует применения методов, которые могли бы рационализировать процесс выбора наиболее перспективных вариантов. Методы морфологического синтеза классифицируются как эвристические, так как они опираются на стратегии сокращения объема решения задач путем использования ограниченного перебора возможных вариантов. Эвристичность данного подхода заключается в том, что он позволяет находить необходимые решения значительно быстрее, чем это было возможно при полном переборе всех возможных за число шагов комбинаций параметров. Например, с помощью МТ были получены варианты ТР оптико-электронных измерительных приборов с числом $2 \cdot 10^{27}$ [1]. При этом количество признаков, учитываемых в таблице, превышало 50, а диапазон значений колебался от 2–10. Это подчеркивает потенциал морфологического анализа как способа генерации широкого спектра идей и концепций, при этом остается актуальным вопрос оптимизации выбора действительно полезных решений из полученного множества.

Морфологический синтез систем с постоянной структурой должен выполняться в следующей последовательности: точная формулировка поставленной проблемы; выделение функционально законченных блоков системы; сопоставление каждому выделенному блоку значений его реализации; сведение их в МТ; выбор из ММ оптимального набора блоков, который обеспечивает лучшие значения эксплуатационных характеристик системы.

Методику морфологического синтеза рассмотрим на примере проектирования оптико-электронной системы (ОЭС) управления технологическим процессом производства крупногабаритных деталей в нагретом состоянии [5–6]. Подробно рассмотрим процесс выбора фотоприемников, так как они отличаются большим количеством вариантов реализации и обладают множеством параметров и характеристик [7].

Для морфологического синтеза ОЭС выбраны основные характеристики фотоприемников: k_1 – температура приемника, k_2 – постоянная времени, k_3 – напряжение питания, k_4 – длинноволновая граница, k_5 – темновое сопротивление, k_6 – темновой ток, k_7 – удельная обнаружительная способность.

Рассмотрим правила построения квадратной матрицы смежности (табл. 1). В столбцах и строках указывается номер варианта (характеристики, параметры), а на пересечении – коэффициенты (1,5; 1,0; 0,5), показывающие какой вариант предпочтителен. Для расчета β_j каждая строка (k_1 – k_7) в матрице умножается на

вектор-столбец $\sum_{i=1}^n k_i$. Нормированные значения, то есть относительные значения β'_j , полу-

чаются делением β_j на $\sum_{i=1}^m \beta_j$. Относительные значения β'_j представляют собой список приоритетов параметров выбираемых элементов.

Таким образом, мы получили коэффициенты значимости критериев k_1 – k_7 .

Таблица 1

Матрица смежности критериев фотоприемников

Индекс критерия	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	k_6	k_7	$\sum_{i=1}^n k_i$	β_j	β'_j
k_1	1,0	1,5	1,5	0,5	1,5	1,5	1,5	9,0	59,0	0,187
k_2	0,5	1,0	1,5	0,5	1,5	1,5	1,5	8,0	50,5	0,160
k_3	0,5	0,5	1,0	0,5	1,5	1,5	1,5	7,0	43,0	0,136
k_4	1,5	1,5	1,5	1,0	1,5	1,5	1,5	10,0	68,5	0,217
k_5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,0	0,5	0,5	4,0	26,5	0,084
k_6	0,5	0,5	0,5	0,5	1,5	1,0	0,5	5,0	31,0	0,098
k_7	0,5	0,5	0,5	0,5	1,5	1,5	1,0	6,0	36,5	0,115
Всего	–	–	–	–	–	–	–	–	315,0	1

В рамках современных подходов к проектированию оптико-электронных приборов (ОЭП) методический анализ фотоприемников становится ключевым аспектом, так как позволяет

определить оптимальный вариант устройства, который наиболее эффективно будет выполнять поставленные задачи. Рассматриваемая методика ранжирования позволяет не только

оценивать различные типы фотоприемников, но и проводит их сравнительный анализ по ряду параметров, таких как спектральная чувствительность, временные характеристики, уровень шума, устойчивость к внешним воздействиям и другие критически важные элементы. Каждый фотоприемник обладает своими уникальными свойствами, что предопределяет его эффективность в определенных диапазонах волн. Например, болометры и фотосопротивления демонстрируют высокие показатели в длинноволновом диапазоне, обеспечивая стабильную работу и минимальные потери. Эта способность делает их предпочтительными для применения в таких областях, как тепловое излучение и инфракрасная спектроскопия. В то же время фотоумножители, хотя и обладают высокой чувствительностью и быстродействием, не в состоянии обеспечить эффективную работу в длинноволновом диапазоне, их производительность значительно падает, что ограничивает их применение в определенных задачах. Таким образом, при проектировании ОЭП необходимо учитывать ту реальность, что различные фотоприемники могут обеспечивать разные уровни выполнения критических параметров. Для этого необходимо использовать весовые коэффициенты, которые помогут более точно отразить вклад каждого фотоприемника в общее качество системы. При моделировании таких весовых коэффициентов следует принимать во внимание не только физические и электрические характеристики, но также возможные ограничительные условия использования в конкретных приложениях. Это может включать, например, требования к диапазону температур, уровню влажности или необходимости в защите от электромагнитных помех.

Такой комплексный подход обеспечивает более полное понимание возможностей и ограничений каждого типа фотоприемников, позволяя разработчику принимать обоснованные решения, которые впоследствии будут влиять на эффективность и надежность работы всего ОЭП.

Рассмотрим методику выбора типа фотоприемника из пяти вариантов X_1, X_2, X_3, X_4, X_5 с учетом всех критериев k_1-k_7 . Каждому варианту соответствует тип фотоприемника, а именно: X_1 – фоторезистор, X_2 – фотодиод, X_3 – болометр, X_4 – фотоумножитель, X_5 – фотомагнитный приемник.

Оценка вариантов фотоприемников (см. табл. 3) в соответствии с указанным выше методом осуществляется с помощью комплексных приоритетов $B_{i\text{ком}}$ по формуле:

$$B_{i\text{ком}} = \sum_{j=1}^n \beta_j' B_{ij}'$$

где β_j' – относительный приоритет (значимость) j -го критерия; B_{ij}' – относительный приоритет i -го варианта по j -му критерию; n – количество критериев ($n = 7$).

После нахождения относительных приоритетов критериев (см. табл. 1), необходимо последовательно определить абсолютные приоритеты B_{ij} вариантов, а затем – относительные B_{ij}' , которые вычисляются в долях единицы (см. табл. 2). Для расчета B_{ij} каждая строка (X_1-X_5) в матрице умножается на вектор–столбец $\sum_{j=1}^m X_j$. Нормированные значения, то есть относительные B_{ij}' , получаются делением B_{ij} на $\sum_{i=1}^m B_{ij}$.

Таблица 2

Матрица смежности фотоприемников по критерию k_1

Индекс варианта	Матрица смежности по 1-му критерию					$\sum_{j=1}^m X_j$	B_{i1}	B_{ij}'
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5			
X_1	1,0	0,5	1,0	0,5	0,5	3,5	16,00	0,136
X_2	1,5	1,0	1,5	1,0	1,0	6,0	28,50	0,242
X_3	1,0	0,5	1,0	0,5	0,5	3,5	16,00	0,136
X_4	1,5	1,0	1,5	1,0	1,0	6,0	28,50	0,242
X_5	1,5	1,0	1,5	1,0	1,0	6,0	28,50	0,242
Всего	-	-	-	-	-	-	117,50	1

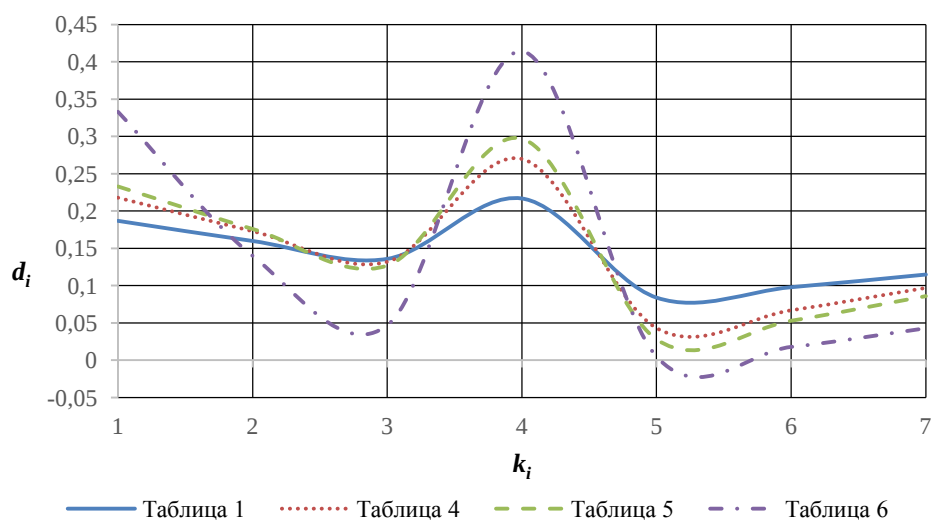
При проведении анализа различных типов фотоприемников важным шагом является вы-

деление и оценка различных критериев k_2-k_7 . На этом этапе требуется определить относи-

На основе вычисленных значений определяется лучший выбор. В нашем случае, вариант под номером 2, который представляет собой фотодиод (X_2 -), имеет наибольшее значение комплекса приоритетов $B_{2ком} = 0,223$. Это значение подчеркивает его высокую эффективность и соответствие необходимым критериям, что делает его предпочтительным вариантом в рассматриваемом контексте.

Поэтому было предложено заменить эту операцию умножением суммы строки на ее среднее значение (табл. 4).

[illegible]



Графики относительных приоритетов, рассчитанных разными способами

На рисунке приведены графики относительных приоритетов, полученных разными способами. Порядок ранжированных ранее критериев не изменился. В первых двух методиках использовалось аддитивное сравнение

(сложение и вычитание) (табл. 5), а в третьей методике – мультипликативное сравнение (умножение и деление с использованием девяти-балльной шкалы отношений) (табл. 6).

Таблица 5

Относительные веса критериев на основе аддитивного сравнения

Индекс критерия	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	k_6	k_7	$\sum_{i=1}^n k_i$	k_{cp}	β_j	β'_j
k_1	1	2	2	0,5	2	2	2	11,5	1,643	18,893	0,233
k_2	0,5	1	2	0,5	2	2	2	10	1,429	14,286	0,176
k_3	0,5	0,5	1	0,5	2	2	2	8,5	1,214	10,321	0,127
k_4	2	2	2	1	2	2	2	13	1,857	24,143	0,297
k_5	0,5	0,5	0,5	0,5	1	0,5	0,5	4	0,571	2,286	0,028
k_6	0,5	0,5	0,5	0,5	2	1	0,5	5,5	0,786	4,321	0,053
k_7	0,5	0,5	0,5	0,5	2	2	1	7	1,000	7,000	0,086
Всего	—	—	—	—	—	—	—			81,25	

Таблица 6

Относительные веса критериев на основе мультипликативного сравнения

Индекс критерия	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	k_6	k_7	$\sum_{i=1}^n k_i$	k_{cp}	β_j	β'_j
k_1	1,000	7,000	7,000	0,111	5,0	3,000	2,0	25,11	3,587	90,08	0,333
k_2	0,143	1,000	7,000	0,143	4,0	2,000	2,0	16,28	2,327	37,89	0,140
k_3	0,143	0,143	1,000	0,200	3,0	3,000	2,0	9,486	1,355	12,85	0,047
k_4	9,000	7,000	5,000	1,000	2,0	2,000	2,0	28,00	4,000	112,00	0,414
k_5	0,200	0,250	0,333	0,500	1,0	0,333	0,5	3,11	0,445	1,39	0,005
k_6	0,333	0,500	0,333	0,500	3,0	1,000	0,25	5,91	0,845	5,00	0,018
k_7	0,500	0,500	0,500	0,500	4,0	2,000	1,00	9,00	1,286	11,57	0,043
Всего	—	—	—	—	—	—	—			270,78	

Выводы

Проведенные исследования различных методик ранжирования показывают, что порядок проранжированных элементов, полученных основной методикой, не изменился. Однако вторая методика, сочетающая использование среднего значения и аддитивного сравнения, требует меньшего количества операций. Это делает ее особенно привлекательной для практического применения, так как она может быть использована без необходимости привлечения специальных программ и сложных алгоритмов. Пользователи могут применять методику непосредственно, что упрощает процесс анализа и принятия решений в ряде профессиональных областей. Тем не менее, применение морфологического синтеза открывает совершенно новые горизонты в проектировании и конструировании оптимальных систем, особенно в области интеллектуальных энергетических систем (ОЭС).

Благодаря гибкому подходу, этот метод позволяет из набора известных узлов и блоков создать конструкции, которые превосходят по эффективности и инновациям традиционные методы проектирования. Это, в свою очередь, может привести к значительным улучшениям в производительности, надежности и стоимости разрабатываемых решений. Важно помнить, что формализованные методики проектирования не просто обучают, но и становятся основой для создания компьютерных экспертных систем, а также систем автоматизированного проектирования ИИУС. Системы, основанные

на таких методах, способны обеспечить более высокий уровень автоматизации и точности в проектировании, способствуя ускорению процессов и снижению человеческого фактора в принятии важнейших решений. Таким образом, связи между теорией и практикой проектирования становятся все более актуальными и значимыми, поскольку они создают новые многогранные возможности для разработки сложных систем и их эффективного внедрения в различные сферы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Одрин, В. М. Метод морфологического анализа технических систем / В. М. Одрин. – М. : ВНИИПИ, 1989. – 312 с.
2. Джонс, Дж. К. Методы проектирования : пер. с англ. / Дж. К. Джонс. – М. : Мир, 1986. – 326 с.
3. Альтшуллер, Г. С. Алгоритм изобретения / Г. С. Альтшуллер. – М. : Московский рабочий, 1973. – 296 с.
4. Моисеева, Н. К. Основы теории и практики функционально-стоимостного анализа / Н. К. Моисеева, М. Г. Карпунин. – М. : Высш. шк., 1988. – 192 с.
5. Шилин, А. Н. Проектирование адаптивных оптоэлектронных устройств контроля процессов формообразования крупногабаритных нагретых деталей / А. Н. Шилин // Контроль. Диагностика. – 2001. – № 7. – С. 14–20.
6. Мирошников, М. М. Теоретические основы оптоэлектронных приборов / М. М. Мирошников. – Л. : Машиностроение, 1983. – 696 с.
7. Ишанин, Г. Г. Приемники излучения оптических и оптоэлектронных приборов / Г. Г. Ишанин. – Л. : Машиностроение, 1986. – 175 с.
8. Подиновский, В. В. Введение в теорию важности критериев в многокритериальных задачах принятия решений / В. В. Подиновский. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 64 с.
9. Ширяев, В. В. Принятие решений: Математические основы. Статистические задачи : учеб. пособие / В. В. Ширяев, Е. В. Ширяев. – М. : Книжный дом «ЛИБРКОМ», 2009. – 208 с.

УДК 621.373.826

DOI: 10.35211/2500-0586-2025-2-51-43-46

И. А. Риль, В. Н. Храмов

ВЛИЯНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ ФОКУСИРОВКИ ЛАЗЕРНОГО ПУЧКА НА ПАРАМЕТРЫ ЛАЗЕРНОЙ ПЕРФОРАЦИИ ОТВЕРСТИЙ

Волгоградский государственный университет

ivan.ril@mail.ru, vladimir.khramov@volsu.ru

Автор, ответственный за переписку:

Владимир Николаевич Храмов, vladimir.khramov@volsu.ru

В работе приведены результаты реализации лазерной технологической установки и экспериментального исследования влияния продольного смещения фокусировки лазерного пучка полупроводникового лазера в течение времени облучения на процесс лазерной перфорации отверстий в неметаллических мишенях. Экспериментально определена оптимальная скорость смещения продольной динамической фокусировки для получения максимальной глубины отверстий для двух материалов (полипропилен и гетинакс (микарта)). Выбор оптимальной скорости продольного перемещения сфокусированного пучка в проведенном эксперименте позволил увеличить глубину отверстий от 30 % до 50 % по сравнению со статической фокусировкой.

Ключевые слова: лазерные технологии, управление параметрами лазерной установки, лазерная перфорация

I. A. Ril', V. N. Khramov

THE INFLUENCE OF THE DYNAMIC FOCUSING OF THE LASER BEAM ON PARAMETERS OF THE HOLES LASER PERFORATION

Volgograd State University

The paper presents the results of the implementation of a laser technological setup and an experimental study of the effect of longitudinal shift of the focusing of a semiconductor laser beam during the irradiation time on the process of laser perforation of holes in non-metallic targets. The optimal speed of shifting the longitudinal dynamic focusing to obtain the maximum depth of holes for two materials (polypropylene and micarta) has been experimentally determined. The choice of the optimal speed of longitudinal movement of the focused beam in the experiment allowed increasing the depth of the holes from 30 % to 50 % compared to static focusing.

Keywords: laser technologies, control of laser setup parameters, laser perforation

При реализации лазерных технологий типа сварки, перфорации отверстий, гравировки, маркировки и т. п., как правило, положение фокусировки лазерного пучка остается неизменным в процессе воздействия лазерного излучения на образец [1; 2]. В данной работе представлены экспериментальные результаты по влиянию динамического продольного смещения фокуса лазерного пучка на параметры лазерной перфорации отверстий в неметаллических мишенях. В эксперименте использовались два образца обрабатываемых материалов: полипропилен и гетинакс (микарта). Используемый лазер: непрерывный полупроводниковый фиолетовый лазерный модуль с выходной мощностью 0,5 Вт, работающий на длине волны 405 нм.

На рис. 1 представлена блок-схема экспериментальной установки. Лазерный модуль 1 размещался на электромеханическом блоке вертикального перемещения 6 3D-принтера Creality Ender-3 7. Образцы для осуществления лазерной перфорации 2 размещались на неподвижном столе 3D принтера. Установленный на 3D-принтере шаговый двигатель Nema-17 подключен к разработанной плате управления, в основе которой лежит микроконтроллер Atmega-8. Задача разработанного блока электроники 5 заключалась в том, чтобы исполнять команды, поступающие посредством UART с персонального компьютера. Основное управление работой установки осуществляется не на самом устройстве, а непосредственно в разработанном под Windows программном обеспечении. Подключение шагового двигателя к управляющей плате осуществлялось посредством разработанной силовой платы, основанной на драйверах шаговых двигателей A4988. Видеокамера 3 вместе с блоком регистрации 4 использовались для начальной автофокусировки лазерного пучка на мишень [3]. Погрешность начальной автофокусировки не превышала 3 %.

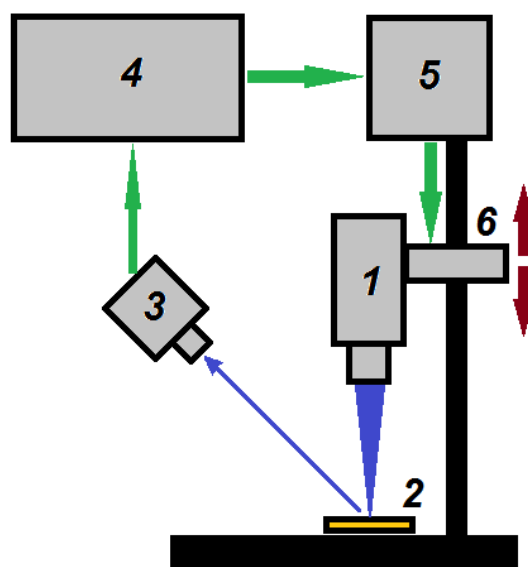


Рис. 1. Блок-схема лазерной технологической установки:
1 – лазер; 2 – мишень; 3 – видеокамера; 4 – блок регистрации;
5 – блок управления; 6 – блок механического перемещения;
7 – 3D-принтер

Методика эксперимента заключалась в следующем. При неподвижном положении лазерного модуля за определенное время воздействия лазерного излучения в мишени формировался кратер. В этом случае лазерный пучок фокусировался на поверхности мишени. Глубина кратера и его диаметр измерялись с помощью инструментального микроскопа МБП-3.

Эта процедура повторялась на новом месте этой же мишени, но с определенной скоростью вертикального (продольного) перемещения лазерного модуля. Скорость перемещения варьировалась от 0,2 мм/мин до 1 мм/мин с шагом 0,2 мм/мин. Время воздействия и угол фокусировки оставались постоянными во всех случаях.

Графики зависимости глубины отверстия (кратера) от продольной скорости перемещения сфокусированного пучка для двух образцов (полипропилен и гетинакс) представлены на рис. 2. Кружками на графиках отмечены статические значения глубины отверстий.

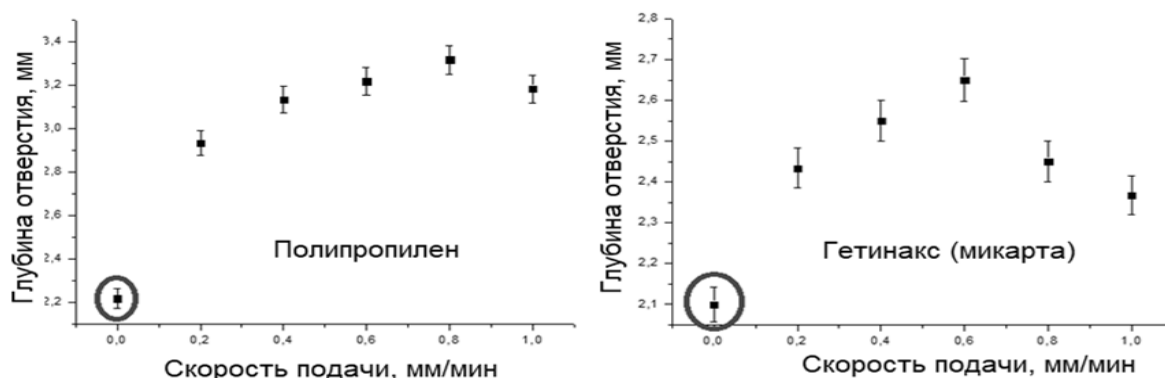


Рис. 2. Графики зависимости глубины отверстия (кратера) от продольной скорости перемещения сфокусированного пучка для двух образцов (полипропилен и гетинакс)

Исследование показало, что глубина полученного отверстия без осевого смещения лазерного модуля была минимальной. С увеличением скорости продольного перемещения лазерного источника происходит постепенное увеличение глубины получаемого отверстия до тех пор, пока скорость перемещения не станет оптимальной (при такой скорости достигается максимальная глубина отверстия). При дальнейшем увеличении скорости подачи глубина полученного отверстия уменьшается.

По полученным данным измерений глубины и диаметра кратера был определен коэффициент кинжалности [1; 2] – отношение глубины отверстия к его диаметру (рис. 3). Эффект «кинжалности» заключается в том, что глубина отверстия растет быстрее, чем диаметр [2]. Это позволяет получить более глубокие отверстия при слабо возрастающем диаметре, что и было продемонстрировано в данном эксперименте.

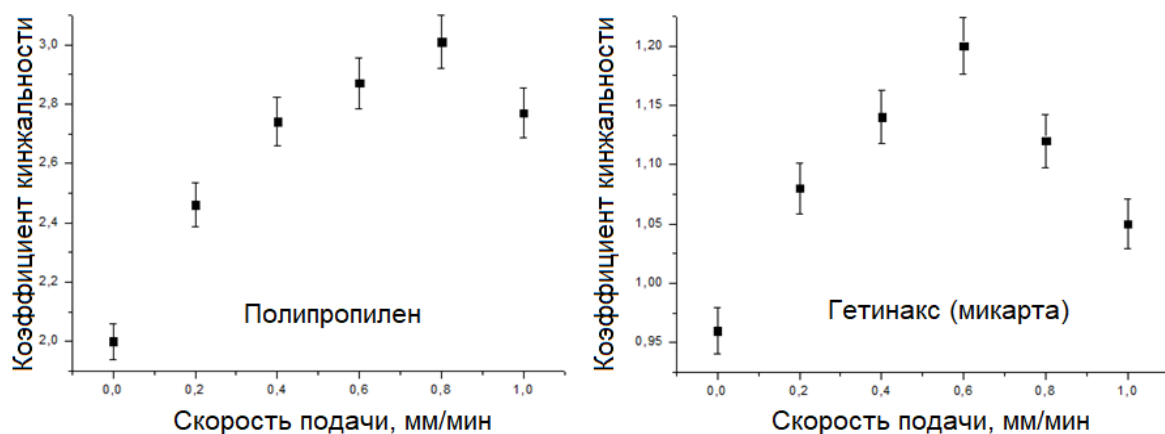


Рис. 3. Графики зависимости коэффициента кинжалности от продольной скорости перемещения сфокусированного пучка для двух образцов (полипропилен и гетинакс)

Из представленных зависимостей видно, что выбор оптимальной скорости продольного перемещения сфокусированного пучка позволяет увеличить глубину отверстий и коэффициент кинжалности от 30 % до 50 %. Эти выводы справедливы для обоих исследуемых материалов.

Таким образом, экспериментальным путем были получены оптимальные параметры технологического процесса получения максимальных значений глубины отверстия и коэффици-

ента кинжалности для выбранных материалов (полипропилен, гетинакс (микарта)). Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что зависимость параметров перфорированных отверстий от продольного смещения фокуса действительно существует. Оптимальные параметры процесса и скорости перемещения лазерного модуля могут быть установлены для различных материалов. Все это способствует повышению эффективности использования лазерных станков для различных технологиче-

ских процессов, включая резку, гравировку, маркировку и пробивку отверстий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Григорьянц, А. Г. Технологические процессы лазерной обработки: учеб. пособие для вузов / А. Г. Григорьянц, И. Н. Шиганов, А. И. Мисюров; под ред. А. Г. Григорьянца. – М.: Изд-во МГТУ им Н. Э. Баумана, 2006. – 664 с.

2. Веденов, А. А. Физические процессы при лазерной обработке материалов / А. А. Веденов, Г. Г. Гладуш. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 208 с.

3. Atamanyuk, R. G., Khranov V. N., Ril' I. A. Research of the influence of the longitudinal displacement of the laser beam focusing on the laser perforation process. International Symposium: Optics & Biophotonics 2020 (Conference on Laser Physics and Photonics XXII). September 29 – October 2, 2020. Saratov, Russia.

УДК 621.395.66

DOI: 10.35211/2500-0586-2025-2-51-46-50

А. Г. Сошинов, Т. В. Копейкина, О. С. Атрашенко, О. О. Ахмедова

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ СРОКОМ СЛУЖБЫ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Камышинский технологический институт (филиал)

Волгоградского государственного технического университета

epp@kti.ru, kopeikina.tania@yandex.ru, olgapasmenko@yandex.ru,

Ahmedova-olga@mail.ru

Автор, ответственный за переписку: Ахмедова Ольга Олеговна, Ahmedova-olga@mail.ru

Прогнозирование остаточного срока службы силовых трансформаторов имеет первостепенное значение для поддержания стабильности и функциональности всей энергосети. Однако трансформаторы со временем подвергаются старению, деградации и потенциальным отказам, что приводит к значительным потерям для энергокомпаний и потребителей, а длительная продолжительность ремонта или замены усугубляет экономические потери и риски. Для снижения рисков необходимы эффективные стратегии управления активами для поддержания силовых трансформаторов в оптимальных рабочих условиях, сводя к минимуму вероятность отключений электроэнергии. Такие стратегии охватывают два основных компонента: оценку срока службы и варианты решений, основанные на риск-ориентированном подходе. Внедрение методов искусственного интеллекта, таких как машинное обучение и аналитика данных, открывает огромный потенциал для систем мониторинга, позволяя более точно обнаруживать неисправности, оценивать состояние и разрабатывать стратегии предиктивного обслуживания.

Ключевые слова: силовые трансформаторы, остаточный срок службы, непрерывный контроль, машинное обучение, риск-ориентированный подход

A. G. Soshinov, T. V. Kopeykina, O. S. Atrashenko, O. O. Akhmedova

FORECASTING AND MANAGEMENT OF THE SERVICE LIFE OF POWER TRANSFORMERS

Kamyshin Institute of Technology (branch)

Volgograd State Technical University

Forecasting the remaining service life of power transformers is of paramount importance for maintaining the stability and functionality of the entire power grid. However, transformers are subject to aging, degradation and potential failures over time, which leads to significant losses for energy companies and consumers, and the long duration of repair or replacement exacerbates economic losses and risks. To reduce risks, effective asset management strategies are needed to maintain power transformers in optimal operating conditions, minimizing the likelihood of power outages. Such strategies cover two main components: lifetime assessment and risk-based solutions. The introduction of artificial intelligence techniques such as machine learning and data analytics opens up huge potential for monitoring systems, allowing for more accurate fault detection, condition assessment, and predictive maintenance strategies.

Keywords: power transformers, residual service life, continuous monitoring, machine learning, risk-based approach

Управление активами играет решающую роль в оптимизации использования и минимизации затрат в электроэнергетической отрасли. Данная стратегия направлена на увеличение

срока службы действующего оборудования, включая силовые трансформаторы [1]. Силовые трансформаторы являются важнейшими элементами энергосистем. Обеспечивая эффективную

передачу и распределение электроэнергии, обладают потенциальным сроком службы до 60 лет. Надежная работа этих трансформаторов имеет первостепенное значение для поддержания стабильности и функциональности всей энергосети. Однако узлы трансформаторы со временем подвергаются старению, деградации, что может привести к потенциальным отказам, и как следствие, значительным экономическим потерям для энергоснабжающих организаций [2].

Длительная продолжительность ремонта или замены оборудования усугубляет экономические потери и риски. Поэтому точная оценка состояния трансформаторов и прогнозирование оставшегося срока службы имеют важное значение для планирования технического обслуживания и ремонтов. Прогнозирование остаточного срока службы трансформаторов является сложной задачей из-за взаимосвязи различных факторов старения [3]. Традиционные методы полагаются на статические данные и не обеспечивают отображение состояния объектов в реальном времени, что приводит к потенциальным задержкам в обнаружении неисправностей.

Внедряя упреждающие меры по техническому обслуживанию, организации, обеспечивающие потребителей электроэнергией, могут свести к минимуму риски, связанные с отказами трансформаторов, предотвратить перебои в подаче электроэнергии и оптимизировать распределение ресурсов и затраты. Применяемая методика статистических данных о повреждаемости, имеющаяся в энергоснабжающих компаниях, является недостаточной для прямого определения вероятностей отказа электрообо-

рудования. Сочетание статистических данных с экспертными оценками, основанными на опыте эксплуатации и знании процессов, происходящих в оборудовании, позволит увеличить шансы правильного принятия решения о состоянии трансформаторов. Сопоставление конкретных обстоятельств с аналогичными ситуациями, которые уже имели место в прошлом, позволяет сформировать более обоснованное суждение. Зачастую бывает непросто провести детальное сравнение между всеми необходимыми характеристиками и множеством реализаций [4].

Повышение точности определения остаточного ресурса работы оборудования возможно за счет одновременного получения информации по нескольким измеряемым параметрам, например, в автоматизированных системах непрерывного контроля состояния силовых трансформаторов. В системе объединены применяемые методы, обладающие функциональностью комплекса датчиков, контролирующих основные показатели технического состояния трансформаторов и автотрансформаторов [5].

Предприятия распределительных сетей находятся в постоянном поиске инновационных аналитических инструментов, способных повысить уровень надежности за счет внедрения автоматизированных систем обнаружения неисправностей. Внедрение методов искусственного интеллекта (ИИ), таких как машинное обучение (МО) и аналитика данных, открывает огромный потенциал для систем мониторинга, позволяя более точно обнаруживать неисправности, оценивать состояние и разрабатывать стратегии предиктивного обслуживания.

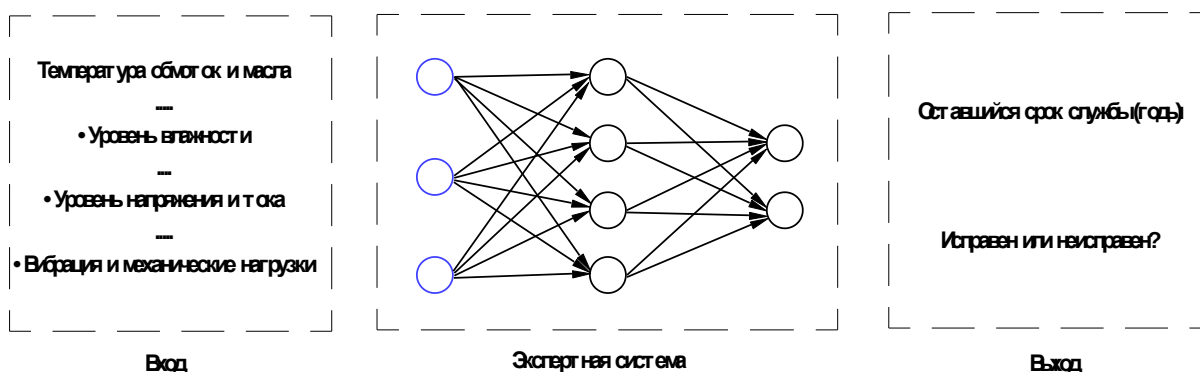


Рис. 1. Схема нейросети для мониторинга силового трансформатора

Для диагностики силовых трансформаторов и автотрансформаторов наиболее подходят несколько нейронных сетей, каждая из которых обладают рядом характеристик при работе с

временными рядами и многомерными данными. Сверточные нейронные (CNN) сети способны обрабатывать данные об активности оборудования через изображения (тепловизи-

онная, акустическая с визуализацией, УФ-диагностики). Рекуррентные нейронные сети (RNN) больше применимы для обработки и анализа временных рядов с короткими временными зависимостями (состояние изоляции, сопротивление обмоток трансформатора и т. д.). Сети с долгой кратковременной памятью (LSTM) подобны RNN и обладают улучшенной способностью сохранять информацию в течение длительного времени без потери данных, что крайне важно для отслеживания динамических процессов (анализ состояния масла, старение изо-

ляции, изменения температуры узлов трансформатора) [6].

Алгоритмы контролируемого машинного обучения нацелены на моделирование корреляций и зависимостей между результатами прогнозирования и входными свойствами. Они используют предыдущие наборы данных для определения правильных результатов для новых данных на основе изученных взаимосвязей. Три распространенных приложения контролируемого обучения – это прогнозирование, регрессия и классификация.

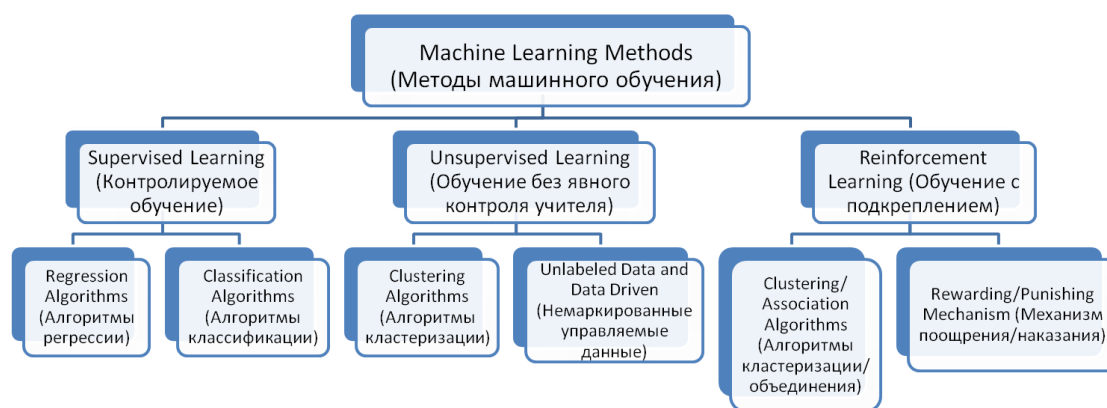


Рис. 2. Методы машинного обучения для мониторинга силового трансформатора

Алгоритмы контролируемого обучения (обучения с учителем) подходят для диагностики состояния, выявления дефектов и прогнозирования вероятности отказа. Модель обучается по выбранным данным, отмеченным человеком. Обучение без учителя происходит не по заранее отобранному данным, среди которых нет «правильного» ответа. Цель машинного обучения без учителя – выявить закономерности в данных и сгруппировать их. В подходе обучения с подкреплением машина может обучаться на основе исторических данных о состоянии трансформаторов, получая награды за правильные действия, такие как своевременное выявление аномалий или эффективное планирование технического обслуживания.

Повсеместное использование нейросетей для диагностики электрооборудования сильно усложняется необходимостью предварительной обработки при разработке нейросетевой модели. Процесс подготовки данных включает в себя несколько важных шагов, каждый из которых оказывает влияние на создание успешной модели сети. На первом этапе необходимо очистить данные от аномалий, ошибок измерений и других искажающих факторов. Этап включа-

ет в себя удаление, коррекцию выбросов и обработку отсутствующих значений. Следующий шаг – нормализация данных. Данные, полученные из различных источников и датчиков, могут иметь разные масштабы, что может негативно повлиять на процесс обучения. Нормализация позволяет привести все характеристики к единому масштабу, что упрощает работу нейронной сети. Затем необходимо преобразовать данные в соответствии с выбранной архитектурой нейронной сети. Например, для сверточных нейронных сетей (CNN) временные ряды могут быть преобразованы в «изображения» активности параметров, а для рекуррентных нейронных сетей (RNN) или LSTM данные представляются в виде последовательностей. Наконец, подготовленный набор данных разделяется на три части: обучающую, валидационную и тестовую выборку. Это позволяет не только обучить модель, но и оценить ее способность к обобщению на новых данных [7].

Модели машинного обучения также хорошо интегрируются с Интернетом вещей (IoT), обеспечивая сбор и анализ данных (Big Data) в реальном времени, прогнозную аналитику, интеграцию с другими сетевыми системами,

масштабность для всестороннего мониторинга, тем самым улучшая оптимизацию работы, надежность и безопасность энергосистемы [8].

Кроме оценки технического состояния важно определять риски (последствия) повреждения электрооборудования вследствие развития выявленного дефекта. Риск определяется произведением последствий повреждения трансформатора и вероятностью наступления этого события [9]. При анализе концепции «риск» важно обратить внимание на два аспекта: в любой ситуации риск подразумевает потенциальную возможность неблагоприятного исхода; не существует оборудования, которое было бы полностью защищено от повреждений. Даже если оборудование работает без сбоев, всегда есть вероятность возникновения дефектов, которые могут привести к отказу. Это, в свою очередь, может привести к финансовым потерям, упущенной выгоде и другим негативным последствиям. Риск повреждения узлов возникает с момента начала эксплуатации с увеличением величины риска [10].

Очевидно, что ключевым аспектом при выборе данной методики является минимизация нежелательных последствий принятого решения, что, однако, возможно лишь в идеальных условиях эксплуатации. Кроме того, в практической плоскости необходимо также учитывать издержки, связанные с реализацией выбранного подхода. Этот результат может быть выражен в числовом или описательном виде и отражать такие параметры, как результативность, стоимость, сроки, уровень риска и другие значимые характеристики. Сопоставляя и исследуя эти параметры для каждого возможного варианта, можно определить наилучший, принимая во внимание цели и ограничения проекта [11].

Идея применения комбинированной системы диагностики силовых трансформаторов заключается в разработке интегрированной платформы, которая объединяет методы оценки остаточного ресурса и состояния трансформатора с риско-ориентированным подходом, учитывающим экономический ущерб или прибыль от принятого решения. Эта система будет использовать нейронные сети для анализа больших объемов данных, получаемых от трансформаторов, включая параметры работы, результаты мониторинга и лабораторные испытания.

Нейронная сеть позволит выявлять скрытые зависимости и паттерны в данных, что обеспечит точную оценку текущего состояния оборудо-

вания с предсказанием остаточного ресурса. Риско-ориентированный подход будет учитывать вероятность возникновения различных неисправностей и их потенциальные последствия для системы и экономики предприятия.

На основе полученных данных система будет генерировать рекомендации по техническому обслуживанию и замене компонентов, а также предлагать оптимальные стратегии эксплуатации, минимизируя риски и затраты. В результате комбинированная система диагностики повысит надежность силовых трансформаторов, улучшит качество электроэнергии и снизит финансовые потери для энергетических компаний, способствуя более эффективному управлению ресурсами и инвестициями.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Xinping, Yuan, Haiyan Wang, Ye Yuan, Shilei Zhang*, Design of an intelligent decision model for power grid fault location and isolation based on topology analysis, *International Journal of Thermofluids*, Volume 21, 2024, 100536, ISSN 2666-2027, <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2023.100536>.
2. *Muhammad, Rafiq*, Muhammad Shafique, HVDC transformer insulation system: Present research, trends, challenges, and prospects, *e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, Volume 10, 2024, 100874, ISSN 2772-6711, <https://doi.org/10.1016/j.prime.2024.100874>.
3. *Makacha, J. M. Edwell T. Mharakurwa, L.O. Moga*, An integrated fuzzy logic approach for valuation of power transformer's degree of healthiness or faultiness, *Heliyon*, Volume 11, Issue 4, 2025, e42789, ISSN 2405-8440, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e42789>.
4. *Солдатов, А. В.* Автоматизированный мониторинг и анализ функционирования релейной защиты и автоматики / А. В. Солдатов, В. А. Наумов, В. М. Яндуганов, А. Н. Мамин // Релейная защита и автоматизация. – 2020. – № 3(40). – С. 50–56. – EDN WLQJTH.
5. *Сошинов, А. Г.* О перспективах развития автоматизированных комплексных систем непрерывного контроля состояния силовых трансформаторов / А. Г. Сошинов, О. С. Атращенко, Т. В. Копейкина // Вестник аграрной науки Дона. – 2022. – Т. 15, № 4(60). – С. 95–104. – DOI 10.55618/20756704_2022_15_4_95-104. – EDN KTB AEI.
6. *Мустафина, С. И.* Применение нейронных сетей для диагностики и прогнозирования технического состояния оборудования / С. И. Мустафина, С. А. Жиликов // Автоматизация и информатизация ТЭК. – 2023. – № 7(600). – С. 13–21. – DOI 10.33285/2782-604X-2023-7(600)-13-21. – EDN XPTCQK.
7. *Орлов, С. П.* Глубокая нейронная сеть для диагностики элементов железнодорожного рельсового пути / С. П. Орлов, Н. А. Ефимушкин, Н. В. Ефимушкина // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2022. – Т. 30, № 1(73). – С. 63–74. – DOI 10.14498/tech.2022.1.4. – EDN DVWYBS.
8. *Manohar, Mishra, Jai Govind Singh*, A comprehensive review on deep learning techniques in power system protection: Trends, challenges, applications and future directions, *Results in Engineering*, Volume 25, 2025, 103884, ISSN 2590-1230, <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103884>.

9. Сошинов, А. Г. Оптимизация контроля и улучшение качества принятия решений о состоянии силовых трансформаторов / А. Г. Сошинов, О. С. Атрашенко, Т. В. Копейкина, О. О. Ахмедова // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2024. – № 4. – С. 66–70. – EDN ВКВАТН.

10. Бриков, А. В. Риск-ориентированный подход к инспектированию оборудования: современные проблемы и решения / А. В. Бриков, С. И. Александрович // Нефте-

промышленное дело. – 2023. – № 1(649). – С. 35–40. – DOI 10.33285/0207-2351-2023-1(649)-35-40. – EDN ZISCGN.

11. Mohammad k.k. Alabdullh, Mahmood Joorabian, Seyyed Ghodrattollah Seifossadat, Mohsen Saniei, Mahyar Abasi, A novel method to estimate the lifetime of mineral oil-type power transformers based on the analysis of chemical and physical indicators using artificial intelligence, Heliyon, Volume 10, Issue 22, 2024, e40447, ISSN 2405-8440, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e40447>.

УДК 621.316.1

DOI: 10.35211/2500-0586-2025-2-51-50-53

А. Г. Сошинов, Т. В. Копейкина, О. С. Атрашенко, О. О. Ахмедова

ОБЗОР МЕХАНИЗМОВ ЦЕНООБРАЗОВАНИЯ ДЛЯ СОВМЕСТНОГО ХРАНЕНИЯ ЭНЕРГИИ

Камышинский технологический институт (филиал)

Волгоградского государственного технического университета

epp@kti.ru, kopeikina.tania@yandex.ru, olgapasmenko@yandex.ru,

Ahmedova-olga@mail.ru

Автор, ответственный за переписку: Ахмедова Ольга Олеговна, Ahmedova-olga@mail.ru

Статья посвящена обзору механизмов ценообразования для совместного хранения энергии. Рассматривается необходимость гибкости рынка для решения проблем колебаний выработанной электроэнергии, вызванных использованием возобновляемых источников энергии. Анализируется структура оптового рынка электроэнергии. В качестве решений по необходимости регламентации оптимального распределения выгод и затрат приводится ряд методов совместной игры, включая метод стоимости Шепли и метод переговоров Нэша.

Ключевые слова: затраты, рынок, модель, совместное хранение энергии, транзактивная энергия, цена, игра, метод

A. G. Soshinov, T. V. Kopeykina, O. S. Atrashenko, O. O. Akhmedova

A REVIEW OF PRICING MECHANISMS FOR COLLECTIVE ENERGY STORAGE

Kamyshin Institute of Technology (branch)

Volgograd State Technical University

The article is devoted to the review of pricing mechanisms for cooperative energy storage. The necessity of market flexibility to solve the problems of fluctuations in generated electricity caused by the use of renewable energy sources is considered. The structure of the wholesale electricity market is analyzed. As solutions to the need to regulate the optimal distribution of benefits and costs, the joint game method is given, including the Shapley cost method and the Nash bargaining method.

Keywords: costs, market, model, cooperative energy storage, transactive energy, price, game, method

Введение

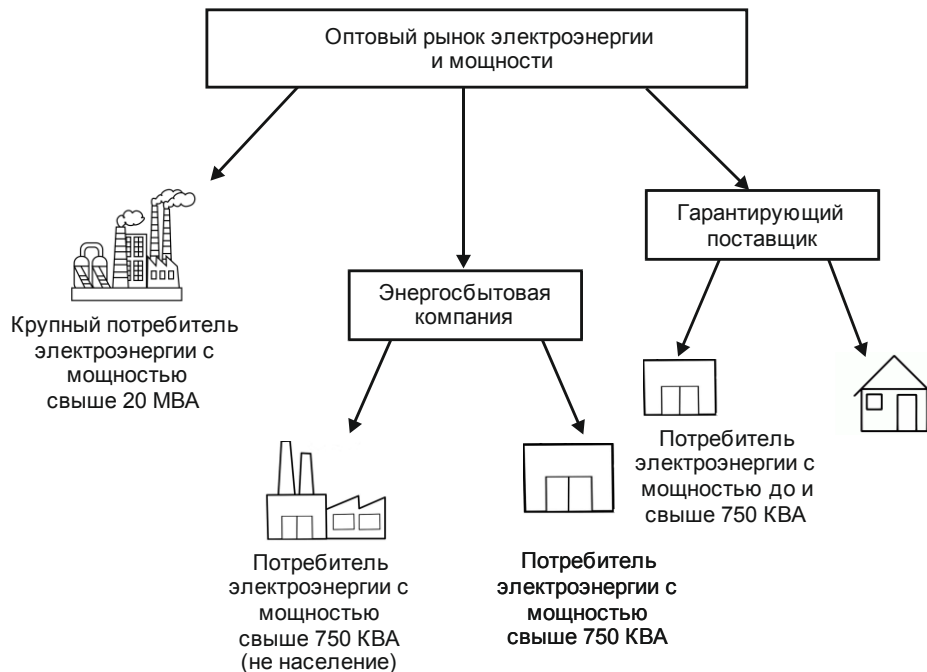
Развитие использования возобновляемых источников энергии является одним из основных способов преобразования существующей энергетической отрасли в экологически чистую и низкоуглеродную. Для ускорения развития возобновляемой энергетики страны разрабатывают свои стратегии, определяющие цели развития возобновляемых источников энергии. Транзактивная энергия (ТЭ) относится к экономическим методам и методам контроля, используемым для управления потоком или обменом энергией в существующей электроэнергетической систе-

ме в отношении экономических и рыночных стандартных значений энергии. Данная стратегия повышает эффективность и надежность энергосистемы, способствует более интеллектуальному и интерактивному будущему энергетической отрасли. Предполагается, что на базе систем ТЭ в режиме, близком к реальному времени, и на полностью роботизированной основе будут происходить торги с участием владельцев самых разнообразных объектов распределенной энергетики, включая электромобили, крышную солнечную микрогенерацию и домашние накопители, а также более традиционных субъектов

отрасли – энергоснабжающих и сбытовых компаний, агрегаторов, системных и сетевых операторов [1].

В последние десятилетия энергия, представленная энергией ветра или фотоэлектрической энергией, привлекает к себе внимание во всем мире. Однако нестабильность такого вида генерации электроэнергии вызывает множество проблем, таких как непостоянство соотношения спроса и предложения, нерегулируемость источника энергии, зависимость от погодных условий, проблемы с сетевой инфраструктурой, высокие инвестиционные затраты. Эти проблемы могут быть решены с помощью аккумуляторного хранения энергии. Однако традиционное накопление энергии от батарей имеет су-

щественные недостатки, такие как высокие индивидуальные затраты на установку, сложность планирования требуемой емкости, серьезная проблема простоя системы хранения, что указывает на настоятельную необходимость рыночной эксплуатации аккумуляторных накопителей. Данная концепция может базироваться на основе оптового рынка электрической энергии и мощности (ОРЭМ) – сфера обращения особых товаров (электрической энергии и мощности) в рамках Единой энергетической системы России в границах единого экономического пространства Российской Федерации (см. рисунок). Подобное участие в оптовом рынке электроэнергии, закладывает основу для внедрения бизнес-моделей хранения энергии [2].



Структура оптового рынка электроэнергии

Результаты исследования

Как известно, экономика совместного использования – это обмен недоиспользуемыми товарами и услугами, ставящий использование и доступность выше владения. В качестве новой стратегии повышения эффективности использования энергетических ресурсов экономика совместного использования предоставляет идеи для рыночного использования традиционных моделей хранения энергии. Модель совместного хранения энергии предполагает использование совместного несения расходов и экономии за счет масштаба для решения проблемы экономической неэффективности исходной модели. Совместное хранение энергии позволя-

ет всем пользователям пользоваться его преимуществами, разделяя затраты и в полной мере используя взаимодополняемость энергозатрат. Необходимо также отметить, что поскольку нет необходимости самостоятельно строить электростанции для хранения энергии, первоначальные капиталовложения значительно сокращаются.

В современной экономике механизмы ценообразования для совместного хранения энергии в основном определяются с помощью фиксированной цены, времени использования, аукционов, игр и стратегий распределения. В режиме «фиксированная цена/время использования» цена определяется единичной производитель-

ностью/мощностью, расходом и индивидуальными упаковками. В режиме формирования цены путем участия в аукционе услуги по хранению энергии определяются путем торгов между покупателями и продавцами, чтобы максимизировать социальное благосостояние. В игровом режиме равновесная цена получается в результате некооперативной игры, полностью учитывая конфликтующие интересы и ценности покупателей и продавцов. Планирование совместного хранения энергии чаще всего направлено на распределение и потребление энергии, но не затрагивает планирование выгод и затрат. Таким образом, существует необходимость регламентации оптимального распределения выгод, так как эффективный рыночный механизм может гарантировать заинтересованность всех участников рынка для достижения эффективного распределения выгод при меньших общих затратах. Такого рода проблемы известны как механизм ценообразования для совместного хранения энергии. Стратегия распределения выгод в основном работает с использованием методов совместной игры, включая метод стоимости Шепли и метод переговоров Нэша для распределения затрат и выгод [3].

Метод Шепли оценивает предельный вклад отдельного человека, в то время как переговоры по Нэшу направлены на максимизацию индивидуальной прибыли.

В теории игр величина Шепли учитывает, как все игроки вносят разную сумму, и, следовательно, помогает определить выигрыш для всех игроков, когда это происходит.

Ценность Шепли – это концепция решения, используемая в теории игр, которая предполагает справедливое распределение как прибыли, так и затрат между несколькими участниками, работающими в коалиции. Ценность Шепли гарантирует, что каждый участник получит столько же или даже больше прибыли, сколько он получил бы, действуя независимо. Полученная ценность имеет решающее значение, поскольку в противном случае у участников не будет стимула к сотрудничеству. Преимуществом метода Шепли является справедливость, но недостатком является то, что альянс нестабилен, и участники могут покинуть большой альянс и сформировать небольшой альянс. Использование метода переговоров по Нэшу для создания модели сотрудничества может решить проблему «увеличения выгод» в рамках общего метода. Сильной стороной этого метода является стабильность, но слабой стороной является

необходимость знать точку разрыва в переговорах каждого участника.

Джон Нэш утверждал, что ситуации, связанные с противопоставлением монополии и монополии, торговлей между двумя нациями и переговорами между работодателем и профсоюзами, имеют самое непосредственное отношение к проблеме торгов. Это было теоретическое обсуждение проблемы торгов, которая, в его понимании, заключалась в выявлении соотношения между конкретным «решением» и степенью удовлетворенности, которую каждый человек ожидает получить от торгов, или, точнее, определении того, какую ценность для каждого из этих людей представляет возможность участия в торгах. Теоретической основой некооперативных игр является индивидуальная рациональность, когда интересы альянса не могут ограничивать индивидуальные решения. Основная цель некооперативных игр – решить проблему равновесия Нэша, и распространенные методы моделирования включают игры «хозяин-раб», аукционы и другие модели. Равновесие Нэша игры двух и более игроков, в котором ни один участник не может увеличить выигрыш, изменив свое решение в одностороннем порядке, когда другие участники не меняют решения. Такая совокупность стратегий выбранных участниками и их выигрыши называются равновесием Нэша. Игра «ведущий-ведомый» описывает оптимальную стратегию между оператором совместного хранения энергии и участником. Игровая модель «хозяин-раб» может обеспечить бесприбыльную ситуацию между операторами микросетей и агрегаторами пользователей. Аукцион представляет собой конкурентные торги между несколькими пользователями. Механизм периодических аукционов для совместного хранения энергии может продемонстрировать, что этот механизм снижает общий риск. Также существует предложение по механизму двустороннего аукциона, который может устранить монопольные недостатки односторонних аукционов и сформировать механизм, при котором покупатели и продавцы делят социальные выгоды поровну. Некооперативная игра удовлетворяет максимизации индивидуальных интересов.

Выводы

Эта статья посвящена обзорам механизмов ценообразования для совместного хранения энергии, действующих и демонстрационных проектов совместного хранения энергии и транс-

активной энергии в интеллектуальных сетях. В статье рассматриваются методы совместной игры: метод стоимости Шепли и метод переговоров Нэша для распределения затрат и выгод. Существующие исследования в области совместного хранения энергии сталкиваются с дилеммой между эффективностью планирования ресурсов и справедливостью распределения доходов. Дополнительная информация, раскрытая участниками, повысила бы эффективность распределения ресурсов, но это затронуло бы интересы отдельных лиц. И наоборот, справедливое распределение между отдельными лицами повлияет на общую эффективность распределения энергии, потому что все не хотят терпеть убытки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ахмедова, О. О. Интеграция экономики совместного использования электроэнергии с интеллектуальными сетями [Электронный ресурс] / О. О. Ахмедова, Т. В. Копейкина, А. Г. Сошинов, О. С. Атрашенко // Международный научно-исследовательский журнал. – 2024. – № 1 (139). – 5 с. – DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.139.155>. – Режим доступа: URL: <https://research-journal.org/media/articles/9919.pdf>. (дата обращения: 18.02.2025 г.).
2. Оптовый рынок электрической энергии и мощности [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.pp-sr.ru/ru/market/wholesale/index.htm> (дата обращения: 29.01.2024 г.).
3. Ахмедова, О. О. Рыночные структуры экономики совместного использования электроэнергии / О. О. Ахмедова, Т. В. Копейкина, А. Г. Сошинов, О. С. Атрашенко // Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транс-

порт. – 2024. – № 4 (49). – С. 27. (дата обращения: 28.02.2025 г.).

4. Асканова, О. В. Ценообразование. Учебное пособие для студентов очной и заочной форм обучения экономических направлений / О. В. Асканова // Рубцовский индустриальный институт. – Рубцовск, 2020. – 57 с.

5. Централизованные и децентрализованные рынки [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://studref.com/371415/ekonomika/tsentralizovannye_detsentralizovannye_rynki (дата обращения: 29.01.2024 г.).

6. Дистрибутив – Новая платформа для торговли электроэнергией microgrid [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.eitmanufacturing.eu/what-we-do/thought-leadership/signals/distro-a-new-microgrid-electricity-trading-platform/> (дата обращения: 28.01.2025 г.).

7. Все о применении блокчейна в электроэнергетике [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://crypto.ru/blokchein-v-ehlektroehnergetike/?utm_source=yandex.ru&utm_medium=organic&utm_campaign=yandex.ru&utm_referrer=yandex.ru (дата обращения: 30.01.2024 г.).

8. Игра в лидерство: модель Штакельберга и асимметричная информация [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://nauchniestati.ru/spravka/model-shtakelberga-pri-asimmetrichnoj-informaczii/> (дата обращения: 02.02.2025 г.).

9. Метод выделения ядра [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://marketing.wikireading.ru/4205> (дата обращения: 28.01.2024 г.).

10. Значение Шепли [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://voxt.ru/znachenie-shepli/> (дата обращения: 10.02.2025 г.).

11. Блокчейн – новые возможности для производителей и потребителей электроэнергии? [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://inepsystem.ru/gallery/blockchain_opportunity-for-energy-producers-and-consumers_RUS_1.pdf (дата обращения: 30.03.2025 г.).

12. Юзвович, Л. И. Финансовые и банковские риски: учебник / Л. И. Юзвович, Ю. Э. Слепыхина, Ю. А. Долгих, В. А. Татьянников, Е. В. Стрельников, Р. Ю. Луговцов, М. Н. Клименко. – Екатеринбург, 2020.

УДК 621.311.6

DOI: 10.35211/2500-0586-2025-2-51-53-58

О. С. Атрашенко, Д. В. Степанченко

АНАЛИЗ НАГРУЗКИ НА ЭНЕРГОСИСТЕМЫ ПРИ МАССОВОМ ВНЕДРЕНИИ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ: ВРЕМЕННЫЕ И ТЕРРИТОРИАЛЬНЫЕ АСПЕКТЫ

**Камышинский технологический институт (филиал)
Волгоградского государственного технического университета**

olgapasmenko@yandex.ru, stepanchenko-dv@kti.ru

Автор, ответственный за переписку:

Атрашенко Ольга Сергеевна, olgapasmenko@yandex.ru

Статья исследует актуальные проблемы развития электротранспорта и сопутствующей зарядной инфраструктуры. Проанализировано влияние массового внедрения электромобилей на энергосистемы, включая значительный рост нагрузки (особенно в регионах с высокой концентрацией EV), ухудшение параметров качества электроэнергии и необходимость масштабной модернизации распределительных сетей. В работе предложен комплексный подход к решению выявленных проблем, предполагающий развитие интеллектуальных систем управления зарядными процессами, активную интеграцию возобновляемых источников энергии, модернизацию сетевого хозяйства и стандартизацию коммуникационных протоколов (OCPP, OCPI).

Ключевые слова: электрозарядная станция, электромобиль, модернизация, инфраструктура

O. S. Atrashenko, D. V. Stepanchenko

ANALYSIS OF THE LOAD ON POWER SYSTEMS DURING MASSIVE INTRODUCTION OF ELECTRIC VEHICLES: TEMPORAL AND TERRITORIAL ASPECTS

**Kamyshin Institute of Technology (branch)
Volgograd State Technical University**

The article examines the current problems of electric transport development and the accompanying charging infrastructure. The impact of mass introduction of electric vehicles on power systems is analyzed, including a significant increase in load (especially in regions with a high concentration of EVs), deterioration of power quality parameters and the need for large-scale modernization of distribution networks. The paper proposes a comprehensive approach to solving the identified problems, which involves the development of intelligent charging process management systems, active integration of renewable energy sources, modernization of the grid economy and standardization of communication protocols (OCPP, OCPI).

Keywords: electric charging station, electric vehicle, modernization, infrastructure

Введение

На начальном этапе развития автомобилестроения в конце XIX века доминирующее положение заняли транспортные средства с двигателями внутреннего сгорания (ДВС). Однако параллельно с этим технологическим трендом предпринимались попытки альтернативного использования электрической тяги. Первые практические реализации электромобилей были осуществлены в конце 1890-х годов, преимущественно силами частных изобретателей и небольших мастерских, что демонстрирует ранний этап диверсификации силовых установок в автомобильной отрасли [1].

Внедрение электромобилей (EV) остается актуальной задачей современного транспорта. С 2015 года наблюдается устойчивый рост их мирового спроса. Эксплуатация EV в городских условиях обладает значительными преимуществами, включая высокий КПД, улучшенную динамику, низкий уровень шума и отсутствие вредных выбросов. Однако электротранспорт имеет существенные ограничения: недостаточную энергоемкость аккумуляторов, неразвитую зарядную инфраструктуру, высокую стоимость производства и сложности утилизации батарей. Эти факторы сдерживают массовое распространение EV, несмотря на их эксплуатационные преимущества [2].

Активное внедрение транспортных средств на электрической тяге (EV) обусловило необходимость создания специализированной зарядной инфраструктуры. В отличие от традиционной топливной системы, формировавшейся более столетия вокруг двигателей внутреннего сгорания (ДВС) и достигшей высокой эффективности и экономической целесообразности, инфраструктура для EV сталкивается с принципиальными технологическими ограничениями. Ключевой проблемой остается значи-

тельно меньший запас хода электромобилей по сравнению с транспортными средствами на ДВС, усугубляемый длительным временем подзарядки. Современные системы быстрой зарядки, несмотря на технический прогресс, существенно уступают по временным показателям традиционной заправке: если заполнение топливного бака занимает 4–5 минут, то даже наиболее совершенные зарядные станции требуют около 40 минут для достижения 80 % емкости аккумулятора.

Для обеспечения функционирования парка электромобилей (EV) требуется создание специализированных зарядных станций (ЭЗС), которые подразделяются на два основных типа по характеристикам процесса заряда. Быстрые ЭЗС обеспечивают ускоренный заряд за счет применения повышенного напряжения и значительных токовых нагрузок. В отличие от них медленные ЭЗС работают при пониженном напряжении, осуществляя интеллектуальное взаимодействие с бортовыми системами управления зарядом, что обеспечивает более щадящий режим для аккумуляторных батарей [3]. Широкомасштабное внедрение электромобилей создает существенные технологические вызовы для энергосистем. Основные проблемы связаны с резким увеличением нагрузки на распределительные сети, потенциальным ухудшением качества электроэнергии и снижением надежности энергоснабжения. Особую остроту эти вопросы приобретают в зонах с высокой концентрацией электромобилей, где может потребоваться значительная модернизация сетевой инфраструктуры.

Данные обстоятельства обуславливают необходимость разработки комплексных решений, включающих как технические усовершенствования, так и организационные меры по адаптации энергосистем к новым условиям эксплуатации [4].

Влияние роста парка электромобилей на суточную нагрузку энергосистем

Современные энергосистемы характеризуются ярко выраженной суточной неравномерностью энергопотребления, с двумя отчетливыми пиковыми периодами: утренним (07:00–10:00) и вечерним (18:00–22:00) [5]. В указанные временные интервалы наблюдается значительное увеличение нагрузки на электрические сети, обусловленное совокупностью антропогенных и технологических факторов.

Масштабное внедрение электромобилей (EV) создает новые вызовы для энергосистем. Согласно проведенным исследованиям, рост количества EV не вызывает резких скачков энергопотребления, однако приводит к устойчи-

вому увеличению нагрузки, преимущественно в вечерний пиковый период [6]. Данная закономерность объясняется особенностями эксплуатации персонального электротранспорта, когда основная масса владельцев осуществляет подзарядку в вечернее время после завершения рабочих поездок.

На момент 2019 года эксперты сходились во мнении о том, что потребление электроэнергии, в связи с увеличением количества EV, к 2030 году вырастет на 5 ГВт – около 1 %, а к 2050 году – на 20 ГВт – 5 %. Но на конец 2024 года данные немножко поменялись в сторону увеличения. Эксперты уже прогнозируют к 2030 году повышение потребления электроэнергии на 4,1 ТВт (рис. 1).

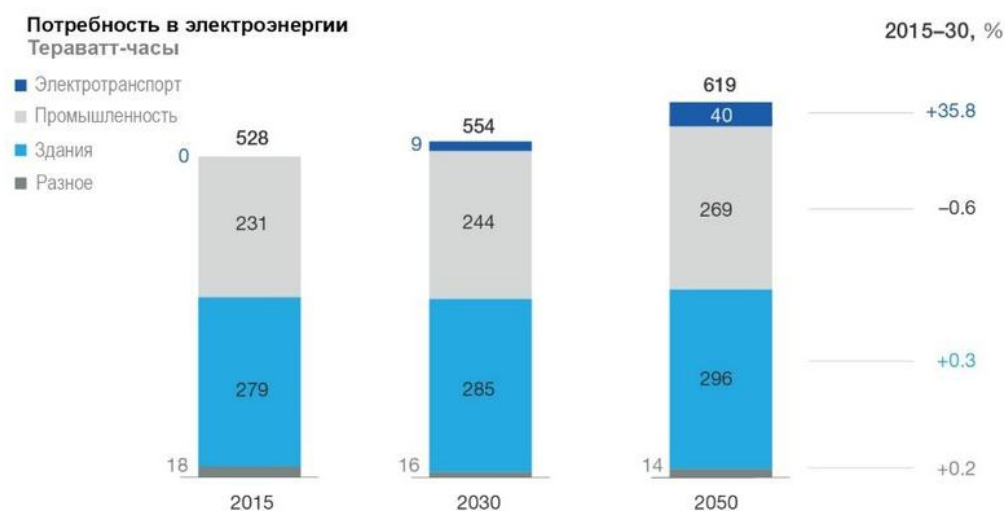


Рис. 1. Потребность в электроэнергии с 2015 года

Несмотря на столь внушительные цифры в разрезе страны прирост не столь критичен, как может показаться на первый взгляд. Гораздо хуже дела могут обстоять в локальных областях. Если обратить внимание на распределение EV по территории страны, можно заметить неравномерность. Основная масса электрокаров приходится на Москву, Краснодарский край и Приморье. В этих регионах можно будет наблюдать повышение нагрузки и изменение кривизны графиков [7].

Особую проблему представляют населенные пункты регионального значения, получающие электроснабжение от единичных трансформаторных подстанций (ТП). Активное развитие как публичных зарядных станций (ЭЗС), так и увеличение количества частных электромобилей (EV) способно привести к формированию зон критической нагрузки в таких энерго-



Рис. 2. Нагрузка на электросеть для 150 домов с двумя автомобилями на дом и 25 %-м проникновением электромобилей (кВт)

системах [8]. Особую актуальность эта проблема приобретает при учете необходимости организации зарядных узлов для общественного электротранспорта.

Проведенное исследование электропотребления типового жилого микрорайона, состоящего из 150 частных домохозяйств, при уровне использования электромобилей (EV) в 25 % от общего автопарка, демонстрирует увеличение пиковой нагрузки на распределительную сеть приблизительно на 30 %. Хотя индивидуальное энергопотребление домохозяйства при использовании EV может возрастать практически в два раза (рис. 2).

Важно отметить, что указанные расчетные значения сохраняют свою актуальность даже при отсутствии систем интеллектуального управления зарядкой («умной зарядки»). Данный факт свидетельствует о наличии определен-

ного резерва пропускной способности в существующих распределительных сетях, что подтверждается результатами аналогичных исследований [9]. Однако следует учитывать, что полученные показатели характерны для равномерного распределения нагрузки, в то время как пространственная или временная концентрация процессов зарядки может привести к существенному превышению расчетных параметров.

Наибольшие технологические сложности возникают при организации общественных станций быстрой зарядки (ЭЗС) и зарядных комплексов для коммерческого электротранспорта. Проведенные исследования демонстрируют, что их эксплуатация может приводить к систематическому превышению допустимой нагрузки питающих трансформаторных подстанций (ТП) [6] (рис. 3).

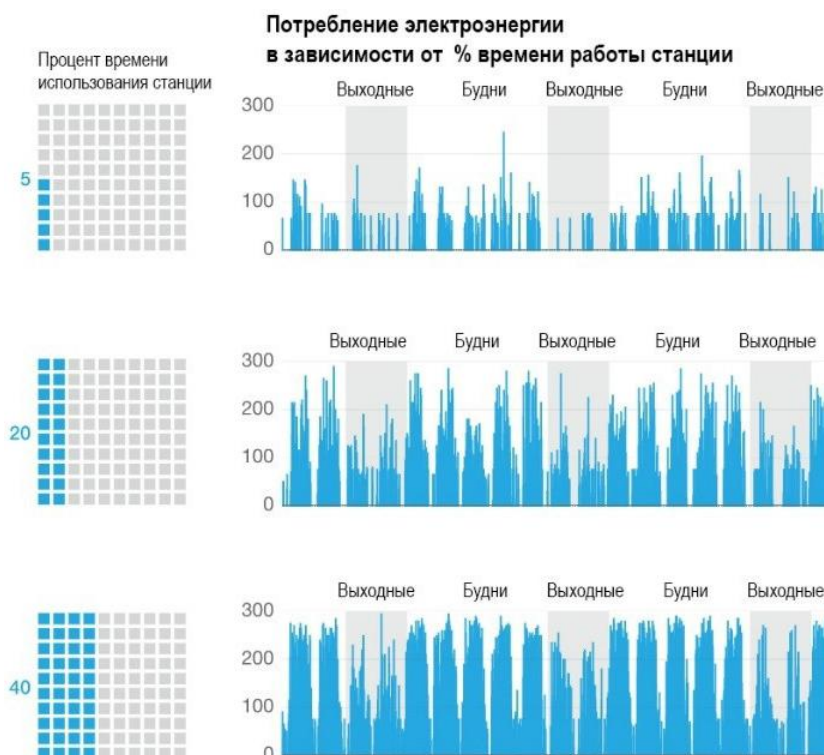


Рис. 3: Нагрузка на ТП по количеству EV

Инфраструктурные вызовы развития электротранспорта

Рост парка электромобилей вызывает не только увеличение нагрузки на энергосистемы, но и требует ускоренной модернизации электросетевой инфраструктуры. Данный процесс будет носить поэтапный характер, первоначально затронув регионы с высокой плотностью EV, где уже наблюдаются проблемы недостаточной мощности сетей.

Модернизационные мероприятия потребуют значительных капиталовложений, направленных на замену трансформаторного оборудования, усиление линий электропередачи, развитие сопутствующей инфраструктуры. Примечательно, что существенная часть затрат (до 40 % по оценкам экспертов [10]) будет связана не с закупкой оборудования, а с проектно-изыскательскими работами и последующим техническим обслуживанием модернизированных сетей.

Перспективы интеграции возобновляемых источников энергии в зарядную инфраструктуру

Интеграция возобновляемых источников энергии (ВИЭ) может частично компенсировать затраты на модернизацию электросетей для электрозарядных станций (ЭЗС). Локальное применение ВИЭ, как показывают исследования, способно не только увеличить пропускную способность зарядных узлов, но и улучшить качество электроэнергии. Теоретически такая интеграция должна снижать пиковые нагрузки на сеть, однако переменный характер генерации ВИЭ существенно ограничивает этот потенциал.

Экономическая целесообразность использования ВИЭ для ЭЗС остается дискуссионным вопросом, поскольку сильно зависит от региональных условий. Отдельные исследования указывают на эффективность возобновляемой энергетики при стоимости сетевого электричества выше 8 руб./кВт·ч, а в некоторых случаях – и по сравнению с традиционной генерацией. Однако для стабильной работы таких систем требуется развертывание значительных мощностей накопителей энергии, что существенно влияет на общую экономику проектов [11].

Согласно проведенным исследованиям [12], внедрение систем накопления электроэнергии (СНЭ) для электрозарядных станций (ЭЗС) становится экономически целесообразным только при условии снижения капитальных затрат на 40–60 %. Кроме того, как отмечалось ранее, рентабельность строительства ЭЗС существенно зависит от плотности парка электромобилей (EV) в обслуживаемой зоне. При недостаточной концентрации EV эксплуатация зарядной инфраструктуры может оказаться нерентабельной.

Многочисленные исследования подтверждают значительное негативное воздействие электрозарядных станций (ЭЗС) на качество электроэнергии в распределительных сетях. Основные проблемы связаны с возникновением дисбаланса напряжения и гармонических искажений тока, вызванных нелинейным характером нагрузки при зарядке электромобилей. Кроме того, наблюдаются повышенные тепловые потери в трансформаторном оборудовании, что приводит к сокращению его эксплуатационного ресурса. Также отмечается негативное влияние гармонических составляющих на работу другого электрооборудования, подключенного к той же сети [13].

Перспективным направлением решения указанных проблем является развитие интеллекту-

альных систем управления зарядной инфраструктурой. Современные технологии позволяют осуществлять динамическую балансировку нагрузки между зарядными портами, что обеспечивает оптимальное распределение мощности без превышения допустимых сетевых параметров. Особое значение имеет применение стандартизированных протоколов (OCPP, OCPI), которые обеспечивают удаленный мониторинг и управление зарядными сессиями, а также создают возможность кросс-сетевого взаимодействия между различными операторами зарядной инфраструктуры [14]. Такие решения способствуют повышению энергоэффективности и снижению нагрузки на распределительные сети.

Выводы

Проведенный анализ современных проблем и перспектив развития электротранспорта и сопутствующей инфраструктуры позволяет сделать ряд важных выводов. Во-первых, массовая «электрификация» транспорта создает значительные вызовы для энергосистем, связанные с ростом пиковых нагрузок, ухудшением качества электроэнергии и необходимостью масштабной модернизации сетевого хозяйства. Как показали исследования, наиболее остро эти проблемы проявляются в регионах с высокой концентрацией электромобилей, где локальная нагрузка на распределительные сети может увеличиваться на 30–60 %.

Во-вторых, ключевыми технологическими ограничениями остаются недостаточная энергоемкость аккумуляторных систем и длительное время зарядки по сравнению с традиционным топливом. При этом организация зарядной инфраструктуры, особенно мощных станций быстрой зарядки, требует значительных капиталовложений и может быть экономически нецелесообразной при недостаточной плотности парка электромобилей.

В-третьих, решение указанных проблем видится в комплексном подходе, включающем: развитие интеллектуальных систем управления зарядкой (OCPP, OCPI); внедрение динамической балансировки нагрузок; интеграцию возобновляемых источников энергии; модернизацию сетевой инфраструктуры.

Особое значение имеет стандартизация протоколов взаимодействия и создание кросс-сетевых решений, позволяющих оптимизировать использование существующих энергоресурсов. Перспективным направлением представляется сочетание централизованных и распределенных

систем генерации с развитыми накопителями энергии.

Проведенный анализ подтверждает, что устойчивое развитие электротранспорта требует скоординированных действий по совершенствованию как технологий электромобилей, так и энергетической инфраструктуры. Реализация предложенных мер позволит минимизировать негативное влияние на энергосистемы и обеспечить плавный переход к новой транспортной системе.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Смирнов, А. Е. Альтернативные концепции автомобилей конца XIX века / А. Е. Смирнов // История техники. – 2020. – № 2. – С. 78–89.
2. Глобальная статистика электротранспорта 2015–2022 / под ред. И. К. Петровой. – М.: НИИ Транспорта, 2022. – 134 с.
3. Сравнительный анализ методов заправки транспортных средств // Транспорт на альтернативном топливе. – 2023. – № 1. – С. 34–42.
4. Локальные нагрузки на распределительные сети / под ред. П. К. Сидорова. – М.: Энергопресс, 2022. – 112 с.
5. Петров, А. В. Анализ суточных графиков нагрузки современных энергосистем / А. В. Петров, И. К. Сидоров // Энергетик. – 2021. – № 5. – С. 34–42.
6. Козлова, Е. Н. Влияние электромобилей на параметры энергопотребления / Е. Н. Козлова // Электрические станции. – 2022. – № 3. – С. 56–63.
7. Соколов, А. В. Прогнозирование нагрузки энергосистем в условиях массовой электромобилизации / А. В. Соколов, Е. Л. Михайлова // Энергетик. – 2023. – № 4. – С. 34–42.
8. Карасев, П. Н. Территориальные аспекты развития зарядной инфраструктуры для электротранспорта / П. Н. Карасев // Региональная экономика. – 2022. – № 3 (58). – С. 89–101.
9. Петров, А. Н. Моделирование нагрузок в распределительных сетях / А. Н. Петров // Энергетика. – 2023. – № 4. – С. 45–52.
10. Петрова, С. К. Экономика модернизации энергосетей / С. К. Петрова // Энергоэксперт. – 2024. – № 2. – С. 45–51.
11. Козлова, Е. Н. Экономика ВИЭ в транспортной инфраструктуре / Е. Н. Козлова // Альтернативная энергетика. – 2024. – № 1. – С. 34–42.
12. Воронин, В. А. Использование систем накопления электроэнергии для зарядных станций электромобилей в условиях ограничений на технологическое присоединение / В. А. Воронин, Ф. С. Непша, С. Ю. Анушенко // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2024. – № 5 (86). – С. 80–90. – EDN BHEBZM.
13. Петров, А. Н. Гармонические искажения в сетях с зарядной инфраструктурой / А. Н. Петров // Электрические станции. – 2023. – № 4. – С. 45–52.
14. Сидорова, М. К. Интеллектуальное управление зарядными станциями / М. К. Сидорова // Энергетик. – 2024. – № 1. – С. 33–39.

УДК 66.067.16-911.49

DOI: 10.35211/2500-0586-2025-2-51-58-65

А. В. Козлов¹, Ю. А. Таран¹, М. Г. Лагуткин^{1,2}, И. Ю. Голованов²

АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИЙ АППАРАТОВ С ФИЛЬТРУЮЩИМ ЭЛЕМЕНТОМ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИХ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ДЛЯ НЕФТЕДОБЫЧИ

¹МИРЭА – Российский технологический университет

²Московский политехнический университет

ehinokokk@mail.ru, aj_@mail.ru, lag53@yandex.ru, igol95@yandex.ru

Автор, ответственный за переписку: Иван Юрьевич Голованов, igol95@yandex.ru

Процесс разделения жидких гетерогенных систем широко используется для производства различных продуктов в химической, нефтехимической, пищевой и смежных отраслях промышленности. Аппараты, используемые для разделения, классифицируются по движущей силе процесса – силе тяжести, разности давления и центробежной силе; по исходному сырью – суспензия или эмульсия; по типу процесса – отстаивание, фильтрование, отстойное центрифугирование, фильтрующее центрифугирование и гидроциклонирование. Одной из актуальных задач современной промышленности является совершенствование оборудования для разделения существующих производств. Разработка новых конструкций оборудования для разделения, а также совершенствование существующих, невозможна без анализа достоинств и недостатков аппаратов, применяемых в промышленности. В статье проанализированы отечественные и зарубежные запатентованные конструкции аппаратов с фильтрующим элементом, используемые для разделения жидких гетерогенных систем. Выявлены наиболее важные и перспективные направления развития в конструировании аппаратов данного типа с учетом значимых технических и экономических аспектов для современной промышленности – энергосбережение при эксплуатации аппарата, ресурсосбережение при изготовлении аппарата, стремление к уменьшению габаритных размеров и упрощению конструкции аппарата. На основании проведенного анализа выявлены перспективные конструкции аппаратов с вращающимся фильтрующим элементом, новизна и практическая значимость которых подтверждаются патентами на полезную модель и изобретение.

Ключевые слова: нефтедобыча, буровые растворы, разделение суспензий, фильтрование, обзор патентов, анализ конструкций фильтров, перспективные конструкции фильтров

A. V. Kozlov¹, Yu. A. Taran¹, M. G. Lagutkin^{1,2}, I. Yu. Golovanov²

ANALYSIS OF THE DESIGNS OF DEVICES WITH A FILTER ELEMENT AND THE PROSPECTS FOR THEIR IMPROVEMENT FOR OIL PRODUCTION

¹MIREA – Russian technological university

²Moscow Polytechnic University

The process of separating liquid heterogeneous systems is widely used to produce various products in chemical, petrochemical, food and related industries. The devices used for separation are classified according to the driving force of the process – gravity, pressure difference or centrifugal force; according to the initial raw material – suspension or emulsion; according to the type of process – settling, filtration, settling centrifugation, filter centrifugation and hydrocyclonation. The improvement of separators of existing production facilities is an urgent task of modern industry. The development of new separator designs, as well as the improvement of existing ones, is impossible without analyzing the advantages and disadvantages of the devices used in industry. The article presents an analysis of domestic and foreign patented designs of separators with a rotating filter element. The most important and promising areas of development in the design of separators have been identified. The analysis takes into account the most important technical and economic aspects for modern industry – energy conservation and resource conservation, the desire to reduce overall dimensions and simplify the design of the separator. Based on the analysis, designs of separators with a rotating filter element are proposed. The novelty and practical significance of the proposed designs are confirmed by the presence of patents.

Keywords: oil production, drilling fluids, suspension separation, filtration, patent review, filter design analysis, promising filter designs

Аппараты и машины для разделения жидких гетерогенных систем применяются во многих отраслях промышленности, в том числе химической и нефтегазовой. Такие устройства, в частности, нашли свое применение для очистки воды и водоподготовки – процессах, без которых не обходится ни одна сфера деятельности современного общества. Отдельно стоит отметить использование данных устройств для очистки жидких сред в нефтедобывающей,

нефтеперерабатывающей и нефтехимической отраслях промышленности, например для очистки буровых растворов от механических примесей [1; 2].

В промышленности широко известны конструкции аппаратов с неподвижным фильтрующим элементом для разделения жидких гетерогенных систем, в которых поток дисперсионной среды подается перпендикулярно фильтрующей поверхности (рис. 1) [1].

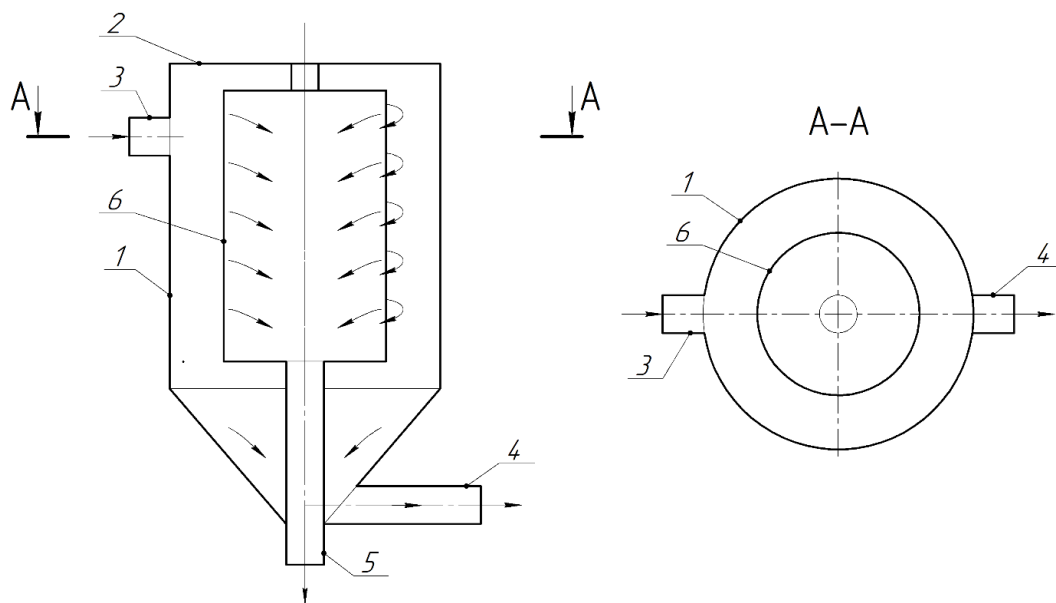


Рис. 1. Пример конструкции аппарата с неподвижным фильтрующим элементом и перпендикулярным вводом исходной жидкости:

1 – цилиндрик-конический корпус; 2 – крышка; 3 – патрубок ввода фильтруемой жидкости; 4 – патрубок вывода осадка; 5 – патрубок вывода фильтрата; 6 – фильтрующий элемент

К достоинствам данных конструкций стоит отнести их простоту и малые габаритные размеры. Недостатком таких аппаратов является необходимость регулярной очистки или замены фильтрующего элемента. Связано это с тем, что частицы, соизмеримые или превышающие размер ячеек фильтрующего элемента, постепенно забивают ячейки. Таким образом происходит загрязнение фильтрующего элемента и потеря

им фильтрующих свойств. Также можно отметить, что фильтрующий элемент омывается потоком исходной жидкости неравномерно, что ухудшает показатели его работы.

Для решения недостатков конструкций с перпендикулярным вводом исходной жидкости предложен ее тангенциальный ввод, в частности, в конструкции по авторскому свидетельству СССР 1349792 (рис. 2).

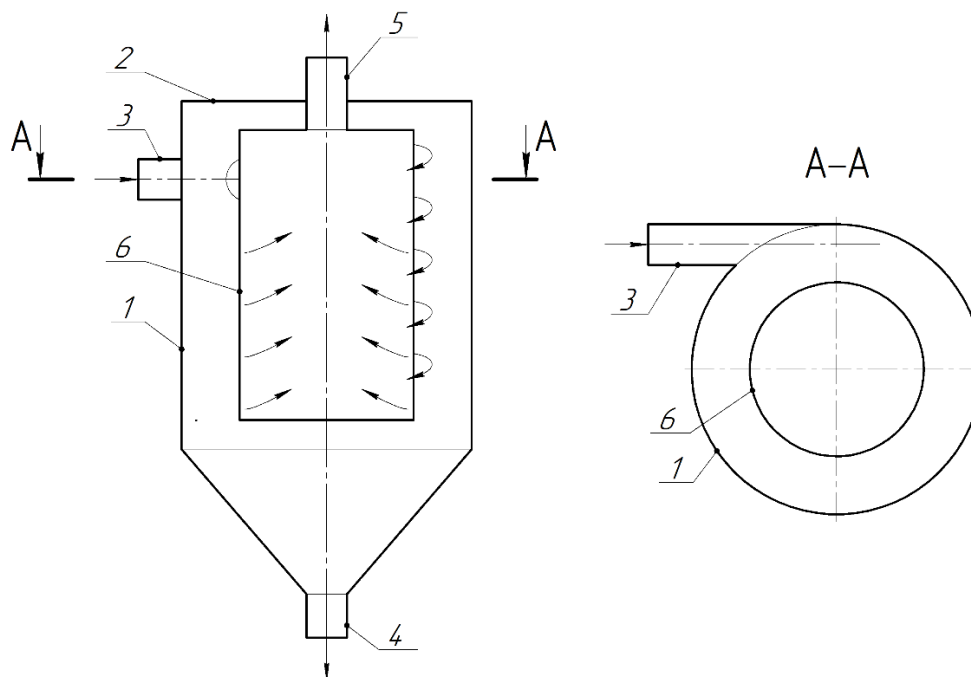


Рис. 2. Конструкция аппарата с неподвижным фильтрующим элементом и тангенциальным вводом исходной жидкости по авторскому свидетельству СССР 1349792:

1 – цилиндрический корпус; 2 – крышка; 3 – патрубок ввода фильтруемой жидкости; 4 – патрубок вывода осадка; 5 – патрубок вывода фильтрата; 6 – фильтрующий элемент

К достоинствам таких конструкций можно также отнести простоту и малые габаритные размеры. Частично решена проблема загрязнения фильтрующего элемента – поток жидкости смывает загрязнения с его поверхности, происходит некоторое самоочищение фильтрующего элемента в процессе эксплуатации аппарата. Тем не менее, полного самоочищения фильтрующего элемента, а следовательно и непрерывности работы аппарата, такая конструкция достичь не позволяет. За счет тангенциального расположения входного патрубка исходная жидкость закручивается в аппарате, и фильтрующий элемент омывается вращающимся потоком суспензии, что может привести к повышению энергетических затрат при эксплуатации аппарата. Кроме того, при движении фильтрата внутри фильтрующего элемента снизу вверх, преодоление гидростатического дав-

ления приводит к необходимости повышения напора фильтруемой жидкости, подаваемой в цилиндрический корпус, и следовательно увеличиваются энергозатраты при эксплуатации аппарата.

Пример конструкции аппарата с тангенциальным вводом для фильтрации транспортируемой по трубопроводу жидкости, которая может использоваться в системах теплоснабжения, промышленных водооборотных системах, а также на любых водоочистных сооружениях и установках в качестве предварительной ступени очистки любой технической воды, представлен в патенте РФ 207906.

Для решения проблемы загрязнения фильтрующего элемента были предложены два основных направления в конструировании: самоочистка фильтрующего элемента вибрацией или вращением в процессе эксплуатации аппарата.

К аппаратам с вибрационным устройством можно отнести конструкции по авторским свидетельствам СССР 344877, 1247045 и 297376 (рис. 3).

Работа таких аппаратов эффективна только с жидкостями невысокой вязкости. Проблема загрязнения фильтрующего элемента решается в ограниченной сфере применения данных аппаратов. Фильтрация сред с содержанием пластичных или липких частиц твердой фазы

ограничивает срок службы фильтрующего элемента, так как вследствие низкого напора фильтруемой жидкости на внешнюю поверхность фильтрующего элемента перепад давлений снаружи и внутри элемента недостаточен для эффективного процесса фильтрования. Такие конструкции увеличивают затраты на изготовление аппарата, а также энергетические затраты при его эксплуатации, в сравнении с конструкциями, представленными на рис. 1 и рис. 2.

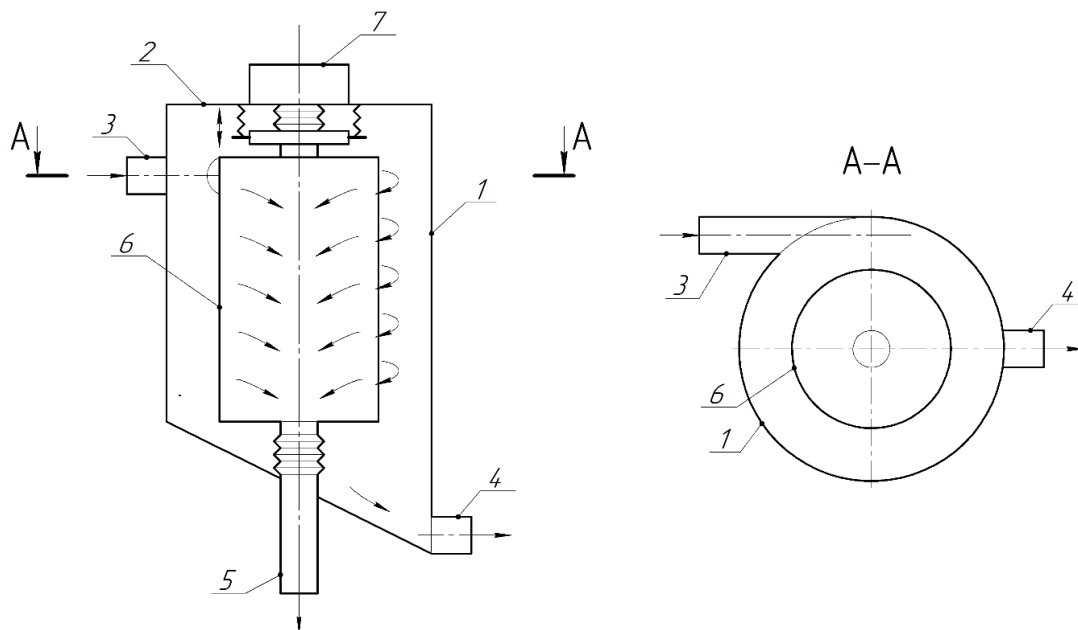


Рис. 3. Конструкция аппарата с вибрационным устройством по авторскому свидетельству СССР 297376:

1 – корпус; 2 – крышка; 3 – патрубок ввода фильтруемой жидкости; 4 – патрубок вывода осадка; 5 – патрубок вывода фильтрата; 6 – фильтрующий элемент; 7 – вибрационное устройство

Отдельно стоит отметить, что решения по снабжению конструкции вибрационным устройством и тангенциальным вводом исходной жидкости могут найти свое применение в других аппаратах для разделения жидких гетерогенных систем – емкостных криоконцентраторах, одна из современных конструкций которых представлена в патенте РФ 219187 и подробно описана в статьях [3; 4]. Подобные решения применяются и при конструировании биореакторов, которые используются, в частности, для биохимической очистки сточных вод. Например, вибрационный биореактор представлен в патенте РФ 157532, биореакторы с тангенциальным вводом исходной жидкости – в патентах РФ 2135579 и 2245915. Несмотря на меньшую интенсивность разделения жидких гетерогенных систем, в сравнении с аппаратами с фильтрующим элементом, емкостные криоконцентраторы и биореакторы могут эксплуатироваться и с любым

другим типом рабочей среды – твердой, газожидкостной и газовой. Одним из направлений использования таких аппаратов является обезвреживание и очистка нефтезагрязненных суспензий, почв и грунтов, например конструкция по патенту CN 149931. Учитывая тенденции к созданию автоматизированных, автономных и мобильных устройств для проведения энерго- и ресурсосберегающих процессов во всех отраслях промышленности [5–7], развитие данных аппаратов перспективно при создании мобильных установок [8–10] для устранения последствий локальных экологических катастроф, например для обезвреживания почв и сточных вод в местах разлива нефти. При этом конструктивные решения для создания таких аппаратов и устройств могут быть взяты из известных аппаратов с фильтрующим элементом. Одна из конструкций мобильного биореактора представлена в патенте US 20130101982.

К аппаратам с вращающимся фильтрующим элементом можно отнести конструкции по патентам US 4551242, 5401422, 29532989 и 5160633, патентам РФ 2363517, 204652, а также по авторскому свидетельству СССР 797720 и патенту ЕР 1044713. К общим элементам таких конструкций относятся: цилиндроконический корпус; крышка; патрубки ввода фильтруемой жидкости, вывода осадка, патрубок вывода фильтрата; выполненный с возможностью вращения цилиндрический фильтрующий элемент; установленный на цилиндрическом фильтрующем элементе полый приводной вал. Фильтруемая жидкость подается в кольцевое пространство между цилиндрической частью цилиндро-

конического корпуса и вращающимся цилиндрическим фильтрующим элементом. В результате действия разности центробежной силы инерции, центростремительной силы Архимеда и силы сопротивления потока жидкости крупные частицы движутся к стенке цилиндроконического корпуса и отводятся через патрубок вывода осадка. Мелкие частицы под действием указанных сил вместе с потоком жидкости движутся к цилиндрическому фильтрующему элементу и оседают на его поверхности. Фильтрат, содержащий частицы меньше размера ячеек фильтрующего элемента, поступает внутрь фильтрующего элемента, откуда выводится через полый приводной вал (рис. 4).

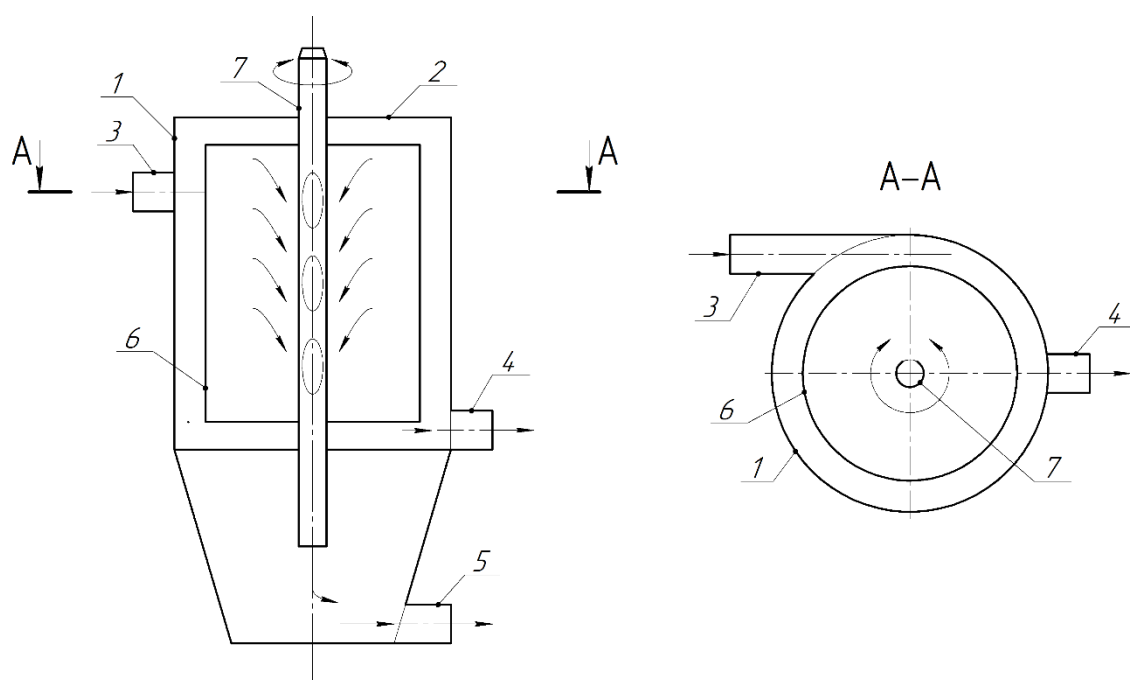


Рис. 4. Пример конструкции аппарата с вращающимся фильтрующим элементом:

1 – цилиндроконический корпус; 2 – крышка; 3 – патрубок ввода фильтруемой жидкости; 4 – патрубок вывода осадка; 5 – патрубок вывода фильтрата; 6 – фильтрующий элемент; 7 – приводной вал

Фильтрующие элементы таких аппаратов обладают большим сроком эксплуатации без падения производительности аппарата, ввиду эффективной самоочистки фильтрующего элемента, в сравнении с рассмотренными ранее конструкциями. Однако полного самоочищения фильтрующего элемента в процессе эксплуатации таких конструкций также не наблюдается. Такие конструкции увеличивают затраты на изготовление аппарата и энергетические затраты при его эксплуатации, в сравнении с конструкциями, представленными на рис. 1 и рис. 2, но при этом и обеспечивают значительно больший срок безотказной работы. Таким образом, совокупные затраты при долгосрочном использовании таких

аппаратов ниже, чем при использовании конструкций, представленных на рис. 1 и рис. 2.

В целях повышения производительности аппаратов предлагаются как комбинирование вращающегося фильтрующего элемента с вибрационным устройством (что оказывает положительный эффект только с жидкостями невысокой вязкости), так и снабжение конструкции дополнительными элементами и устройствами очистки.

К примеру, в патенте US 4551242 описана конструкция с установленными внутри корпуса ребрами. Такое решение позволяет интенсифицировать процесс самоочистки фильтра, однако при этом увеличиваются энергозатраты.

Конструкция по патенту ЕР 1044713 снабжена ультразвуковыми излучателями для обеспечения вибрации осадка и дальнейшего его смыывания потоком фильтруемой жидкости с поверхности фильтрующего элемента. Дополнительно конструкция включает моечные форсунки, которые направлены тангенциально к фильтрующему элементу и предназначены для удаления осадка с его поверхности струями моеющей жидкости под высоким давлением. При этом использование моечных форсунок возможно только при остановке процесса фильтрации. Движение фильтрата внутри фильтрующего элемента осуществляется снизу вверх, как и у конструкции по авторскому свидетельству СССР 1349792. Также в данной конструкции предусмотрены установленные внутри корпуса ребра для повышения турбулентности потока жидкости, как и в конструкции по патенту US 4551242. Таким образом, данную конструкцию можно считать сложной и требующей как высоких затрат ресурсов, так и энергозатрат.

К общим недостаткам конструкций по патентам US 4551242, 5401422, 29532989, 5160633,

авторскому свидетельству СССР 797720, патентам ЕР 1044713 и РФ 2363517 можно отнести: 1) сложность конструкции и высокие затраты на изготовление аппарата; 2) недостаточную для обеспечения непрерывности эксплуатации аппарата очистку фильтрующего элемента при работе с вязкими жидкостями или содержащими пластичные и липкие частицы твердой фазы (малую турбулентность потока жидкости); 3) малую поверхность фильтрующего элемента относительно габаритных размеров аппарата.

Конструкция по патенту РФ 204652 направлена на обеспечение непрерывности эксплуатации аппарата при работе с вязкими жидкостями, содержащими липкие частицы твердой фазы, при сохранении простоты конструкции. Для дополнительного повышения турбулентности потока жидкости разработана усовершенствованная конструкция данного аппарата. Разработанный аппарат включает цилиндрический фильтрующий элемент, ось вращения которого не коаксиальна его оси симметрии, при этом она также может быть наклонена относительно оси симметрии фильтрующего элемента (рис. 5) [11].

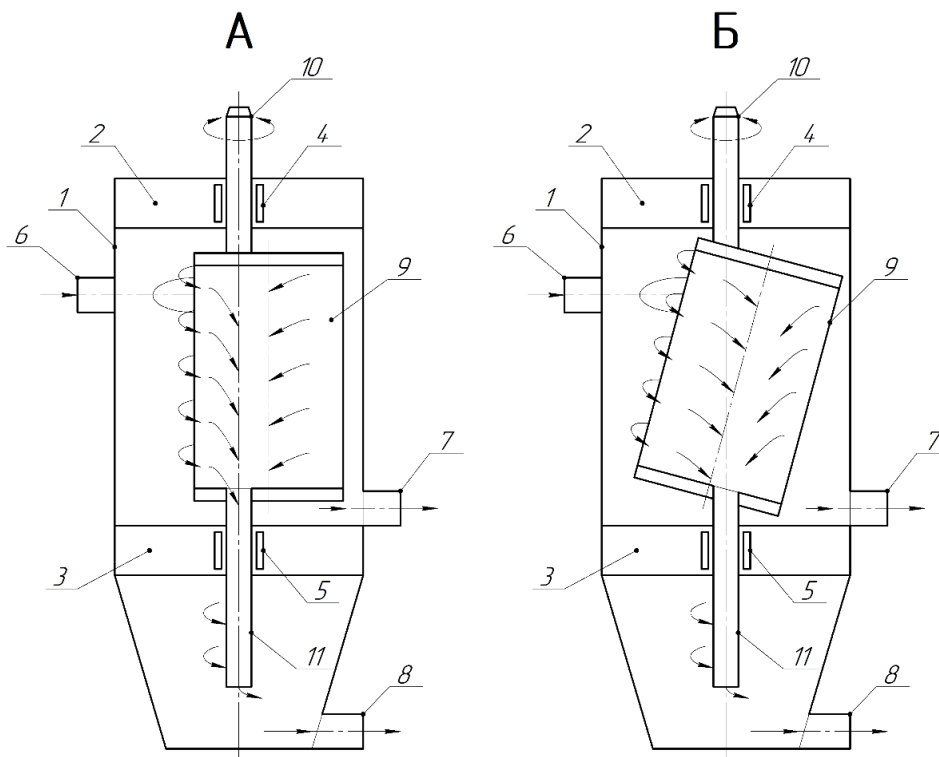


Рис. 5. Разработанная конструкция аппарата по патенту РФ 222589:

1 – цилиндрический корпус; 2 – обеспечивающая герметичность цилиндрического корпуса верхняя центрирующая пластина; 3 – обеспечивающая герметичность цилиндрического корпуса нижняя центрирующая пластина; 4 – верхний блок подшипников; 5 – нижний блок подшипников; 6 – тангенциальный патрубок ввода фильтруемой жидкости; 7 – патрубок вывода осадка; 8 – патрубок вывода фильтрата; 9 – фильтрующий элемент; 10 – приводной вал; 11 – выводная труба; А – ось вращения фильтрующего элемента параллельна оси его вращения; Б – ось вращения фильтрующего элемента наклонена относительно оси его вращения

При приведении во вращение цилиндрического фильтрующего элемента посредством вращения приводного вала, где ось вращения цилиндрического фильтрующего элемента не коаксиальна его оси симметрии, увеличивается тангенциальная составляющая скорости потока жидкости вблизи цилиндрического фильтрующего элемента и следовательно увеличивается турбулентность потока. За счет

турбулентности потока фильтруемой жидкости уменьшится слой образующегося осадка на поверхности цилиндрического фильтрующего элемента.

Ось вращения цилиндрического фильтрующего элемента может быть наклонена относительно оси цилиндрического корпуса для дополнительного повышения турбулентности потока фильтруемой жидкости.

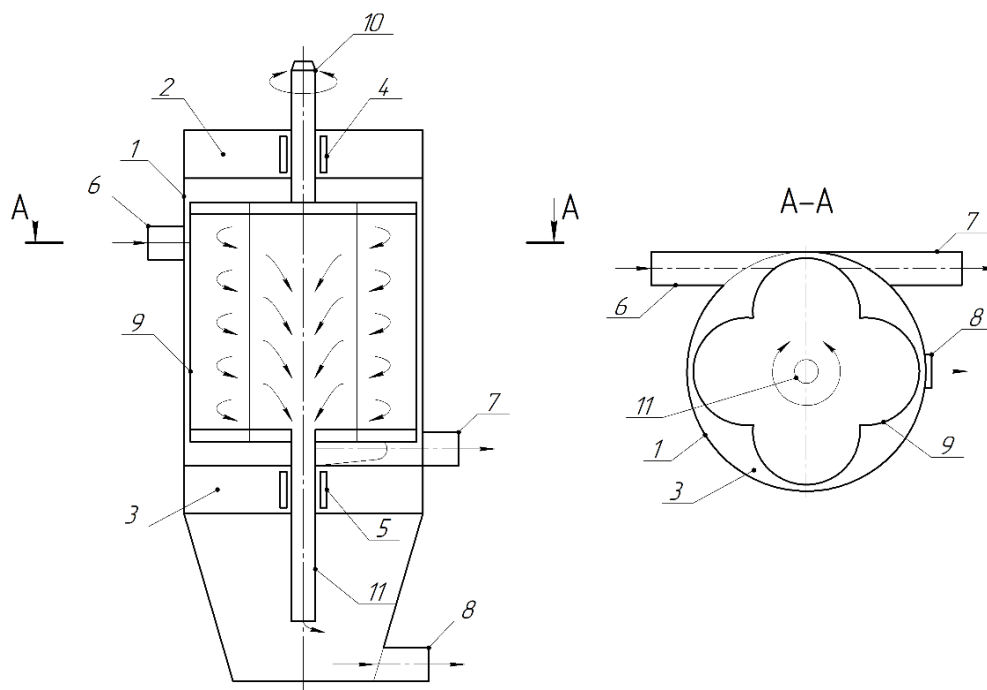


Рис. 6. Разработанная конструкция аппарата по патенту РФ 2817866:

1 – цилиндрический корпус; 2 – обеспечивающая герметичность цилиндрического корпуса верхняя центрирующая пластина; 3 – обеспечивающая герметичность цилиндрического корпуса нижняя центрирующая пластина; 4 – верхний блок подшипников; 5 – нижний блок подшипников; 6 – тангенциальный патрубок ввода фильтруемой жидкости; 7 – патрубок вывода осадка; 8 – патрубок вывода фильтрата; 9 – фильтрующий элемент; 10 – приводной вал; 11 – выводная труба

Конструкция аппарата по патенту РФ 204652 может быть усовершенствована увеличением поверхности фильтрующего элемента при сохранении габаритных размеров аппарата и простоты его конструкции. Разработанная конструкция представлена в патенте (рис. 6) [12].

Отличительной особенностью такой конструкции является выполнение фильтрующего элемента с поперечным сечением в форме эписциклоиды (на рис. 5 представлен пример при количестве каспов эписциклоиды, равном 4). За счет приведения во вращение эписциклоидного фильтрующего элемента будет увеличиваться турбулентность потока и уменьшаться слой образующегося осадка на поверхности фильтрующего элемента. При этом периметр эписцик-

лоиды (с количеством каспов не менее 4) всегда больше, чем длина окружности, в которую вписана эписциклоида. Следовательно, такая конструкция фильтрующего элемента будет обладать большей площадью поверхности фильтрования в сравнении с фильтрующим элементом цилиндрической формы (при равных габаритных размерах). Увеличение количества каспов эписциклоиды будет увеличивать площадь поверхности фильтрования, но при этом снижать турбулентность потока фильтруемой жидкости.

Эффективность процесса разделения может быть повышена при снижении энергетических затрат на процесс разделения, за счет определения рациональных соотношений геометрических параметров аппаратов [13].

Выводы

1. Проведен анализ различных отечественных и зарубежных конструкций фильтров для разделения жидких гетерогенных систем, отмечены их преимущества и недостатки, возможность использования для очистки буровых растворов.

2. Наиболее перспективным направлением при совершенствовании аппаратов с фильтрующим элементом является создание конструкции, обеспечивающей очистку фильтрующего элемента, достаточную для организации непрерывного процесса фильтрования и развитую площадь поверхности фильтрующего элемента без увеличения его габаритных размеров. Таким критериям наиболее близко соответствуют аппараты с вращающимся фильтрующим элементом и тангенциальным вводом фильтруемой жидкости.

3. На основании проведенного анализа конструкций аппаратов с вращающимся фильтрующим элементом предложены конструкция с цилиндрическим фильтрующим элементом, ось вращения которого не коаксиальна его оси симметрии (дополнительно ось вращения может быть наклонена относительно оси симметрии фильтрующего элемента), и конструкция с фильтрующим элементом, поперечное сечение которого выполнено в форме эллипсоида. Разработанные конструкции позволяют увеличивать турбулентность потока жидкости и уменьшать слой образующегося осадка на поверхности фильтрующего элемента. Конструкция с эллипсоидным фильтрующим элементом дополнительно позволяет увеличить площадь поверхности фильтрующего элемента без увеличения его габаритного размера. Новизна и практическая значимость разработанных конструкций подтверждены патентами на полезную модель и изобретение.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тимонин, А. С. Оборудование нефтегазопереработки, химических и нефтехимических производств / А. С. Тимонин, Е. Ю. Баранова, Г. В. Божко. – М.: Вологда : Инфра-Инженерия, 2022. – 948 с.
2. Атачкина, Н. А. Анализ целесообразности использования вихревого гидроразделителя для очистки буровых растворов / Н. А. Атачкина, Е. Ю. Баранова, М. Г. Лагут-

кин, Д. Е. Суханова // Техника и технология добычи нефти. – 2018. – № 4. – С. 49–55.

3. Ugolnikova, M. A. Dynamics of Water Ice Formation during the Operation of Vessel Cryoconcentrators / M. A. Ugolnikova, V. V. Chernyavskaya // Chemical and Petroleum Engineering. – 2021. – Vol. 57. – P. 561–566.

4. Sapozhnikov, V. B. Evaluating the Performance of Low-Temperature Liquid Separation Devices with Two-Stage Refrigeration and Pre-Cooling / V. B. Sapozhnikov, M. A. Ugolnikova, V. V. Chernyavskaya // Chemical and Petroleum Engineering. – 2023. – Vol. 59. – P. 134–138.

5. Албагачиев, А. Ю. Необходимость применения автоматизированных систем в 21 веке. Предпосылки появления цифрового производства / А. Ю. Албагачиев, А. С. Краско, Д. А. Радайкин // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2023. – № 2. – С. 62–74.

6. Краско, А. С. Повышение производительности автоматизированных технологических комплексов путем применения групповых приспособлений / А. С. Краско, М. А. Филин // Главный механик. – 2021. – № 5. – С. 34–43.

7. Краско, А. С. Использование цифровых моделей технологических систем для оценки эффективности проектных решений / А. С. Краско, Н. С. Баранова, Т. Н. Боровик // Инновационные технологии в электронике и приборостроении: сборник докладов Российской научно-технической конференции с международным участием Физико-технологического института РТУ МИРЭА, Москва, 16-17 апреля 2020 года. Том 2. – М.: МИРЭА – Российский технологический университет, 2020. – С. 102–103.

8. Албагачиев, А. Ю. Модель загрузки транспортно-загрузочного средства гибкой производственной системы / А. Ю. Албагачиев, А. С. Краско // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2019. – № 4. – С. 77–82.

9. Сулима, С. И. Перспективы использования аммиака в мобильных силовых установках с двигателем внутреннего сгорания / С. И. Сулима, А. П. Савостьянов // Результаты исследований – 2020: Материалы V Национальной конференции профессорско-преподавательского состава и научных работников ЮРГПУ (НПИ), Новочеркасск, 15 мая 2020 года. – Новочеркасск: Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М. И. Платова, 2020. – С. 165–166.

10. Shabelskaya, N. Study of the Possibility of Using Sol-Gel Technology to Obtain Magnetic Nanoparticles Based on Transition Metal Ferrites / N. Shabelskaya [et al.]. // Gels. – 2023. – Vol. 9, № 3. – P. 217.

11. Патент РФ на полезную модель № 222589, B01D33/11. Устройство для разделения суспензий / А. В. Козлов, М. Г. Лагуткин, И. Ю. Голованов. Оpubл. 11.01.2024. Бюл. № 2.

12. Патент РФ на изобретение № 2817866, B01D17/0217, B01D33/11. Устройство для разделения суспензий / А. В. Козлов, М. Г. Лагуткин, И. Ю. Голованов. Оpubл. 22.04.2024. Бюл. № 12.

13. Lagutkin, M. G. Reduction of energy consumption for suspension separation process implementation in hydrocyclones / M. G. Lagutkin, A. N. Shulyak, E. Yu. Baranova // Chemical and Petroleum Engineering. – 2023. – Vol. 59. – P. 449–456.

Ответственный за выпуск: редактор РИО
А. Н. Сергеева

Компьютерная верстка:
Е. В. Макарова

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77–64543 от 22 января 2016 г.
Федеральной службы по надзору в сфере связи, информационных технологий
и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)

Учредитель:
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Волгоградский государственный технический университет» (ВолгГТУ)

Адрес редакции и издателя: 400005, г. Волгоград, просп. В. И. Ленина, 28.
Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ)
Гл. редактор, тел.: +7 (8442) 24-80-03
E-mail: lysak2@vstu.ru

Темплан 2025 г. (научные издания). Поз. № 18ж. Дата выхода в свет 23.06.2025 г. Формат 60 × 84
1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 7,90. Уч.-изд. л. 7,57.
Тираж 100 экз. Свободная цена. Заказ № 244.

Оригинал-макет и электронная версия подготовлены РИО Издательства ВолгГТУ
400005, г. Волгоград, просп. В. И. Ленина, 28, корп. 7.

Отпечатано в типографии Издательства ВолгГТУ
400005, г. Волгоград, просп. В. И. Ленина, 28, корп. 7.

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ

В научно-техническом журнале «Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт» публикуются статьи, которые содержат результаты теоретических и экспериментальных исследований, представляют научный и практический интерес для широкого круга специалистов в области экономики.

Вопрос об опубликовании статьи или ее отклонении решает редакционная коллегия журнала, которая утверждается ректором университета, ее решение является окончательным. Редакция направляет представленный для издания материал на рецензирование.

Рукопись должна быть набрана и сверстана в текстовом редакторе Word и распечатана на лазерном принтере в режиме полной загрузки тонера. Формат бумаги А4 (210×297 мм).

Для ускорения подготовки издания необходимо представлять файлы статей на компакт-дисках (CD) в полном соответствии с распечатанным оригиналом. Диск должен быть вложен в отдельный конверт, на этикетке указываются фамилии авторов статьи.

При наборе текста следует соблюдать следующие требования: поля – верхнее – 2,0 см; нижнее – 3,0 см; левое – 2,5 см; правое – 2,5 см; шрифт Times, кегль 14, интервал полуторный.

Текст набирается с применением автоматического переноса слов, перед знаками препинания (в том числе внутри скобок) пробелы не допускаются, после них ставится один пробел. Разрядка слов не допускается, следует избегать перегрузки статей большим количеством формул, рисунков, таблиц. Для набора символов в формульном редакторе MS Equation (MS Word) использовать установки (Стиль/Размеры) только по умолчанию; рисунки должны быть выполнены в редакторах векторной графики, таких как CorelDRAW или в любом приложении к Word. Допускается сканирование рисунков в программе Microsoft Photo Editor.

Инициалы и фамилия автора (авторов) пишутся над заглавием статьи. Ниже заглавия, перед основным текстом, указывается организация или предприятие, где работает автор статьи. В конце статьи ставится полное название учреждения, которое рекомендует статью для публикации, дата и подпись автора (всех авторов).

Литературные ссылки должны быть оформлены в соответствии с ГОСТ 7.1–2003 «Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления». Библиографический список использованной литературы, составленный в порядке упоминания в тексте, дается в конце статьи; связь с основным текстом осуществляется цифровым порядковым номером в квадратных скобках в строке. Подстрочные ссылки не допускаются.

Иностранные фамилии и термины в тексте следует приводить в русском переводе. В библиографическом списке фамилии авторов, полное название книг и журналов приводятся на языке оригинала.

Ссылки на неопубликованные работы не допускаются.

При обозначении единиц физических величин должна применяться Международная система единиц (СИ).

Объем статьи не должен превышать 8 страниц бумаги формата А4, включая таблицы и библиографический список; число рисунков – не более четырех, включая рисунки, помеченные буквами *a*, *b*, и т. д. Рекомендуется включать в сборник статьи с авторским коллективом не более четырех человек с участием каждого автора в одной-двух статьях.

Статьи должны представлять сжатое четкое изложение результатов, полученных автором без повторов приводимых данных в тексте статьи, таблицах и рисунках. К статье должны быть приложены: сведения об авторах (полное имя, отчество, фамилия, ученая степень, звание, домашний адрес, номер телефона служебный, домашний, E-mail); документация, подтверждающая возможность ее открытого опубликования.