



---

**АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ  
СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ  
ПРОЦЕССАМИ  
CONTROL-2026**

---

**VI Международная  
научно-практическая  
конференция**

**21 – 22 апреля 2026 г.**

**Сборник материалов**

---

**МОСКВА**

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

---

**НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МЭИ»**

---



**АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ**

**CONTROL-2026**

VI Международная научно-практическая конференция  
21-22 апреля 2026 г.

**Сборник материалов**

© Коллектив авторов, 2026  
© Национальный исследовательский  
университет «МЭИ», 2026

**УДК 681.5**  
**ББК 32.966**  
**А 18**

*Подготовлено на кафедре АСУ ТП*

А 18 Автоматизированные системы управления технологическими процессами. Control-2026: VI Международная научно-практическая конференция (21-22 апреля 2026 г., Москва) [Электронный ресурс]: сборник материалов. Электрон. дан. – М.: Издательство МЭИ, 2026. – 1 электрон. опт. диск DVD-R.

**ISBN 978-5-7046-3401-0**

Сборник включает доклады, посвящённые современным тенденциям и инновационным решениям в области АСУ ТП, направленным на повышение надёжности и качества технологических процессов, снижение затрат и обеспечение безопасности. Особое внимание уделено освобождению персонала от трудоёмких и опасных операций.

Представляет интерес для научных работников, инженеров, аспирантов и студентов, занимающихся исследованиями и разработками в области автоматизации технологических процессов.

**Издано в авторской редакции**

**УДК 681.5**  
**ББК 32.966**

---

Научное электронное издание

**АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ CONTROL-2026**

VI Международная научно-практическая конференция  
21-22 апреля 2026 г.

Сборник материалов

Компьютерная верстка З.Х. Айнетдиновой

---

Дата подписания – 14.04.2026

Объём издания – 4 Мб

Тираж – 10 электронных оптических дисков DVD-R

Минимальные системные требования:

Тип ЭВМ: ПК на базе Pentium IV и выше.

ОС: Windows XP и выше.

Наличие программного обеспечения Adobe Reader.

Издательство МЭИ

111250, Москва, Красноказарменная, д. 14, стр.1

[izdatmpei@gmail.com](mailto:izdatmpei@gmail.com)

---

© Коллектив авторов, 2026

© Национальный исследовательский  
университет «МЭИ», 2026

## ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ

Мезин Сергей Витальевич	Заведующий кафедрой кафедра АСУ ТП «НИУ «МЭИ», к.т.н., доцент – председатель оргкомитета
Гужов Сергей Вадимович	Директор ЦПП «АСУ ТП ЭП» к.т.н., доцент, каф. АСУ ТП «НИУ «МЭИ» – ответственный секретарь
Аракелян Эдик Койрунович	д.т.н., профессор, каф. АСУ ТП «НИУ «МЭИ» – член Оргкомитета
Косой Анатолий Александрович	к.т.н., доцент, каф. АСУ ТП «НИУ «МЭИ» – член Оргкомитета
Андрюшин Александр Васильевич	д.т.н., профессор, каф. АСУ ТП «НИУ «МЭИ» – член Оргкомитета
Орлов Антон Александрович	к.т.н., доцент, каф. АСУ ТП «НИУ «МЭИ» – член Оргкомитета

## СОДЕРЖАНИЕ

<i>Андрюшин А.В., Неклюдов А.В., Ягупова Ю.Ю., Урвачев Р.С.</i> Применение нормативно-технической документации и данных телеметрии для разработки имитационных моделей.....	6
<i>Антоненко Л.О.</i> Идентификация дефектов паротурбинного оборудования на основе сверточных нейронных сетей.....	9
<i>Аракелян Э.К., Стрелков В.Ю.</i> Анализ возможности и эффективности перевода паровой турбины атомной электростанции с водо-водяной ядерным реактором (ввэр-1000) на скользящее регулирование при работе блока на пониженных нагрузках.....	13
<i>Аракелян Э.К., Минькин А.А.</i> Принципы работы и проблемы настройки ЧДА.....	15
<i>Аракелян Э.К., Ушкарев М.В.</i> Учет нестационарных режимов при оптимизации работы тепловых электростанций.....	18
<i>Безуглов Е.А.</i> Модификация эволюционного алгоритма Optim-MGA с использованием параллельных вычислений для задач управления.....	21
<i>Герасимов Н.Г.</i> Система параметрической диагностики объектов энергетики на основе искусственного интеллекта.....	25
<i>Голубев А.В., Муравьев И.К., Пересыпкин И.А., Дубов И.Е.</i> Интерактивный компьютерный тренажер для подготовки оперативного персонала цехов ТАИ и АСУТП.....	29
<i>Гужов С.В.</i> Алгоритм интеллектуальной системы управления и прогнозирования теплопотреблением в условиях нестационарности и внешних возмущений.....	34
<i>Исмаил А., Аракелян Э.К.</i> Разработка автоматизированной системы термического контроля и управления процессом сжигания композитного топлива в дизельном двигателе.....	38
<i>Калашников А.А., Терентьев А.В.</i> Разработка конструкции измерительной ячейки недисперсионного инфракрасного газоанализатора.....	43
<i>Мерзликина Е.И., Лозбичева П.Н.</i> Совершенствование системы управления электрофильтрами.....	46
<i>Орлов А.А., Щербаков В.М., Кенжалыев А.М.</i> Алгоритмизация процессов параметрического диагностирования в интеллектуальной автоматизированной системе управления газовых турбин большой мощности.....	49
<i>Орлов А.А., Щербаков В.М., Ксёнда Е.А.</i> Диагностика технического состояния газотурбинного двигателя на основе интеграции порогового контроля на программируемом логическом контроллере с прогнозной аналитикой искусственного интеллекта.....	51
<i>Орлов А.А., Кенжалыев А.М., Щербаков В.М.</i> Комбинированный автоматизированный интеллектуальный неразрушающий контроль и диагностика составных частей газотурбинных двигателей.....	55
<i>Орлов А.А.</i> Развитие автоматизированных систем научных исследований для автоматизированного теплового неразрушающего контроля металлических объектов сложной формы и внутренней структуры с оценкой надежности их эксплуатации.....	57

<i>Орлов А.А., Крылова Е.В., Графов Д.Р.</i> Разработка АСУ ТП энергетического объекта на примере системы автоматического регулирования температуры перегретого пара барабанного котла .....	65
<i>Тищенко Н.Р., Полежаев Д.С., Паржицкий С.С. Долбилов А.Г.</i> Автоматизация управления и мониторинг вентиляционной системы бытовых помещений лаборатории информационных технологий им. М.Г. Мещерякова ОИЯИ г.Дубна .....	69
<i>Фарафонов Г.В.</i> Синтез поисковой системы на основе расширенного алгоритма булевого поиска .....	73
<i>Феткуллин Т.Р.</i> Обработка и получение характеристики надежности турбоагрегата Т-100 основанной на малой выборке .....	77
<i>Чаплин А.Г., Никифоров А.А.</i> Использование метода определения статизма и мертвой полосы первичного регулирования при оценке реального участия ТЭС в нормированном первичном регулировании частоты .....	81
<i>Шинкевич Д.А., Муравьев И.К., Шомов П.А., Праньков Д.А.</i> Способ регулирования параметров дутья на фурме доменной печи дожимным нагнетателем .....	85

**Применение нормативно-технической документации  
и данных телеметрии для разработки имитационных моделей****Application of Regulatory and Technical Documentation and Telemetry Data  
for the Development of Simulation Models**

**Аннотация.** В работе продемонстрированы этапы разработки имитационных моделей, приближенных к реальным условиям эксплуатации. Проведен сбор данных телеметрии, их обработка, фильтрация от грубых ошибок. Разработана физико-математическая модель блока с турбиной Т-110 на языке программирования Python. На основе нормативно-технической документации при помощи программного обеспечения ThermoFlex разработана модель работающего в номинальном режиме блока с турбиной Т-110, позволяющая уточнить физические уравнения математической модели. На основе данных телеметрии получено регрессионное уравнение, отражающее эмпирическую зависимость между расходом пара в турбину и другими измеряемыми параметрами, и, следовательно, приближающее физико-математическую модель в реальным условиям эксплуатации.

**Ключевые слова:** имитационная модель, теплоэлектроцентраль, оценка состояния, математическое моделирование, обработка данных.

**Abstract.** The paper presents the stages of developing simulation models approximated to real operating conditions. Telemetry data were collected, processed, and filtered to remove gross errors. A physics-based mathematical model of a power unit equipped with a T-110 turbine was developed using the Python programming language. Based on regulatory and technical documentation, a model of a T-110 turbine unit operating under nominal conditions was created using the ThermoFlex software package, enabling refinement of the physical equations underlying the mathematical model. Using telemetry data, a regression equation was obtained that reflects the empirical relationship between the steam flow rate to the turbine and other measured parameters, thereby bringing the physics-based mathematical model closer to real operating conditions.

**Keywords:** simulation model, thermal power plant, state estimation, mathematical modeling, data processing.

**Введение**

Физико-математические модели, цифровые двойники, модели на основе нейронных сетей становятся все более актуальны в энергетике. Это связано с тем, что в отрасли требуется постоянный контроль за состоянием используемого оборудования, стремление к высоким показателям эффективности, повышение прибыли.

Применение имитационных моделей позволяет выявлять несоответствия между измеренными и расчетными значениями технологических параметров для дальнейшего обнаружения причины этого расхождения [1, 2]. Чтобы качество имитационных моделей оставалось высоким и модели соответствовали реальным условиям эксплуатации, следует применять метод разработки имитационных моделей на основе данных телеметрии [3].

Этапы разработки имитационной модели с применением данных телеметрии и нормативно-технической документации:

1. Обработка данных телеметрии;
2. Проверка исходных данных на предмет грубых ошибок и выделение требуемых для разработки модели параметров;
3. Разработка начальной модели для проверки как исходных данных, так и модели;
4. Разработка физической модели в ThermoFlex;
5. Получение регрессионной зависимости;
6. Проверка сбалансированности данных и верификация модели;
7. Проведение тестирования модели.

---

<sup>1</sup> Национальный исследовательский университет «МЭИ», Россия, Москва.  
National Research University «MPEI», Russia, Moscow.

### Разработка модели

Номинальный режим, указанный в НТД, не всегда описывает реальный режим работы энергоблока. Фактические данные по расходам могут отличаться от номинальных. Интерес вызывает описание фактических режимов работы, близких к номинальным. Целью работы является разработка точной имитационной модели, позволяющей рассчитать режимы работы, близкие к реальным.

Данные телеметрии необходимо обработать перед использованием в модели. Требуется проверить измеренные данные на наличие грубых ошибок – выбросов, «залипаний». Этот процесс возможно выполнить, визуализировав значения основных измеренных параметров. Также, отбросить некорректные данные измерений позволит выделение режимов работы энергоблока – конденсационного, одноступенчатого и двухступенчатого на основе данных телеметрии, задав определенным параметрам верхнюю и нижнюю границу.

После обработки данных разрабатывается физико-математическая модель, состоящая из уравнений энергетического и материального баланса, ограничений по верхним и нижним допустимым границам рассчитываемых параметров. Для физико-математической модели требуется получить регрессионное уравнение, связывающее расход пара и другие измеряемые параметры, такие как мощность, давление и температура пара на входе в турбину, давление в отборах. Регрессионная зависимость проверяется критерием Фишера на значимость модели; регрессоры проверяются методом главных компонент на отсутствие сильной мультиколлинеарности. Оценка регрессионной зависимости выполняется следующими метриками: среднее процентное значение ошибки (МАРЕ) и среднеквадратичного отклонения (СКО).

Чтобы физика процессов в имитационной модели была описана достаточно точно, разрабатывается дополнительная модель при помощи программного обеспечения ThermoFlex, входящего в программный пакет ThermoFlow, опираясь на номинальные значения параметров блока [4].

Основные параметры с соответствующими номинальными значениями, указанными в НТД, приведены в таблице 1. Модель в ThermoFlex разрабатывается на основе номинального режима, схема модели в ThermoFlex представлена на рисунке 1. На основе расчетных значений модели построена hS-диаграмма, рисунок 2.

Для оценки адекватности полученной модели в ThermoFlex следует сравнить полученные расчетные значения и данные телеметрии; для сравнения требуется выбирать параметры, которые не задавались вручную, а были получены в результате расчетов. Такими параметрами может служить энтальпия теплоносителя, расход пара в отборах.

Таблица 1. Номинальные значения основных параметров модели

Переменная	Описание	Значение	Единица измерения
$D_0$	Расход пара в турбину	480	т/ч
$P_0$	Давление пара на входе в турбину	12,8	МПа
$T_0$	Температура пара на входе в турбину	555	°С
$Q_t$	Тепловая нагрузка отопительная	175	Гкал/ч
$N$	Мощность	110	МВт
$T_{пв}$	Температура питательной воды	230	°С
$T_{ов}$	Температура охлаждающей воды	20	°С
$D_{ов}$	Расход охлаждающей воды	16000	м <sup>3</sup> /ч
$P_k$	Давление в конденсаторе	4,9	кПа

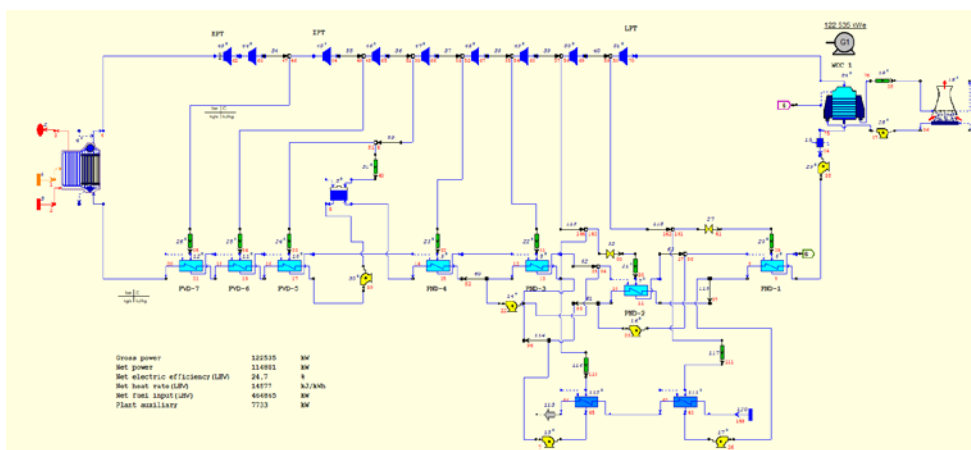


Рис. 1. Разработанная модель в ThermoFlex

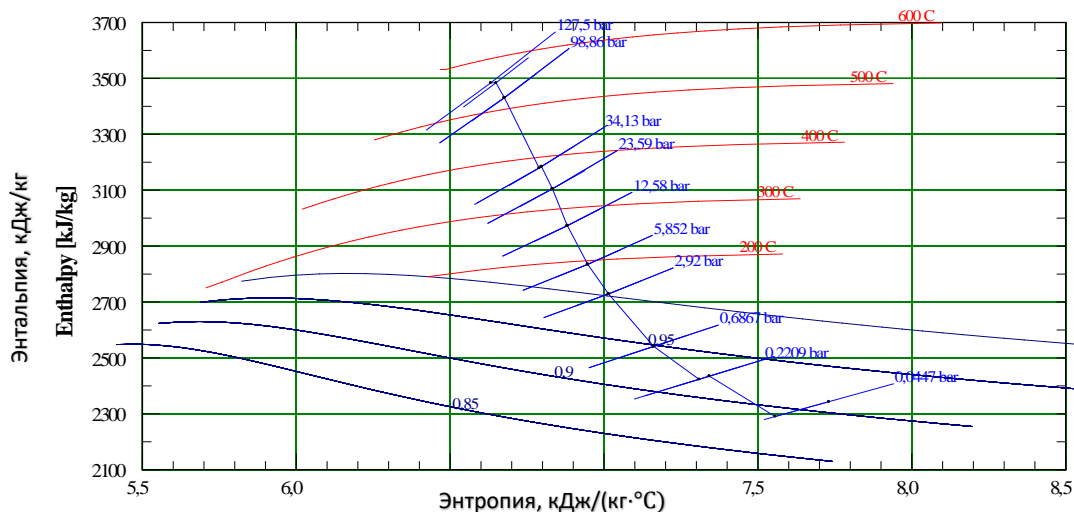


Рис. 2. hS-диаграмма

Разработанная имитационная модель проверяется на адекватность при помощи значения меры суммарных небалансов – квадратичной невязки расчетного и измеренного параметра, нормированной по среднеквадратичному отклонению соответствующего параметра.

Чтобы точно определить параметр, который вызывает небаланс в имитационной модели, строятся диаграммы рассеивания – на них представлена связь между расчетным и фактическим значением параметра. Отклонения на диаграммах рассеивания могут означать как неточности модели, так и неисправности измерительного прибора.

### Заключение

Данный подход к разработке имитационных моделей позволяет получить адекватную имитационную модель, приближенную к реальным условиям эксплуатации. Разработанная имитационная модель позволит решать как различные задачи оптимизации [5, 6], так и задачу оценки состояния измеряемых параметров.

### Список библиографических ссылок

1. Chen Z., Xu K., Yang T. Digital twin for predictive maintenance // NDE 4.0, Predictive Maintenance, Communication, and Energy Systems: The Digital Transformation of NDE. – 2023. – pp. 6.
2. Ignjatovska A., Pandilov Z., Petreski Z. Physics-based, data-driven, and physics-based data-driven methods for diagnostics of rotating machinery – State of the art // Annals of the Faculty Engineering Hunedoara. – 2023. – Vol. 21, No. 1. – pp. 43–52.
3. Матинян А.М., Новицкий Д.А., Неклюдов А.В., Посохов Ю.М. Прототип цифрового двойника теплофикационной турбины: особенности разработки и результаты тестирования // Электрические станции. – 2024. – № 9. – С. 45–53.

4. Урвачев Р.С. Численное исследование способа оценки технического состояния конденсационной установки котельного агрегата с помощью физико-математической модели // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Тезисы докладов Тридцатой международной научно-технической конференции, Москва, 2024. – С. 1041.

5. Андрияшин А.В., Неклюдов А.В., Ягупова Ю.Ю., Урвачев Р.С. Разработка и оптимизация имитационной модели. Для повышения эффективности энергетических систем // Математические методы в технологиях и технике. – 2025. – № 7. – С. 18-22.

6. Andryushin A.V., Neklyudov A.V., Yagupova Y.Y., Kuznetsova A.V., Ilyes B.H. and Kosoy A.A. Optimization of Heat and Electricity Load Distribution Under a Given Composition of Generating Equipment // 2023 7th International Conference on Information, Control, and Communication Technologies (ICCT), Astrakhan, Russian Federation, 2023, – pp. 1-6.

УДК 004.89

<sup>1</sup>Антоненко Л.О.

<sup>1</sup>Antonenko L.O.

### Идентификация дефектов паротурбинного оборудования на основе сверточных нейронных сетей

### Identification of defects in steam turbine equipment based on convolutional neural networks

**Аннотация.** В статье предложен алгоритм диагностики турбины, в основе которого лежит анализ информации с измерительных датчиков. Главная цель исследования- разработка метода параметрической диагностики дефектов турбинного оборудования на основе сверточных нейронных сетей. Алгоритм основан на анализе информации абсолютных значений сигналов датчиков и динамических характеристик их изменения. Для достижения поставленной цели сформулирована задача разработки и исследования модели 1D сверточной нейронной сети, обеспечивающей выявление признаков наличия дефектов и их начальных стадий по данным с технологических датчиков. Датчики включают в себя температуру, давление, расход и другие параметры, представленные в виде многомерных временных рядов. Особое внимание уделено учёту скоростей изменения параметров и формированию обучающей выборки с использованием размеченных состояний. Обучающие вектора отражают наличие дефекта и преддефектное состояние оборудования. В результате проведённого исследования показано, что предложенный подход позволяет выявлять характерные временные паттерны, соответствующие развитию дефектов, и обеспечивает возможность их раннего обнаружения на основе совокупного анализа значений и динамики изменения параметров. Такой подход позволяет анализировать предпосылки для повышения достоверности диагностики и своевременного принятия решений по эксплуатации турбинного оборудования.

**Ключевые слова:** Диагностика энергетического оборудования, паровые турбины, идентификация дефектов, сверточные нейронные сети, цифровая диагностика.

**Annotation.** This article proposes a turbine diagnostic algorithm based on the analysis of data from measuring sensors. The primary objective of the study is to develop a method for parametric diagnostics of turbine equipment defects using convolutional neural networks. The algorithm is based on the analysis of absolute values of sensor signals and the dynamic characteristics of their changes. To achieve this goal, the task was formulated to develop and study a 1D convolutional neural network model capable of identifying signs of defects and their initial stages based on data from process sensors. The sensors include temperature, pressure, flow rate, and other parameters presented as multi-

---

<sup>1</sup> Национальный исследовательский университет «МЭИ», Россия, Москва.  
National Research University «MPEI», Russia, Moscow.

dimensional time series. Particular attention is paid to accounting for the rates of change of the parameters and the formation of a training set using labeled states. Training vectors reflect the presence of a defect and the pre-defective state of the equipment. The study demonstrated that the proposed approach enables the identification of characteristic time patterns corresponding to the development of defects and enables their early detection based on a comprehensive analysis of the values and dynamics of parameter changes. This approach allows us to analyze the prerequisites for increasing the reliability of diagnostics and timely decision-making regarding the operation of turbine equipment.

**Keywords:** power-equipment diagnostics; steam turbines; defect identification; convolutional neural networks; digital diagnostics.

### **Введение**

В современных условиях функционирования энергетических систем особую значимость приобретает обеспечение надежности и эффективности работы основного оборудования, к числу которого относятся паровые турбины, эксплуатация которых осуществляется в условиях переменных нагрузок, высоких температур и давлений, а также при наличии совокупности факторов, ускоряющих процессы износа и деградации конструктивных элементов. В этой связи своевременная диагностика технического состояния турбинного оборудования становится ключевым инструментом предотвращения аварийных ситуаций, снижения эксплуатационных затрат и повышения общей энергетической эффективности, поскольку позволяет выявлять как явные, так и скрытые дефекты на ранних стадиях их развития. Традиционные методы диагностики, основанные преимущественно на пороговом анализе отдельных параметров и регламентированных процедурах технического контроля, несмотря на свою практическую применимость, в ряде случаев оказываются недостаточно чувствительными к сложным взаимосвязанным изменениям параметров, сопровождающим развитие дефектов, что ограничивает их возможности в условиях высокой динамичности технологических процессов. В связи с этим в последние годы активно исследуются и внедряются современные подходы, основанные на методах машинного обучения и искусственных нейронных сетей, способных выявлять скрытые закономерности в многомерных массивах данных и учитывать нелинейный характер протекающих процессов [1-3]. Особый интерес представляют методы глубокого обучения, ориентированные на анализ временных рядов технологических параметров, поскольку именно во временной структуре сигналов датчиков зачастую содержится информация о зарождении и развитии дефектов [2, 4]. Применение таких методов открывает перспективы перехода от регламентного обслуживания оборудования к концепции обслуживания по фактическому состоянию и позволяет оптимизировать ресурсы, повысить надежность и сократить время простоя энергетических установок. Перспективным направлением в данной области является использование сверточных нейронных сетей, обладающих способностью эффективно выделять локальные признаки в последовательностях данных и выявлять характерные шаблоны наличия дефектов [1, 5]. В настоящей работе рассматривается подход к диагностике турбинного оборудования, основанный на применении одномерных сверточных нейронных сетей для анализа многомерных временных рядов сигналов датчиков, включающих как значения технологических параметров, так и характеристики их изменения во времени [3]. Предлагаемый метод ориентирован на выявление как сформировавшихся дефектов, так и их начальных стадий, что определяет его потенциал для использования в задачах ранней диагностики и повышения эффективности эксплуатации турбинного оборудования.

### **Анализ этапов построения модели**

Формирование предлагаемой методики обнаружения дефектов турбинного оборудования базируется на использовании совокупности технологических параметров, регистрируемых системой контрольно-измерительных приборов и автоматики, которые в процессе эксплуатации отражают текущее состояние как отдельных функциональных узлов, так и установки в целом. В качестве исходных данных могут рассматриваться многомерные временные ряды, включающие значения температуры перегретого пара, давления на входе и выходе турбины, массового расхода рабочей среды, концентрации кислорода в уходящих газах, параметров вибрации подшипниковых узлов, а также дополнительных характеристик, таких как перепады давлений по ступеням, температурные поля корпуса и коэффициенты эффективности. Указанные параметры формируются на основе измерений, осуществляемых датчиками, раз-

мещёнными в различных зонах турбинной установки: в проточной части, в системе парораспределения, в подшипниковых узлах и вспомогательные системы. Диагностическая значимость информации определяется не только абсолютными значениями измеряемых величин, но и характером их изменения во времени, включая скорости изменения параметров, наличие колебательных составляющих и взаимосвязи между различными каналами измерений.

На первом этапе построения модели осуществляется формирование и предварительная обработка входных данных, синхронизация временных рядов, нормализация параметров. Важным этапом является выделение временных окон фиксированной длины, в пределах которых анализируется поведение системы. Дополнительно могут рассчитываться производные характеристики, отражающие динамику изменения параметров. Рассчитанные характеристики позволяют учитывать не только стационарные, но и переходные режимы работы оборудования. Сформированные таким образом массивы данных представляют собой многомерные последовательности, подаваемые на вход модели. Ключевым элементом предлагаемого подхода является использование сверточной нейронной сети, ориентированной на обработку временных рядов, которая в процессе обучения осуществляет автоматическое извлечение информативных признаков, характеризующих различные состояния турбинного оборудования. В отличие от традиционных методов, основанных на заранее заданных диагностических признаках, нейронная сеть формирует внутренние представления, позволяющие выявлять сложные нелинейные зависимости между параметрами и их временной динамикой, соответствующие как нормальным режимам функционирования, так и различным стадиям развития дефектов. С функциональной точки зрения нейронная сеть реализует последовательность преобразований входных данных, включающую выделение локальных закономерностей в пределах временных окон, их последующую агрегацию и формирование обобщённого признакового описания состояния объекта. Результатом работы модели является отнесение анализируемого временного фрагмента к одному из заранее определённых классов, соответствующих нормальному состоянию, наличию дефекта или его начальной стадии. При этом обучение сети осуществляется на размеченных данных, содержащих информацию о характере состояния оборудования, что обеспечивает возможность адаптации модели к специфике конкретной турбинной установки и условиям её эксплуатации. Предлагаемый подход к построению модели основывается на комплексном учёте как статических, так и динамических характеристик технологических параметров, а также на применении методов глубокого обучения, позволяющих автоматически выявлять скрытые диагностические признаки, что создаёт предпосылки для повышения точности и надёжности обнаружения дефектов. Более детальное рассмотрение структуры и параметров используемой нейронной сети будет представлено в следующем разделе работы.

#### **Архитектура нейронной сети**

В рамках предлагаемого подхода исходные данные представляют собой многомерные временные ряды технологических параметров турбинного оборудования, формируемые по измерениям датчиков температуры, давления, расхода, вибрации и других характеристик, отражающих состояние отдельных узлов и установки в целом. Формально набор данных может быть представлен в виде:

$$X = \{x_i(t)\}; i = 1, \dots, M; t = 1, \dots, T \quad (1)$$

Где  $x_i(t)$ - значение  $i$ -го параметра в момент времени  $t$ ;  $M$ - число параметров;  $T$ - длина временного ряда. С целью учета динамики процессов дополнительно вычисляются скорости изменения сигналов:

$$v_i(t) = \frac{x_i(t) - x_i(t-1)}{\Delta t} \quad (2)$$

Где  $v_i(t)$ - скорость изменения параметра;  $\Delta t$ - шаг дискретизации. Далее выполняется нормализация данных:

$$\tilde{x}_i(t) = \frac{x_i(t) - x_i^{min}}{x_i^{max} - x_i^{min}} \quad (3)$$

Где  $x_i^{min}$ ,  $x_i^{max}$ - минимальное и максимальное значения параметра. После этого временные ряды разбиваются на окна фиксированной длины  $L$ , формируя обучающие выборки  $W^{(k)}$ , которым сопоставляются метки состояний оборудования. Архитектура модели реализована в

виде одномерной сверточной нейронной сети [2, 4], осуществляющей последовательное преобразование входных данных с целью извлечения информативных признаков. Выход сверточного слоя определяется выражением:

$$s_j(t) = \sum_{c=1}^C \sum_{r=0}^{K-1} w_{j,c,r} h_c(t+r) + b_j \quad (4)$$

Где  $s_j(t)$ - отклик  $j$ -го фильтра;  $C$ - число входных каналов;  $K$ - размер ядра;  $w_{j,c,r}$ - весовые коэффициенты;  $h_c(t)$ - входной сигнал;  $b_j$ - смещение. После этого применяем нелинейную функцию активации:

$$h_j(t) = \max(0, s_j(t)) \quad (5)$$

И осуществляем операцию субдискретизации:

$$p_j(t) = \max_{0 \leq q < P} (h_j(t+q)) \quad (6)$$

Где  $P$ - размер окна pooling. Итоговое представление преобразуется полносвязным слоем:

$$u_k = \sum_{i=1}^D w_{ki} f_i + b_k \quad (7)$$

Где  $f_i$ - признаки;  $D$ - их число;  $w_{ki}$ ,  $b_k$ - параметры слоя. Вероятности классов определяются функцией softmax:

$$\hat{y}_k = \frac{e^{u_k}}{\sum_{j=1}^K e^{u_j}} \quad (8)$$

Где  $\hat{y}_k$ - вероятность принадлежности к  $k$ -му классу;  $K$ - число классов. Обучение сети осуществляется путем минимизации функции потерь:

$$L = -\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K y_{n,k} \ln \hat{y}_{n,k} \quad (9)$$

Где  $N$ - число примеров;  $y_{n,k}$ - истинная метка;  $\hat{y}_{n,k}$ - предсказанная вероятность. Обновление параметров производится методом градиентного спуска:

$$\theta_{t+1} = \theta_t - \eta \frac{\partial L}{\partial \theta_t} \quad (10)$$

Где  $\theta_t$ - параметры модели,  $\eta$ - шаг обучения.

### **Вывод**

В результате проведённого исследования показано применение одномерных сверточных нейронных сетей для анализа многомерных временных рядов технологических параметров турбинного оборудования. Предложенный метод обеспечивает возможность выявления устойчивых диагностических закономерностей, отражающих сформировавшиеся дефекты и их начальные стадии. Такие результаты достигаются за счёт комплексного учёта значений параметров и их динамических характеристик- скорости изменения и локальных временных паттернов. Разработанная методика отличается способностью автоматически извлекать информативные признаки из данных без необходимости их явного задания. Это повышает адаптивность модели к различным режимам эксплуатации и снижает зависимость от экспертных эвристик, традиционно используемых в задачах технической диагностики. Дополнительным преимуществом разработанной модели является её потенциальная интегрируемость в состав многоэкспертных диагностических систем, в рамках которых результаты работы сверточной нейронной сети могут использоваться совместно с другими интеллектуальными методами, в частности, нейро-нечеткими моделями типа ANFIS, что особенно актуально в условиях ограниченного объёма обучающей выборки.

### **Список литературы**

- 1) Zhu Z., Peng G., Chen Y., Gao H. A review of the application of deep learning in intelligent fault diagnosis of rotating machinery // Measurement. 2023. Vol. 206. Pp. 112346. DOI: 10.1016/j.measurement.2022.112346.
- 2) Tama, B.A., Vania, M., Lee, S. et al. Recent advances in the application of deep learning for fault diagnosis of rotating machinery using vibration signals. Artif Intell Rev 56, 4667–4709 (2023). <https://doi.org/10.1007/s10462-022-10293-3>.

3) Matania O., Dattner I., Bortman J., Kenett R.S., Parmet Y. A systematic literature review of deep learning for vibration-based fault diagnosis of critical rotating machinery: Limitations and challenges // Journal of Sound and Vibration. 2024. Vol. 590. Pp. 118562. DOI: 10.1016/j.jsv.2024.118562.

4) Brito L.C., Susto G.A., Brito J.N., Duarte M.A.V. Fault diagnosis using explainable AI: A transfer learning-based approach for rotating machinery exploiting augmented synthetic data // Expert Systems with Applications. 2023. Vol. 232. Pp. 120860. DOI: 10.1016/j.eswa.2023.120860.

5) Wang H., Wang H., Tang X. A review of deep learning in rotating machinery fault diagnosis and its prospects for port applications // Applied Sciences. 2025. Vol. 15. No. 21. Pp. 11303. DOI: 10.3390/app152111303.

УДК 621.039.52

<sup>1</sup>Аракелян Э.К., <sup>1</sup>Стрелков В.Ю.

<sup>1</sup>Arakelyan E.K., <sup>1</sup>Strelkov V.Y.

**Анализ возможности и эффективности перевода паровой турбины атомной электростанции с водо-водяным ядерным реактором (ввэр-1000) на скользящее регулирование при работе блока на пониженных нагрузках**

**Analysis of the possibility and efficiency of switching a steam turbine of a nuclear power plant with a pressurized water reactor (PWR-1000) to sliding regulation when the unit is operating at reduced loads**

**Аннотация:** Излагается перспектива развития атомной отрасли в мировой и отечественной энергетике. Показано, что рост доли атомной генерации в энергобалансе неизбежно влечет за собой проблему маневренности. Утверждается, что привлечение реактора к изменению его нагрузки в широких пределах технически сложно, экономически невыгодно и чревато снижением ресурса оборудования, обосновывается эффективность переноса тяжести регулирования мощности на паровую турбину. Рассматривается возможность применения усовершенствованной тепловой схемы скользящего регулирования давления свежего пара с перегревом насыщенного пара на выходе из парогенератора в дополнительном водо-паровом подогревателе. Дано описание технических и экономических преимуществ предлагаемой схемы. Приведены некоторые энергетические показатели паровой турбины и энергоблока в целом. Утверждается, что наряду с улучшением экономических показателей повышается надежность работы как паровой турбины, так и реактора.

**Ключевые слова:** атомная энергетика, маневренность, скользящее регулирование, перегрев пара, водо-паровой подогреватель, экономичность, надежность.

**Abstract:** The article outlines the prospects for the development of the nuclear industry in the global and domestic energy sectors. It shows that the increase in the share of nuclear generation in the energy balance inevitably leads to the problem of maneuverability. The article argues that it is technically difficult, economically unprofitable, and fraught with a decrease in equipment life to use the reactor to change its load within a wide range, and substantiates the effectiveness of shifting the burden of power regulation to the steam turbine. The article also discusses the possibility of using an improved thermal scheme for sliding control of fresh steam pressure with superheating of saturated steam at the exit of the steam generator in an additional water-steam heater. The paper describes the technical and economic advantages of the proposed scheme. It also provides some energy indicators for the steam turbine and the power unit as a whole. The paper argues that, along with improving economic performance, the reliability of both the steam turbine and the reactor is also increased.

**Keywords:** nuclear power, maneuverability, sliding regulation, steam overheating, water-steam preheater, efficiency, and reliability.

---

<sup>1</sup> Национальный исследовательский университет «МЭИ», Россия, Москва.  
National Research University «MPEI», Russia, Moscow.

## Введение

Ядерная энергетика сегодня переживает фазу уверенного роста, окончательно закрепив за собой статус надежного низкоуглеродного источника, без которого немислим глобальный энергопереход. Согласно актуальным данным информационной системы МАГАТЭ по энергетическим реакторам (PRIS), по состоянию на конец 2025 года в мире эксплуатируется 416 энергоблоков суммарной мощностью 376,3 ГВт. При этом прогнозы агентства выглядят еще более впечатляюще: к 2050 году ожидается двукратный рост общемировых ядерно-энергетических мощностей — от 561 до 992 ГВт (эл.) [1].

Рост доли атомной генерации в энергобалансе неизбежно влечет за собой проблему маневренности. Реакторы типа ВВЭР-1000, составляющие основу российской атомной энергетики, изначально создавались как базовые источники. Их маневренные возможности ограничены возможностью ксеноновых колебаний, ведущих к пространственной нестабильности энерговыделения в активной зоне [2,3]. В этой ситуации логичным видится перенос центра тяжести в регулировании мощности на турбинное оборудование с переводом на скользящее регулирование давления свежего пара [4].

## Усовершенствованная схема скользящего регулирования на ВВЭР-1000

Суть предложения заключается в организации перегрева свежего пара на выходе из парогенератора. Для этого предлагается использовать тепловую энергию первого контура, которая в обычном режиме остается невостребованной. Часть циркуляционной воды первого контура направляется в специальный водо-паровой подогреватель, установленный в тракте свежего пара (рис.1). Отдав свое тепло для перегрева насыщенного пара, охлажденная вода первого контура возвращается в магистраль перед главным циркуляционным насосом (ГЦН), смешиваясь с основным потоком.

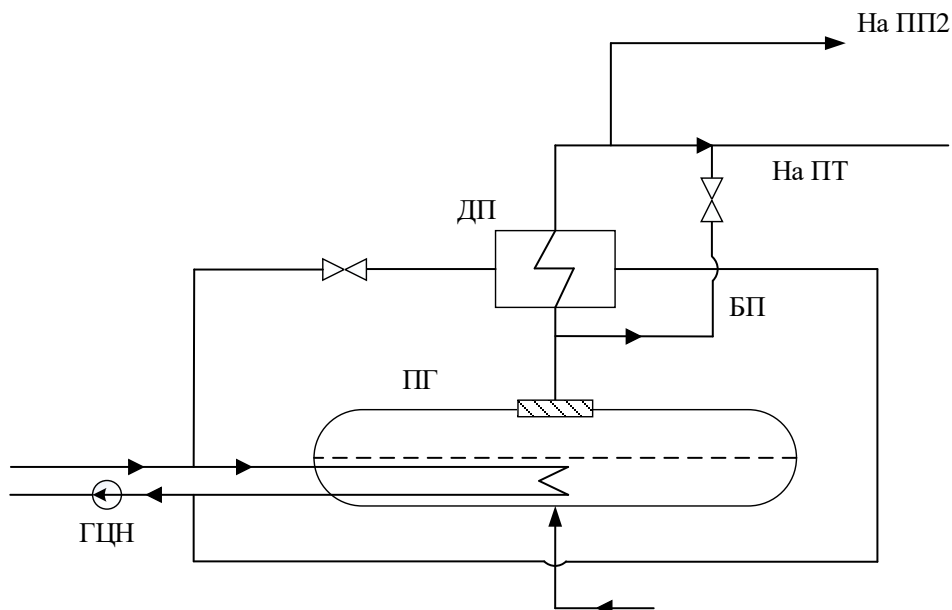


Рис. 1. Схема включения дополнительного подогревателя:

ПГ – парогенератор; ДП – дополнительный подогреватель; ГЦН – главный циркуляционный насос; ПТ паровая турбина; БП – линия байпаса ДП; ПП2 – пароперегреватель

Принципиально возможно два варианта по степени перегрева пара:

- 1) Как на тепловых энергоблоках, поддерживать температуру пара на уровне температуры при номинальной нагрузке блока - 279 °С;
- 2) Перегреть пар до максимального возможного значения, т.е. до уровня 318-319 °С.

### **Анализ результатов тестовых расчетов тепловой схемы паровой турбины**

По результатам тестовых расчетов тепловой схемы паровой турбины в скользящем режиме можно сделать следующие выводы: с уменьшением нагрузки степень сухости постепенно увеличивается во всех цилиндрах турбины, удельное потребление тепла несколько ниже, чем при работе паровой турбины на постоянном давлении пара. Перегрев пара повышает базовую температуру пара (260-275°C) до (314-316°C), что приводит к повышению мощности паровой турбины, на 40-50МВт при температуре пара 275-277 °С и свыше 100 МВт при температуре 314-316 °С. Наиболее важных в данной работе является повышение степени сухости на 2,2% по сравнению с вариантом без теплообменника, что позволяет довести ее до 90%.

### **Заключение**

Образцом для расчетных данных является АЭС с ВВЭР-1000 с турбоагрегатом К-1000-60/1500. Используя стандартные методы расчета схем, было подготовлено несколько наборов данных для уровня нагрузки 0,7-1,0 как без, та и с установкой дополнительного подогревателя.

Результаты показали большой потенциал, так как электрический КПД увеличился в среднем на 0,5%, значения электрической мощности увеличились в среднем на 100 МВт. Кроме того, увеличение степени сухости в среднем на 2% обеспечивает потенциальную выгоду для надежности и срока службы турбинного оборудования.

### **Список литературы**

1. IAEA. Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the Period up to 2050 : Reference Data Series No. 1, 2025 Edition. – Vienna : International Atomic Energy Agency, 2025. – 147 p. – URL: <https://www.iaea.org/publications/12345/energy-electricity-and-nuclear-power-estimates-for-the-period-up-to-2050> (дата обращения: 17.02.2026). – Текст : электронный.
2. Максимов, М. В. Управление аксиальным офсетом ядерного реактора при маневрировании мощностью / М. В. Максимов, К. В. Беглов, Н. В. Каназирский // Автоматизация технологических и бизнес-процессов. – 2015. – № 21. – С. 47–54. – URL: <https://journals.uran.ua/atbp/article/view/42865> (дата обращения: 17.02.2026). – Текст : электронный .
3. Analysis of calculation of fuel rods for strength under transient and steady-state operating conditions / P. V. Fedotov [et al.] // Nuclear Energy and Technology. – 2023. – Vol. 9, No. 4. – P. 243–249. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352179123002041> (дата обращения: 17.02.2026). – Текст : электронный .
4. Аракелян Э.К., Стрелков В.Ю. Особенности управления режимами работы паровой турбины реактора типа ВВЭР-1000 при скользящем регулировании давления пара// Новое в российской электроэнергетике, №5.2025, с.32-40.+

УДК 621.311.001.57

<sup>1</sup>Аракелян Э.К., <sup>1</sup>Минькин А.А.

<sup>1</sup>Arakelyan E.K., <sup>1</sup>Minkin A.A.

### **Принципы работы и проблемы настройки ЧДА**

### **Principles of operation and problems of setting up the BDA**

**Аннотация:** В статье рассматриваются принципы работы и особенности настройки частотной делительной автоматики (ЧДА) на теплофикационных энергоблоках большой мощности. Описывается назначение ЧДА, принцип деления по частоте, типовые уставки и логика работы ступеней, а также требования нормативных документов. Анализируются основные

---

<sup>1</sup> Национальный исследовательский университет «МЭИ», Россия, Москва.  
National Research University «MPEI», Russia, Moscow.

проблемы функционирования: ложные срабатывания, запаздывание, неселективность, избыточное отключение нагрузки и влияние теплофикационного режима на работу автоматики. Представлены подходы к оптимизации режимов ЧДА, направленные на повышение устойчивости энергоблоков и надежности энергосистемы в целом.

**Ключевые слова:** частотная делительная автоматика, теплофикационный энергоблок, деление по частоте, уставки ЧДА, ложные срабатывания, автоматическая разгрузка.

**Abstract:** The article discusses the principles of operation and features of setting up frequency division automation (HDA) on high-power heating units. The purpose of the BDA, the principle of frequency division, typical settings and the logic of the steps, as well as the requirements of regulatory documents are described. The main problems of operation are analyzed: false alarms, delay, non-selectivity, excessive shutdown of the load and the influence of the heating regime on the operation of automation. The approaches to optimizing the black hole modes aimed at increasing the stability of power units and the reliability of the power system as a whole are presented.

**Keywords:** frequency dividing automation, heating power unit, frequency division, BDA settings, false alarms, automatic unloading.

Частотная делительная автоматика (ЧДА) относится к числу противоаварийных устройств, предназначенных для сохранения устойчивости энергосистемы и предотвращения глубокого снижения частоты при возникновении дефицита активной мощности [1]. На теплофикационных энергоблоках большой мощности её роль приобретает особую значимость, поскольку такие блоки работают в тесной связи с тепловой нагрузкой и зачастую имеют ограниченные возможности по маневрированию [2].

Основное назначение ЧДА заключается в автоматическом разделении энергосистемы или её части при аварийном снижении частоты до заданных уровней [3]. В отличие от автоматической частотной разгрузки, ЧДА направлена не на ступенчатое отключение потребителей внутри единой системы, а на выделение энергорайонов с собственными источниками генерации. Это позволяет локализовать аварию, сохранить питание наиболее ответственных нагрузок и предотвратить развитие системного коллапса [4]. В отдельных случаях ЧДА используется для обеспечения собственных нужд электростанции через трансформатор собственных нужд.

Принцип действия ЧДА основан на контроле частоты сети и скорости её изменения. При возникновении крупного дисбаланса между генерацией и потреблением происходит снижение частоты. Если её значение достигает заданных уставок, срабатывают соответствующие ступени автоматики, формирующие команды на отключение заранее определённых линий связи или секционных выключателей. Деление выполняется таким образом, чтобы каждая выделяемая часть системы имела максимально возможный баланс мощности [5].

Деление по частоте реализуется через многоступенчатую структуру. Каждая ступень имеет собственную уставку по частоте и выдержку времени. Типовые значения уставок для систем с номинальной частотой 50 Гц находятся в диапазоне 49,2–48,0 Гц в зависимости от уровня ответственности и характеристик энергосистемы [6]. Первая ступень, как правило, предназначена для раннего реагирования и имеет минимальную выдержку времени, порядка 0,3–0,5 с. Последующие ступени вводятся при дальнейшем снижении частоты и могут иметь более жёсткие пороги срабатывания [7].

Логика работы ступеней строится по принципу приоритетности. Срабатывание более высокой ступени возможно только при невыполнении условий предыдущей либо при продолжении снижения частоты. При этом учитываются блокировки по напряжению, состоянию выключателей, наличию синхронной работы и другим параметрам. На теплофикационных энергоблоках дополнительно учитывается режим отбора тепловой энергии, поскольку резкое изменение электрической нагрузки может привести к нарушению теплового графика и технологических ограничений турбины [8].

Нормативные требования к настройке ЧДА определяются отраслевыми документами по противоаварийной автоматике, правилами технической эксплуатации электрических станций и сетей, а также требованиями системного оператора. Предусматривается обеспечение селективности, достаточной чувствительности и быстродействия. В результате настройки должны

исключаться как несвоевременное срабатывание, так и пропуск аварийной ситуации. Отдельное внимание уделяется согласованию параметров ЧДА с автоматической частотной разгрузкой и устройствами противоаварийной автоматики смежных энергообъектов [9].

На практике настройка ЧДА на теплофикационных энергоблоках сопровождается рядом существенных проблем. Одной из наиболее распространённых является ложное срабатывание. Оно может быть вызвано кратковременными провалами частоты, колебательными процессами при межсистемных перетоках или ошибками измерительных цепей. В условиях плотной межсистемной связи даже незначительные колебания способны достигать пороговых значений уставок. Вследствие этого происходит необоснованное деление, что ухудшает надёжность электроснабжения.

Не менее серьёзной проблемой является запаздывание срабатывания. При чрезмерно больших выдержках времени или заниженной чувствительности автоматика может не успеть предотвратить развитие аварии. Частота продолжает снижаться, что приводит к массовому действию автоматической частотной разгрузки и возможной потере устойчивости генераторов. Для теплофикационного блока это дополнительно осложняется инерционностью паротурбинной установки и ограничениями по скорости изменения нагрузки.

Проблема неселективности функционирования противоаварийной автоматики (ЧДА) возникает при отделении участков сети в точках, не предусмотренных расчетным путем. Это влечет за собой дисбаланс мощностей в образовавшихся энергорайонах. Причинами такого развития событий могут служить вариации режимов работы энергосистемы, изменения ее топологии, подключение новых генерирующих объектов или трансформация характера потребления. В результате неселективного срабатывания одна часть энергосистемы сталкивается с профицитом мощности, тогда как другая испытывает ее острый недостаток, что делает необходимым применение дополнительных мер противоаварийного управления для стабилизации режима [10].

Кроме того, серьезным негативным фактором является чрезмерное отключение потребителей. Если уставки оборудования завышены или их работа не скоординирована с иными системами автоматики, может произойти отключение избыточного количества линий и связей, превышающее объем, требуемый для нормализации баланса. Подобные сбои влекут за собой финансовые убытки, уменьшают надежность обеспечения потребителей теплом и ухудшают эксплуатационные характеристики энергетического оборудования.

Особое влияние на работу ЧДА оказывает теплофикационный режим энергоблока. В отличие от конденсационных станций, теплофикационные турбины работают с жесткой привязкой к тепловому графику. Резкое изменение электрической нагрузки отражается на параметрах пара, давления в теплофикационных отборах и температурных режимах сетевой воды. В зимний период такие отклонения могут привести к нарушению теплоснабжения потребителей. По этой причине уставки ЧДА должны учитывать допустимую глубину разгрузки блока без выхода за технологические ограничения.

Кроме того, теплофикационные энергоблоки часто функционируют в условиях неполной загрузки по электрической мощности при высокой тепловой нагрузке. Это снижает их регулируемую способность и усложняет формирование сбалансированных островов при делении системы. В результате стандартные подходы к настройке ЧДА, применяемые для конденсационных блоков, не обеспечивают требуемой эффективности.

Комплексная оптимизация режимов частотной делительной автоматики на теплофикационных энергоблоках большой мощности требует учёта динамических характеристик турбоагрегатов, структуры сетевых связей и сезонной изменчивости нагрузки. Корректный выбор уставок, согласование ступеней и адаптация логики работы позволяют повысить устойчивость энергорайона и снизить вероятность как ложных, так и запаздывающих срабатываний. Это формирует основу для дальнейшего совершенствования противоаварийной автоматики в условиях усложняющихся режимов работы энергосистем.

#### **Список литературы**

1. Ионов А. А., Банников С. О. Особенности выделения тепловых электрических станций с поперечными связями действием частотной делительной автоматики // Оперативное управление в электроэнергетике: подготовка персонала и поддержание его квалификации. – 2018. – № 5.

2. Школенко А. Ю. Частотная делительная автоматика теплоэлектростанций // Научные публикации «Наука через призму времени». – 2021. – № 10 (55). – С. 7–12.
3. Ластовкин В. Д., Коваль В. Н., Думиков А. А. Адаптивная дополнительная автоматическая разгрузка с пуском по частоте // Энергетик. – 2020. – № 3. – С. 3–8.
4. Матвиенко К. С. Исследование участия теплофикационного энергоблока Т-250 в регулировании частоты и мощности в энергосистеме на базе его тренажерной модели : автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 2011. – 26 с.
5. Sun Z., Zhang R., Zhang R., Pan C., Chen W., Li Z. Emergency Load-Shedding Strategy for Power System Frequency Stability Based on Disturbance Location Identification // Energies. – 2025. – Vol. 18, № 6. – 1362.
6. Полей А. К., Штым К. А. Актуальные вопросы надёжности работы ГТУ малой мощности на примере мини-ТЭЦ на о. Русский // Энергетик. – 2020. – № 3. – С. 16–19.
7. ГОСТ Р 58335–2018. Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы. Оперативно-диспетчерское управление. Автоматическое ограничение снижения частоты при аварийном дефиците активной мощности. Нормы и требования. – М.: Стандартинформ, 2019.
8. СТО 59012820.29.240.004–2008. Организация в ЕЭС России автоматического ограничения снижения частоты при аварийном дефиците активной мощности. Технические правила. – 2008.
9. ГОСТ Р 55105–2012. Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы. Оперативно-диспетчерское управление. Автоматическое противоаварийное управление режимами энергосистем. Противоаварийная автоматика энергосистем. Нормы и требования. – М.: Стандартинформ, 2013.
10. North American Electric Reliability Corporation (NERC). Reliability Guideline: Primary Frequency Control. – Princeton, NJ: NERC, Sept. 2023.

УДК 621.513

<sup>1</sup>Аракелян Э.К., <sup>1</sup>Ушкарев М.В.

<sup>1</sup>Arakelyan E.K., <sup>1</sup>Ushkarev M.V.

### Учет нестационарных режимов при оптимизации работы тепловых электростанций

### Consideration of non-stationary modes in optimizing the operation of thermal power plants

**Аннотация:** Целью работы является разработка методологических принципов учета нестационарных потерь при оптимизации режимов ТЭС. Задача исследования заключается в выявлении факторов, обуславливающих расхождение между статическими нормативами и фактическими показателями эффективности. В результате анализа установлено, что колебательные процессы в системах регулирования и ограниченная скорость исполнительных механизмов формируют динамическую составляющую потерь, составляющую существенную долю расхода топлива на маневренных участках. Обоснована необходимость перехода от квазистационарных моделей к методам, учитывающим динамику процесса. Предложен подход на основе динамического программирования, позволяющий оптимизировать очередность и скорость загрузки разнородных агрегатов с учетом переходных режимов.

**Ключевые слова:** тепловые электростанции, динамические потери, переходные режимы, оптимизация нагрузки, маневренность оборудования, энергоэффективность.

**Abstract:** The aim of the work is to develop methodological principles for accounting non-stationary losses in optimizing TPP operating modes. The research objective is to identify factors

---

<sup>1</sup> Национальный исследовательский университет «МЭИ», Россия, Москва.  
National Research University «MPEI», Russia, Moscow

causing the discrepancy between static standards and actual efficiency indicators. The analysis reveals that oscillatory processes in control systems and limited speed of actuators form a dynamic loss component constituting a significant share of fuel consumption at maneuvering sections. The necessity of transitioning from quasi-stationary models to methods considering process dynamics is substantiated. An approach based on dynamic programming is proposed, allowing optimization of the sequence and loading rate of heterogeneous units taking into account transient modes.

**Keywords:** thermal power plants, dynamic losses, transient modes, load optimization, equipment flexibility, energy efficiency.

Современные методы оптимизации режимов тепловых электростанций (ТЭС) базируются на использовании нормативных энергетических характеристик, полученных в ходе тепловых испытаний оборудования в установившихся режимах. В литературе отмечается, что энергетические характеристики служат основой для анализа экономичности и распределения нагрузок между параллельно работающими агрегатами [1]. Такие характеристики позволяют с достаточной точностью описывать поведение агрегатов при стационарной нагрузке. Однако практика последних лет свидетельствует о растущем несоответствии между нормативными и фактическими показателями топливной экономичности. Основная причина кроется в изменении характера работы ТЭС: если ранее электростанции несли базовую нагрузку, то сегодня они вынуждены участвовать в регулировании суточных графиков с глубокими провалами и пиками. Системный оператор использует декомпозицию графика на квазистационарные получасовые интервалы, в пределах которых нагрузка полагается неизменной. Такой подход, удобный для диспетчерского управления, не отражает реальную динамику процессов при переходе с одного уровня мощности на другой.

Исследования последних лет показывают, что игнорирование переходных режимов приводит к систематическим ошибкам в расчетах. В работах, посвященных моделированию эффективных режимов работы ТЭС в условиях избытка мощности в энергосистеме, подчеркивается необходимость учета переменного характера нагрузки [2]. На участках входа в провалы графика и выхода из них скорость изменения нагрузки достигает максимальных значений, и именно здесь наиболее ярко проявляются динамические свойства оборудования. Применение статических моделей для таких условий не позволяет корректно оценить реальные затраты топлива.

Нестационарные потери при изменении нагрузки имеют сложную физическую природу, обусловленную динамикой систем автоматического регулирования. В процессе нагружения или разгружения энергоблока регуляторы, включая их исполнительные механизмы, не способны мгновенно отследить заданную траекторию изменения параметров. Инерционность исполнительных механизмов и наличие запаздывания в каналах регулирования приводят к тому, что в переходных режимах регулируемые параметры отклоняются от заданных значений, что вызывает дополнительные потери энергии [3]. Возникают колебательные процессы, при которых давление, температура и расход пара отклоняются от оптимальных значений. Продолжительность стабилизации параметров после окончания активного изменения нагрузки может достигать значительных величин, в течение которых оборудование работает в нерасчетных точках с повышенным удельным расходом топлива.

Согласно исследованиям в области термодинамического анализа способов модернизации ТЭС, дополнительные затраты топлива за счет переходных процессов составляют заметную величину от расхода за период маневра [4]. В масштабах суточного графика с несколькими циклами изменения нагрузки кумулятивный эффект достигает значений, которые нельзя игнорировать при оптимизации. Применение уточненных методов энергетического анализа показывает, что на устранимые потери в оборудовании приходится значительная доля суммарных потерь, что указывает на возможность улучшить технико-экономические показатели установки [5].

Вторым важным фактором является ограничение по допустимой скорости нагружения и разгружения. Технические условия эксплуатации устанавливают предельные значения скорости изменения мощности, однако выбор конкретного значения в пределах допустимого диапазона влияет на интегральные потери: более высокий темп сокращает длительность переходного периода, но увеличивает амплитуду колебаний регулируемых параметров. Практическим

следствием неучета этих факторов является ситуация, при которой формальный расчет по статическим характеристикам показывает выработку электроэнергии с оптимальным КПД, тогда как фактический расход топлива оказывается выше из-за нестационарных режимов.

Решение проблемы видится в переходе от статических моделей к динамическим, позволяющим оптимизировать не отдельные режимы, а траекторию изменения нагрузки как непрерывный процесс. Теоретической основой такого подхода может служить аппарат динамического программирования. Согласно принципу оптимальности, сформулированному для многошаговых процессов, оптимальное поведение обладает тем свойством, что каковы бы ни были первоначальное состояние и первоначальное решение, последующие решения должны составлять оптимальное поведение относительно состояния, полученного в результате первого решения [6]. Суть метода заключается в рассмотрении процесса изменения нагрузки как многошаговой операции, где на каждом шаге выбирается управление, минимизирующее суммарные затраты на всем интервале. Ключевым условием адекватности модели является выбор шага дискретизации, обеспечивающего разрешение переходных процессов. Для корректного описания динамики регуляторов шаг по времени должен быть достаточным для фиксации основных колебательных явлений.

Для практической реализации предлагается использовать критерий оптимальности, учитывающий как статические затраты топлива при фиксированной нагрузке, так и дополнительные динамические потери, возникающие при изменении мощности. Эти динамические потери представляют собой функцию, зависящую от скорости изменения нагрузки и текущего уровня мощности. Ограничения включают баланс мощности в каждый момент времени, допустимые диапазоны нагрузок для каждого агрегата, предельные скорости изменения мощности, а также динамические ограничения, связанные с инерционностью регуляторов.

Особого внимания заслуживает вопрос об очередности загрузки агрегатов. В статической постановке первыми загружаются наиболее экономичные агрегаты. В динамической постановке это правило может нарушаться, поскольку агрегат с лучшим статическим КПД может обладать худшими динамическими характеристиками, и его использование для быстрого изменения нагрузки приведет к большим динамическим потерям. Оптимальная стратегия может заключаться в распределении маневров между несколькими агрегатами с учетом их динамических свойств. Современные подходы к идентификации характеристик энергоблоков для задач оперативного управления предполагают использование методов машинного обучения, что открывает новые возможности для учета динамических факторов [7].

Особенно показательным является сравнение прогнозируемого и фактического технологического минимума нагрузки. При использовании статических нормативов расхождение с фактическим значением может быть существенным, тогда как динамическое моделирование позволяет значительно повысить точность прогноза. Это подтверждает эффективность учета динамических факторов для определения реальных режимных возможностей оборудования. Современные методы машинного обучения, применяемые для прогнозирования характеристик турбомашин, обеспечивают высокую точность при решении подобных задач [8].

Проведенный анализ позволяет утверждать, что традиционные методы оптимизации режимов ТЭС, основанные на статических энергетических характеристиках и квазистационарном представлении графиков нагрузки, не учитывают существенную составляющую топливных затрат, возникающую в переходных режимах при изменении мощности. При работе в переменных режимах возникают дополнительные потери, связанные с изменением углов атаки лопаток и отклонением параметров пара от расчетных [9]. Основными источниками динамических потерь являются колебательные процессы в системах регулирования и ограниченная скорость реагирования исполнительных механизмов, что приводит к работе оборудования в неоптимальных режимах в периоды изменения нагрузки. Применение метода динамического программирования с шагом дискретизации, обеспечивающим разрешение переходных процессов, позволяет корректно учесть эти факторы и определить оптимальную траекторию изменения нагрузки, очередность загрузки агрегатов и допустимые скорости изменения их мощности. Выполненные расчеты показывают, что внедрение динамических методов оптимизации позволяет добиться экономии топлива на маневренных режимах, а также повысить точность прогнозирования технологических минимумов и максимумов нагрузки. Дальнейшее развитие предложенного подхода связано с созданием цифровых двойников оборудования, интегриру-

ющих данные АСУ ТП в реальном времени и позволяющих непрерывно актуализировать динамические характеристики агрегатов с учетом их технического состояния на основе современных методов машинного обучения.

#### Список литературы

1. Рогалев, Н. Д. Тепловые электрические станции: учебник / Н. Д. Рогалев, А.А. Дудолин, Е. Н. Олейникова. — Москва : НИУ МЭИ, 2022. — 768 с.
2. Богдан Е.В., Голомыздо А.М., Карницкий Н.Б. Моделирование эффективных режимов работы ТЭС в условиях избытка мощности в энергосистеме // Теплоэнергетика. – 2025. – № 3. – С. 45-57.
3. Плетнев Г.П. Автоматическое управление объектами тепловых электростанций: учебник для вузов. – М.: Энергоиздат, 1981. – 360 с.
4. Киндра В.О., Львов Д.Д., Комаров И.И., Вегера А.Н., Кожемякин М.С. Термодинамический анализ способов модернизации ТЭС с противоаварийными турбинами в условиях отсутствия промышленного потребителя пара // Известия РАН. Энергетика. – 2025. – № 3. – С. 36-53.
5. Azubuike U.G., Njoku H.O., Eke M.N., Ekechukwu O.V. Уточненный эксергетический анализ и классификация компонентов парогазовой установки по их эффективности // Теплоэнергетика. – 2025. – № 1. – С. 23-39.
6. Беллман Р. Динамическое программирование. – М.: Иностранная литература, 1960. – 400 с.
7. Тищенко В.А., Белоусова А.А., Нестеров П.М., Смирнов А.О. Определение профильных потерь кинетической энергии потока в турбинных решетках с применением нейронных сетей // Теплоэнергетика. – 2025. – № 4. – С. 64-77.
8. Яблоков А.А., Тычкин А.Р., Иванов И.Е., Умнов Я.А. Разработка и исследование методов выбора комплектов измерений параметров аварийного режима и обработки результатов ДОМП // Известия РАН. Энергетика. – 2025. – № 3. – С. 54-73.
9. Аракелян Э.К., Пашенко Ф.Ф., Андрушин А.В., Сабанин В. Р., Косой А.А., Кудинов И.Ю. Методические положения оптимального управления процессом нагружения энергоблоков ТЭС после прохождения ночного провала графика электропотребления. Датчики и системы, №12, 2019.

УДК 681.51

<sup>1</sup>Безуглов Е.А.

<sup>1</sup>Bezuglov E.A.

#### Модификация эволюционного алгоритма Optim-MGA с использованием параллельных вычислений для задач управления

#### Modification of the Optim-MGA Evolutionary Algorithm Using Parallel Computing for Control Problems

**Аннотация.** Представлен алгоритм SimplexEvolution, разработанный для повышения эффективности решения многоэкстремальных задач параметрической оптимизации систем управления в условиях имитационного моделирования. Алгоритм является модернизацией метода Optim-MGA и сочетает поиск по деформируемому многограннику Нелдера-Мида с эволюционным подходом. В условиях развития многоядерных процессорных систем предложено параллельное выполнение алгоритма Optim-MGA в нескольких потоках под управлением супервизорного потока, что позволяет повысить скорость и точность нахождения глобального экстремума.

---

<sup>1</sup> Национальный исследовательский университет «МЭИ», Россия, Москва.  
National Research University «MPEI», Russia, Moscow

**Ключевые слова:** многоэкстремальная оптимизация, метод Нелдера-Мида, эволюционные алгоритмы, параллельные вычисления, SimplexEvolution.

**Annotation.** The SimplexEvolution algorithm is presented, developed to enhance the efficiency of solving multi-extremal problems of parametric optimization for control systems under simulation conditions. The algorithm is a modernization of the Optim-MGA method and combines the Nelder-Mead deformable polyhedron search with an evolutionary approach. In the context of developing multi-core processor systems, parallel execution of the Optim-MGA algorithm in multiple threads under the control of a supervisory thread is proposed, which allows increasing the speed and accuracy of finding the global extremum.

**Keywords:** multi-extremal optimization, Nelder-Mead method, evolutionary algorithms, parallel computing, SimplexEvolution.

**Введение.** В последнее время для синтеза и анализа систем управления активно применяются методы имитационного моделирования, которые предъявляют качественно новые требования к решению задач параметрической оптимизации. Для простых одноконтурных систем автоматического регулирования задачи оптимизации являются одноэкстремальными. Для сложных многоконтурных систем регулирования характерно наличие нескольких локальных экстремумов наряду с глобальным. Для решения одноэкстремальных задач хорошо зарекомендовал себя алгоритм Нелдера-Мида. Для решения многоэкстремальных задач предлагается модификация алгоритма Нелдера-Мида, сочетающая поиск по деформируемому многограннику, эволюционный поиск и параллельные вычисления.

#### Постановка задачи

Основной задачей является разработка эволюционного алгоритма многоэкстремальной многопараметрической оптимизации. Предложенный алгоритм будет решать одну из ключевых проблем эволюционных алгоритмов – скорость нахождения экстремума. В условиях развития многоядерных процессорных систем предложено параллельное выполнение алгоритма Optim-MGA в нескольких потоках, что позволяет повысить скорость и точность нахождения глобального экстремума.

#### Симплексный метод оптимизации Спендли, Хекста и Химсворта

Метод Нелдера-Мида является модификацией симплекс-метода, представленного в 1962 году Спендли, Хекстом и Химсвордом [1]. Идея метода состоит в перемещении симплекса в направлении оптимальной точки с помощью итерационной процедуры (рис. 1). Симплексом называют фигуру, образованную  $n+1$  точками (вершинами) в  $n$ -мерном пространстве. В одномерном пространстве симплекс есть отрезок прямой, в двумерном пространстве - треугольник; в трехмерном пространстве - треугольная пирамида (тетраэдр) и т. д. Процедура поиска минимума происходит следующим образом: определяется значение функции цели в вершинах симплекса, осуществляется зеркальное отражение симплекса относительно точки с наибольшим значением и определяется значение функции в новой, отраженной точке. Процедура повторяется. Если отражение от всех вершин дает худший результат, происходит сжатие симплекса. Алгоритм завершается, когда расстояние между вершинами не станут меньше заданного малого значения.

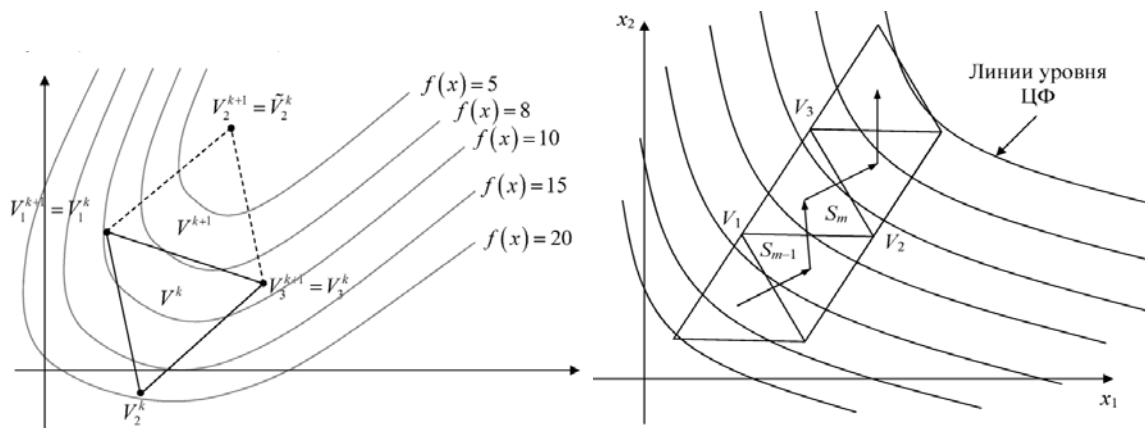


Рис. 1. Симплекс-метод

### Метод Нелдера-Мида (метод деформируемого многогранника)

В 1965 году Нелдер и Мид предложили модификацию симплекс метода [2], в которой допускают, что симплекс может быть неправильный. Помимо операции отражения и сжатия, ввели операции растяжения и сокращения (рис.2.а).

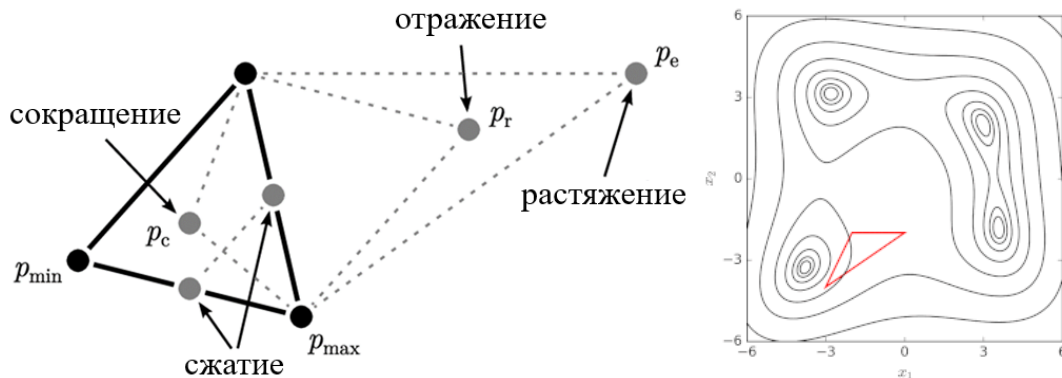


Рис. 2. а) Деформируемый многогранник, б) Локальный экстремум

Метод Нелдера и Мида не использует производной функции, поэтому применим к негладким и зашумленным функциям. Недостатком метода является то, что он находит локальный экстремум и чувствителен к выбору начального симплекса. Если нужен глобальный экстремум, то метод не применим (рис.2.б).

### Эволюционные алгоритмы оптимизации (Optim-MGA)

Одними из самых эффективных алгоритмов глобального поиска являются эволюционные алгоритмы, которые работают в парадигме Particle swarm optimization [3]. Она предполагает наличие популяции поисковых точек (особей), которые взаимодействуют между собой с целью перемещения популяции в область глобального экстремума. В 2004 г. на кафедре АСУТП МЭИ разработан алгоритм многоэкстремальной оптимизации Optim-MGA [3], суть которого состоит в следующем (рис.3.а). В пространстве поиска случайным образом размещается популяция поисковых точек, для каждой из которых определяется значение функции цели. На каждом этапе эволюции из популяции удаляется  $\mu\%$  наихудших точек. Из оставшейся родительской группы точек выбирается случайным образом  $N+1$  точка, к которой применяется метод Нелдера-Мида. Полученный потомок будет лежать в локальном экстремуме и замещает одну из удаленных точек. Процедура повторяется до тех пор, пока удаленные точки не будут замещены новыми. На следующем этапе эволюции действия повторяются до тех пор, пока разброс значений функции для точек не станет меньше заданного малого значения.

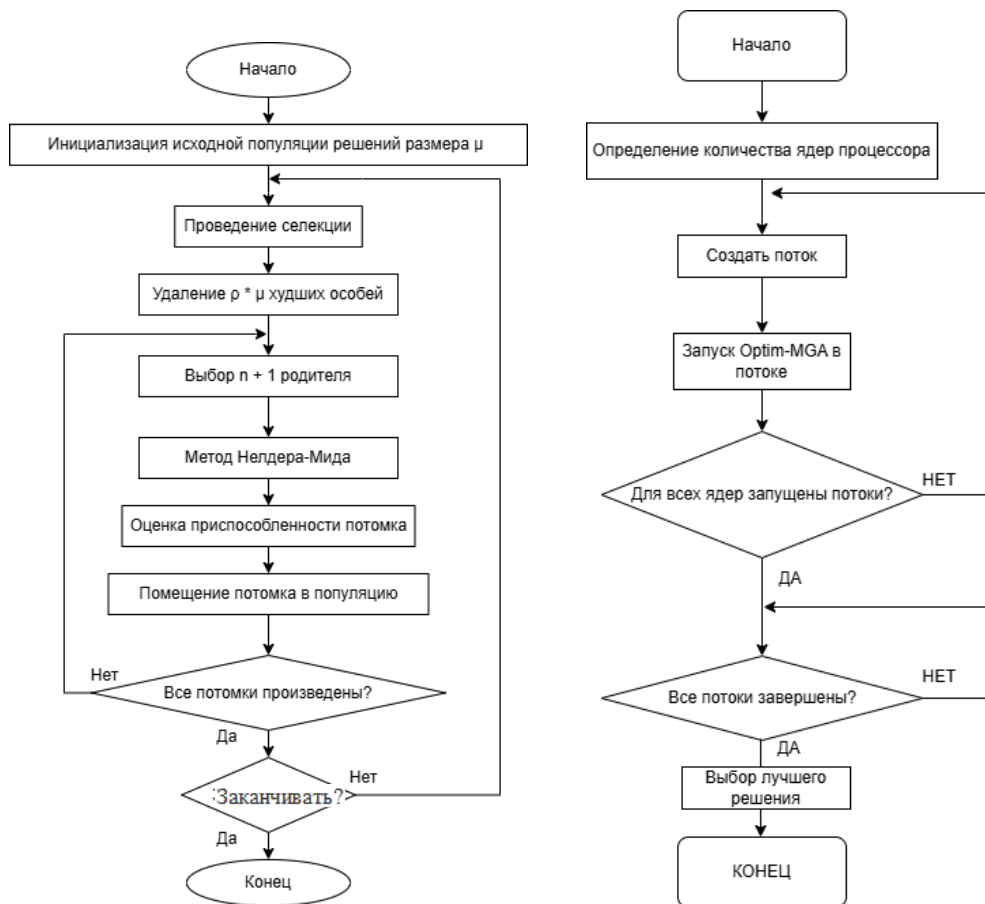


Рис. 3. а) Структура метода Optim-MGA, б) Структура метода SimplexEvolution

### SimplexEvolution

Метод Optim-MGA хорошо себя показал для решения многоэкстремальных задач. Однако, как и любой эволюционный алгоритм он является вероятностным. Для повышения скорости и точности нахождения глобального экстремума необходимо запускать алгоритм несколько раз и выбрать из найденных решений лучшее. Развитие многоядерных процессорных систем позволяет модернизировать алгоритм, создавая одновременно несколько потоков, в каждом запуская алгоритм Optim-MGA. Кроме того, нужен ещё один супервизорный поток, в котором необходимо наблюдать за эволюцией каждой популяции и по завершению расчета необходимо выбрать лучшее решение (рис.3.б). Потоки, в которых запускается алгоритм Optim-MGA, работают параллельно друг другу, и только супервизорный поток может отслеживать базовую информацию о потоке, но не может передавать её другим потокам. Предложенный алгоритм носит название SimplexEvolution [5], как совокупность двух слов: симплекс и эволюция. Выборка начальных поисковых точек определяется функцией «rand» по диапазону поиска. К примеру, возьмем функцию:

$$Sqr(x) = (\sin(\pi * x_0) + \sin(\pi * x_1)) * 0.2 + 0.01 * (0.4 * (x_0 - 5.5)^2 + 0.5 * (x_1 - 5.5)^2) + 0.4$$

Значение данной функции равно нулю при  $X_0 = 5.5$   $X_1 = 5.5$ . Для сравнения приведём примерную статистику после 2000 запусков алгоритмов. Запуская алгоритм Optim-MGA с 60 поисковыми точками, значение глобального экстремума определяется в среднем в 50 случаях из 100. Если взять размер популяции в 100 поисковых точек, глобальный экстремум в среднем определяется в 90 случаях из 100.

Алгоритм SimplexEvolution на четырёхядерном процессоре даёт следующий результат: 60 точек в одной популяции — частота нахождения глобального экстремума равна 90 из 100, в случае 70 поисковых точек стремится к 100 из 100. Высокий показатель нахождения глобального экстремума на четырёхядерном процессоре достигается тем, что каждое ядро запускает свои потоки расчёта параллельно друг другу. Это и даёт возрастание точности расчёта.

### Заключение

В рамках дальнейших исследований будет проведена работа по подбору параметров алгоритма таких как размер популяции, количество потоков, оптимизация и ускорение алгоритма, прерывание метода при достижении необходимой точности, применение в практической задаче по настройке искусственных нейронных сетей для задач автоматического регулирования. Предложенный алгоритм открывает новые возможности для решения сложных оптимизационных задач в условиях роста вычислительных мощностей и требований к точности. Его дальнейшее развитие может стать основой для создания универсальных инструментов многопараметрической оптимизации.

### Список литературы

- 1) Spendley W., Hext G.R. and Himsworth F.R. Sequential Application of Simplex Designs in Optimisation and Evolutionary Operation // *Technometrics*, Vol. 4, p.441.
- 2) Nelder J.A., Mead R.A. Simplex Method For Function Minimization // *Computer J.* – N.7.-1964. – P.308-313.
- 3) Сабанин В.Р., Смирнов Н.И., Репин А.И. Модифицированный генетический алгоритм для задач оптимизации и управления // *Exponenta Pro. Математика в приложениях*. 2004. №3-4.С.78-85.
- 4) Генетические алгоритмы, искусственные нейронные сети и проблемы виртуальной реальности / Г.К.Вороновский, К.В. Махотило, С.Н. Петрашев, С.А. Сергеев. // Харьков. ОСНОВА, 1997.-112 с..
- 5) Repin A., Nesterenko V., Merzlikina E. Multiparametric Multiextremal Optimization Algorithm Software Simplex Evolution for MATLAB and Simintech Libraries // 2021 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Сочи, стр. 893-896.

УДК 621

<sup>1</sup>Герасимов Н.Г.

<sup>1</sup>Gerasimov N.G.

### Система параметрической диагностики объектов энергетики на основе искусственного интеллекта

#### A parametric diagnostics system for energy facilities based on artificial intelligence

**Аннотация:** В статье рассматриваются аспекты применения аппарата искусственного интеллекта (ИИ) для решения задач параметрической диагностики технологических объектов управления на основе методов теории распознавания нечетких образов. Описывается применение нечетких продукционных систем типа FIS (fuzzy inference system) в качестве основы для системы параметрической диагностики. Формулируется принцип идентификации дефектов технологического оборудования по их параметрическому образу, выраженному совокупностью характерных отклонений технологических параметров. Обосновывается применение нечетких логических моделей для распознавания дефектов в условиях необходимости обработки большого объема входной информации, выраженной в слабо формализуемом виде. Описываются основные этапы и особенности синтеза систем параметрической диагностики технологического оборудования на базе алгоритмов нечетких продукционных систем FIS.

**Ключевые слова:** параметрическое диагностирование, искусственный интеллект, распознавание образов, энергетика.

**Abstract:** The article discusses aspects of the application of artificial intelligence (AI) to solve problems of parametric diagnostics of technological objects of control based on methods of the pattern

---

<sup>1</sup> Акционерное общество «Ордена Ленина Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники имени Н.А. Доллежалы» (АО «НИКИЭТ»), Москва, Россия

recognition theory. The application of fuzzy inference systems (FIS) as the basis for a parametric diagnostics system is described. The principle of identifying defects in technological equipment by their parametric image, expressed by a set of characteristic deviations of technological parameters, is formulated. The paper substantiates the use of fuzzy inference systems for defect recognition in conditions of the need to process a large amount of input information expressed in a weakly formalized form. The main stages and features of the synthesis of parametric diagnostic systems for technological equipment based on algorithms of fuzzy inference systems are described.

**Keywords:** parametric diagnostics, artificial intelligence, pattern recognition, power engineering.

### **Введение**

Повышение безопасности и надежности эксплуатации объектов энергетики является одним из главных приоритетов, функцию обеспечения которого осуществляют автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУТП). Наличие в технологическом оборудовании дефекта даже малого масштаба способно нанести серьезный ущерб и спровоцировать дальнейшее развитие аварии, при этом длительное время не обнаруживаясь системами автоматизированного контроля и оперативным персоналом. Развитие техники и технологий, направленное на совершенствование, в том числе АСУТП, ставит задачи поиска новых научно-технических методов в области решения проблем идентификации дефектов технологических объектов управления на ранних этапах их развития [1].

В условиях, когда информация о характере проявления дефектов в технологических объектах выражается в слабо формализуемом виде, а количество измерений основных контролируемых параметров объекта достигает больших значений, аппарат искусственного интеллекта (ИИ) может являться основой для разработки систем диагностики [2, 3]. Методы ИИ уже находят широкое применение в области разработки технических систем, систем управления и прогнозирования. Особое место среди методов, реализуемых аппаратом ИИ, занимает теория распознавания образов.

Любой дефект, возникающий в технологическом оборудовании, вносит характерные изменения в значения некоторых эксплуатационных параметров. При этом для каждого дефекта степень его влияния на параметры индивидуальна и сопровождается отличительным набором признаков, что и позволяет отнести задачу идентификации дефектов к классу задач теории распознавания образов.

В этой связи, актуальной проблемой является анализ и разработка новых методов идентификации скрытых дефектов технологических объектов управления, основанных на параметрической диагностике их состояния, методом распознавания образов дефекта, которые выражаются характерными изменениями значений эксплуатационных параметров.

**Применение нечетких систем FIS в задачах параметрической диагностики технологических объектов управления.** Поиск новых принципов диагностики скрытых дефектов технологического оборудования является, несомненно, актуальной задачей, поскольку преследует цели повышения безопасности, а также оптимизации работы АСУТП. В качестве основы для системы технической диагностики, применяющей методы искусственного интеллекта, авторами статьи предлагаются алгоритмы нечетких продукционных систем типа FIS (*fuzzy inference system*) [4]. Этот тип систем является хорошим инструментом для создания алгоритмов идентификации объектов и кластерного анализа методами теории распознавания образов [5]. Основу работы системы диагностики на базе FIS составляет выполнение логических процедур со значениями входных переменных системы и формирование выходного результата, в соответствии с базой экспертных знаний (БЗ), содержащей перечень правил нечетких продукций, на основе которых построены параметрические образы дефектов.

В рамках задачи идентификации дефектов технологических объектов управления параметрический образ дефекта выражается совокупностью его отличительных признаков, в роли которых выступают отклонения значений технологических параметров, скорость их изменения, тенденции, а также значения изменений параметров относительно друг друга. При этом количественное выражение дефекта может быть неизвестно, поскольку всегда известна функциональная зависимость между типом дефекта и характером изменений технологических параметров, которые он вызывает [6].

Параметрические образы дефектов содержатся в БЗ системы диагностики в виде нечетких продукционных правил (*associative rules*) типа «ЕСЛИ-ТО». Продукционные правила основаны на экспертных знаниях специалистов в данной предметной области и рождаются, как правило, из опыта эксплуатации технологического оборудования и данных его эксплуатационной статистики [7].

Общая архитектура системы параметрической диагностики дефектов (СПД) технологических объектов управления на основе нечеткой продукционной системы FIS приведен на рис. 1.

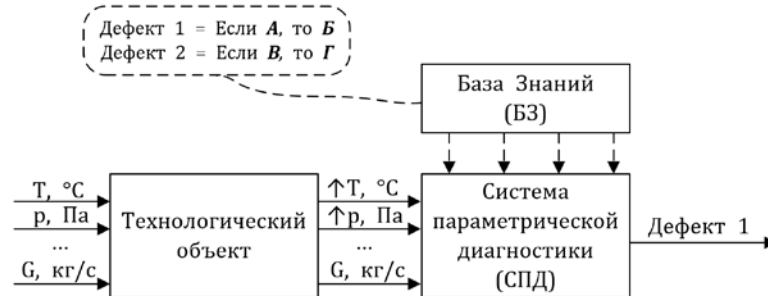


Рис. 1. Архитектура СПД технологических объектов управления на основе FIS

Работа системы параметрической диагностики основана на контроле значений входных переменных (технологических параметров), называемых далее значимыми параметрами, и сравнении вектора текущих значений отклонения значимых параметров от номинальных значений с параметрическим образом дефекта, заключенным в БЗ. В случае совпадения признаков дефекта, выраженных нечеткими продукционными правилами вида «Если-То», система формирует выходной результат, соответствующий определенному типу дефекта.

Очевидным преимуществом выполнения функций диагностики на основе нечетких продукционных систем типа FIS является возможность пренебречь внутренними законами развития дефекта, поскольку требуется установить только функциональную зависимость между входом (отклонениями параметров) и выходом системы (типом дефекта), тем самым значительно упрощая синтез и работу самой системы параметрической диагностики [8].

Алгоритм работы системы параметрической диагностики на основе FIS представляет собой выполнение следующих последовательных этапов:

1. прием входных переменных – сигналов от датчиков значимых технологических параметров;
2. вычисление отклонения значений значимых параметров от номинального значения;
3. фаззификация (приведение к нечеткости) полученных значений в соответствии с заданными функциями принадлежности;
4. выполнение логических процедур в соответствии с базой нечетких продукционных правил;
5. формирование выходного четкого результата на основе алгоритма нечеткого логического вывода;
6. вывод результата работы алгоритма.

Функциональная схема работы системы параметрической диагностики дефектов технологических объектов управления на основе FIS приведена на рис. 2:

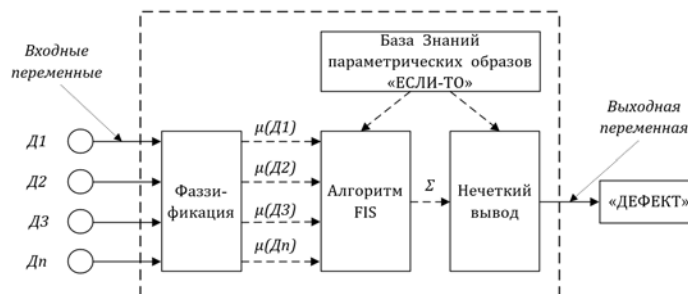


Рис. 2. Схема работы системы параметрической диагностики дефектов на основе FIS

**Этапы разработки алгоритма системы параметрической диагностики на основе FIS.** Основным этапом при разработке систем параметрической диагностики дефектов технологических объектов управления на основе нечетких продукционных систем и их последующей реализации в программных комплексах является формирование БЗ системы, содержащей параметрические образы дефектов в виде нечетких продукционных правил вида «Если-То». Главной сложностью синтеза БЗ при этом является этап получения и анализа экспертных данных, поскольку наличие полной и достоверной статистической информации на основе данных эксплуатации технологического объекта в инженерной практике является редкостью [9]. В этой связи авторами статьи в свое время рассматривались способы получения экспертных знаний о дефектах оборудования, основанные на анализе результатов моделирования переходных процессов, вызванных возникновением дефекта, с использованием расчетной математической модели объекта [6,8]. Результаты этих исследований показали применимость метода получения экспертных знаний о характере дефекта, а также возможность анализа всех интересующих аварийных состояний объекта посредством моделирования эксплуатационных характеристик объекта с использованием его математической модели.

Для формирования нечетких правил предлагаемой СПД, описывающих параметрические образы дефектов, используется составной тип правил, представляющих собой совокупность простых правил вида (4):

$$P_i \rightarrow \begin{cases} \text{ЕСЛИ } p_i \text{ есть } A_{i1}, \text{ ТО } B_i, \\ \text{ЕСЛИ } p_i \text{ есть } A_{i2}, \text{ ТО } B_i, \\ \dots \\ \text{ЕСЛИ } p_i \text{ есть } A_{ij}, \text{ ТО } B_i. \end{cases}, \quad i, j = \overline{1, n}, \quad (4)$$

где  $A_{ij}, B_{ij}$  – лингвистические термы, представляющие собой нечеткие терм-множества;  $p_i$  – лингвистическая переменная значимого параметра.

В задаче определения дефекта в технологическом оборудовании результат идентификации является четким значением. В связи с этим для системы параметрической диагностики применяется тип нечетких продукционных правил, в которых предпосылки (антецеденты) правил представлены в виде нечетких лингвистических высказываний, а заключения (консеквенты) в виде четких значений. Формирование четкого результата, характеризующего тип определенного дефекта в системе параметрической диагностики, осуществляется с помощью алгоритма нечеткого логического вывода, основанного на агрегировании подусловий и активизации подзаключений нечетких продукционных правил, а также аккумуляции заключений правил по формулам объединения нечетких множеств, соответствующих термам подзаключений и дефаззификации выходных переменных [10].

Таким образом, результатом работы системы параметрической диагностики дефектов на основе нечетких продукционных моделей типа FIS является формирование выходного значения, соответствующего признаку типа дефекта, определенного базой знаний. Признак дефекта может быть так же выражен в форме естественного языка, где четкому значению заключения соответствует значение лингвистической переменной «Тип дефекта».

**Заключение.** Стремительное развитие науки и техники, заключающееся в усложнении объектов управления и технических систем, рождает необходимость поиска методов совершенствования существующих систем контроля и управления на основе новых технологий и разработок.

В задачах диагностики дефектов технологических объектов управления в условиях, когда массив входных диагностических данных (контролируемых технологических параметров) имеет большую размерность, а физическая природа процессов, происходящих внутри объекта при реализации дефекта слабо формализована, аппарат искусственного интеллекта является перспективным инструментом для создания основы систем параметрической диагностики.

В свою очередь, поскольку работа системы параметрической диагностики построена на методе распознавания образов дефектов, выраженных экспертными знаниями и статистикой, использование нечетких продукционных систем типа FIS является обоснованным. Преимуществом выбора систем такого типа является отсутствие необходимости формализации знаний о внутренних законах развития дефекта для конкретного объекта, что в свою очередь позволяет масштабировать представленный подход на любой объект управления из области энергетики, машиностроения, химико-технологических процессов и др.

### Список литературы

1. Rahman M. On a learning system for industrial automation: Model-based control and diagnostics for decision support. – Malardalen University (Sweden), 2022.
2. Зубов Д. В., Лебедев Д. А. Диагностика отказов технологического оборудования химических производств с помощью искусственного интеллекта // Программные системы и вычислительные методы. – 2024. – №. 2. – С. 30-40.
3. Qi B., Liang J., Tong J. Fault diagnosis techniques for nuclear power plants: A review from the artificial intelligence perspective // Energies. – 2023. – Т. 16. – №. 4. – С. 1850.
4. Azeem M. F. (ed.). Fuzzy inference system: theory and applications. – BoD–Books on Demand, 2012.
5. Bhatnagar M., Yadav A. Fault detection and classification in transmission line using fuzzy inference system // 2020 5th IEEE International Conference on Recent Advances and Innovations in Engineering (ICRAIE). – IEEE, 2020. – С. 1-6.
6. Герасимов Н.Г., Проталинский О.М. Идентификация дефектов тепломеханического оборудования тепловых и атомных электростанций на базе ANFIS-сетей // Вестник МЭИ. 2025. № 3. С. 126—134. DOI: 10.24160/1993-6982-2025-3-126-134.
7. Гаврилова Т.А., Хорошевский В.Ф. Базы знаний интеллектуальных систем. – СПб.: Питер, 2001. – 384 с.: ил.
8. Герасимов Н.Г., Проталинский О.М. Техническая диагностика дефектов энергетического оборудования на основе ANFIS-сетей // Математические методы в технологиях и технике. 2024. № 6. С. 27-30.
9. Герасимов Н.Г., Муратов А.Г., Проталинский О.М., Янковский К.И. Параметрическое диагностирование парогенераторов РУ БРЕСТ ОД 300 с применением FIS-систем // Математические методы в технологиях и технике. 2025. № 4. С. 33-38.
10. Watkar V. B. Fuzzy Inference Systems: Types & Applications // Journal of Emerging Technologies and Innovative Research (JETIR). – 2022.

УДК 681.51, 371.693

*<sup>1</sup>Голубев А.В., Муравьев И.К., Пересыпкин И.А., Дубов И.Е.  
Golubev A.V., Muravev I.K., Peresyupkin I.A., Dubov I.E.*

### **Интерактивный компьютерный тренажер для подготовки оперативного персонала цехов ТАИ и АСУТП**

#### **Interactive computer simulator**

#### **For training operational personnel of thermal automation and measurement and automated process control systems shops**

**Аннотация:** Целью исследования является разработка интерактивного тренажера для подготовки оперативного персонала цехов ТАИ и АСУТП с виртуальным моделированием полевой зоны контрольно-измерительных приборов и автоматики (КИПиА). Разработанные модели устройств КИПиА позволяют проверить функционирование датчиков и исполнительных механизмов, при необходимости изменять их технологическое подсоединение к линиям питания, а также проводить их настройку, проверку исправности, контроль линий подключения к ПТК и другим приборам. Реализованный тренажер предоставляет персоналу КИПиА тепловых электрических станций эффективный инструмент для обучения, отработки навыков обслуживания, диагностики и ремонта измерительных приборов.

**Ключевые слова:** система обучения персонала, средства КИПиА, компьютерные тренажеры, операторский интерфейс, диагностика неисправностей.

---

<sup>1</sup> ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина», кафедра Систем управления.  
Ivanovo State Power Engineering University, Control Systems Department.

**Abstract:** The objective of the study is to develop an interactive simulator for training operational personnel in process control and automation shops, using virtual simulation of the field environment of instrumentation and automation (I&A). The developed I&A device models allow for testing the operation of sensors and actuators, adjusting their process connections to power lines, if necessary, as well as configuring them, checking their functionality, and monitoring their connections to the control system and other devices. The implemented simulator provides I&A personnel at thermal power plants with an effective tool for training and practicing their skills in the maintenance, diagnostics, and repair of measuring instruments.

**Keywords:** personnel training system, instrumentation and automation, computer simulators, operator interface, fault diagnostics.

### **Введение**

Использование специализированных компьютерных тренажеров [1-5] позволяет сотрудникам тепловых и атомных электростанций оттачивать умения действовать в нестандартных сценариях, возникающих из-за отклонений рабочих параметров оборудования в процессе его функционирования, которые могут повлечь за собой аварии. Точная и оперативная идентификация неполадок, а также выбор адекватных способов их устранения, напрямую связано с эффективностью проведения ремонтных операций и длительностью периодов простоя технических установок.

Актуальность исследования также обусловлена требованиями по обязательной подготовке оперативного персонала на тренажерах, содержащимися в [6, 7].

Целью исследования является разработка интерактивного тренажера для подготовки оперативного персонала цехов ТАИ и АСУТП с виртуальным моделированием полевой зоны КИПиА.

### **Методы исследования**

Интерактивная модель — это реалистичное цифровое отображение физического объекта, которое точно воспроизводит его внешний вид и динамику. В процессе разработки компьютерного тренажера спроектирован пользовательский интерфейс (рис.1), при этом задействованные мнемосхемы технологического оборудования соответствуют реальным мнемосхемам, используемым на операторских станциях в АСУТП энергоблоков тепловых электрических станций (ТЭС).

Структура моделей полевой зоны контрольно-измерительных приборов и автоматики состоит из двух частей: теплогидравлической и электротехнической [1, 8].

В теплогидравлической части модели моделируются неисправности связанные с повреждениями на импульсных линиях в случаях с датчиками давления, расхода или уровня, а также неисправность, связанная с некорректно установленным «нулем» (смещение нулевой точки). При этом в процессе устранения неисправности может возникнуть дополнительная неисправность, связанная с действиями Обучаемого. В частности, при неправильной последовательности действий с вентилями на импульсных линиях можно передавить мембрану (повредить чувствительный элемент) датчика расхода.

В электрической части модели заложены законы Ома и Кирхгофа для преобразования в электрический сигнал измеряемой физической величины. Модель представлена в виде системы алгебраических уравнений, описывающих компоненты электрической цепи.

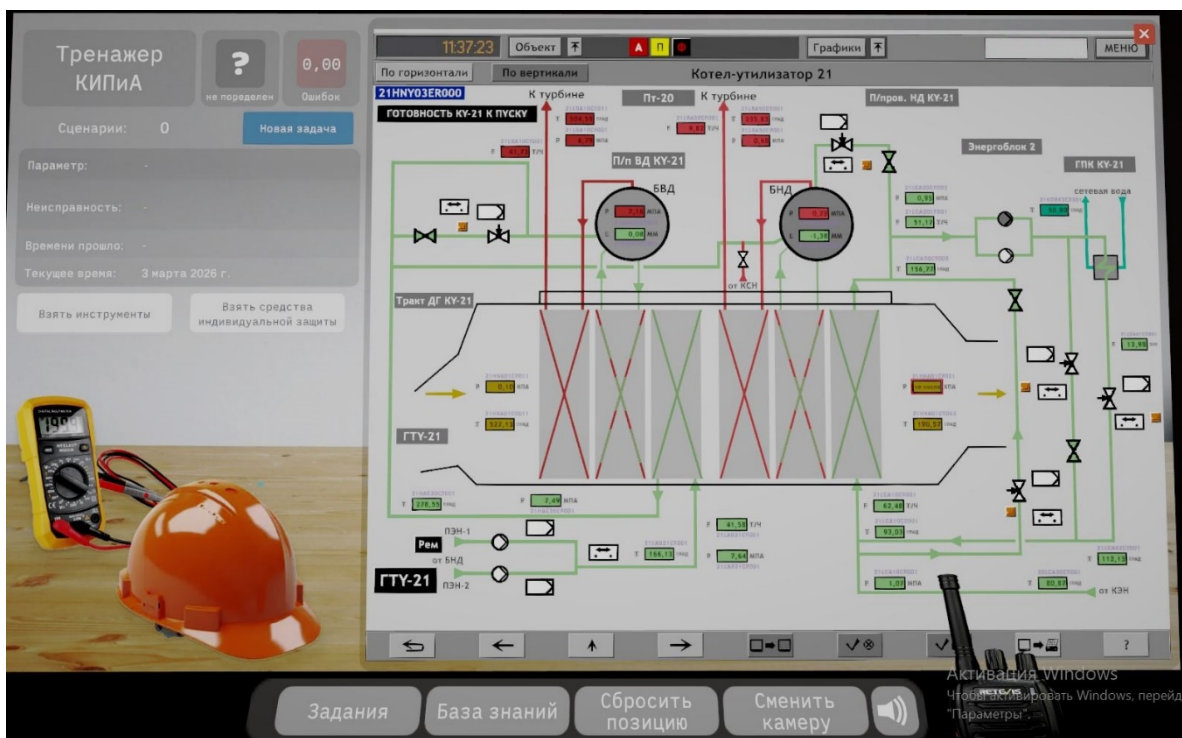


Рис. 1. Пользовательский интерфейс тренажера

Компьютерный тренажер АСУТП позволять проводить следующие виды профессиональной подготовки: обучение оперативного персонала цеха АСУТП по теории теплотехнических измерений, схемам измерения теплотехнических величин (температура, расход, давление, уровень), принципам построения, алгоритмам, типовым схемам и действию технологических защит и блокировок, типовым схемам управления электроприводом запорно-регулирующей арматуры, схемам организации питания КИПиА, АСУТП, архитектуре построения АСУТП на контроллерном и сетевом уровне, а также специальные, контрольные и противоаварийные тренировки.

### Основной результат

Функционирование тренажерного комплекса подразумевает его работу в режиме автоматического формирования комплектов заданий с запрограммированными дефектами на каждой из моделируемых локаций. Испытуемый должен обнаружить эти дефекты и отметить их в листе учета дефектов. В зависимости от правильности выбора испытуемым обнаруженных дефектов программа генерирует отчет о выполнении задания на тренажере с указанием проявившихся дефектов и отмеченных дефектов, а также начисленных за прохождение задания баллов.

Основным отличием созданной модели является комплектация не просто типовыми компонентами электроцепи, а специальными блоками, которые эмулируют различные повреждения. Конструкция позволяет симулировать такие неполадки, как нарушение целостности проводов (обрыв или короткое замыкание), замыкание между проводниками или на землю, а также перебои в работе источников питания. Кроме того, в модель интегрированы контрольно-измерительные устройства (рис. 2) — вольтметры, амперметры и омметры, — позволяющие детально исследовать электрические параметры в конкретных контрольных точках схемы.

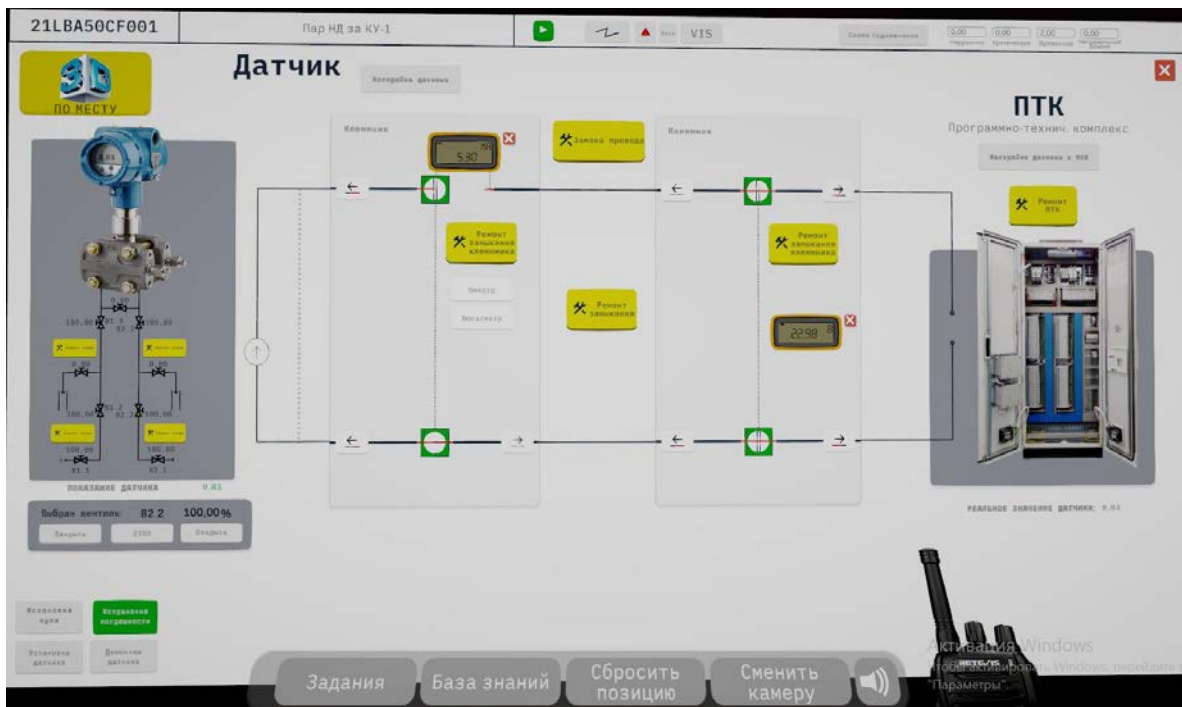


Рис. 2. Пример пользовательского интерфейса датчика расхода

Среди тренировочных ситуаций, которые реализованы на тренажере относят следующие неполадки оборудования: короткие замыкания; нарушение контакта соединения проводов; обрывы проводов; неисправности блока питания и реле и ряд других неисправностей [1, 8].

При работе тренажера Испытуемый имеет возможность по диагностике: приводов, силовых блоков КРУЗАП, управляющих и контрольных блоков ФРБУМ, а также модулей устройств связи с объектами в программно-техническом комплексе (ПТК) (рис.3); диагностики соответствующей части электрической схемы, например подключать/отсоединять вольтметры для измерения значений величины напряжений на линиях реле концевых выключателей, командных реле, питания ПТК привода или подключать/отсоединять омметры для измерения значений сопротивлений линий реле концевых выключателей. При выявлении неисправностей на соответствующих участках схемы доступны специальные кнопки выполнения ремонтов.

В комплекте с тренажером реализовано средство конфигурации сценариев обучения. Конфигуратор сценариев тренировок должен задавать последовательность тренировок. Также тренажер имеет настраиваемую систему оценки испытуемого при тренировке навыков обслуживания средств КИПиА и решении противоаварийных задач.

Тренажер создан на базе платформы для разработки мультимедийных приложений, интегрирующей инструменты виртуальной реальности. Данное решение позволяет разработать виртуальный прототип энергообъекта — цифровую копию, содержащую интерактивные модели энергооборудования, электрических сетей и контрольно-измерительных приборов. Разработка осуществляется с обеспечением совместимости с российскими операционными системами, включая «Astra Linux» и «Alt Linux».

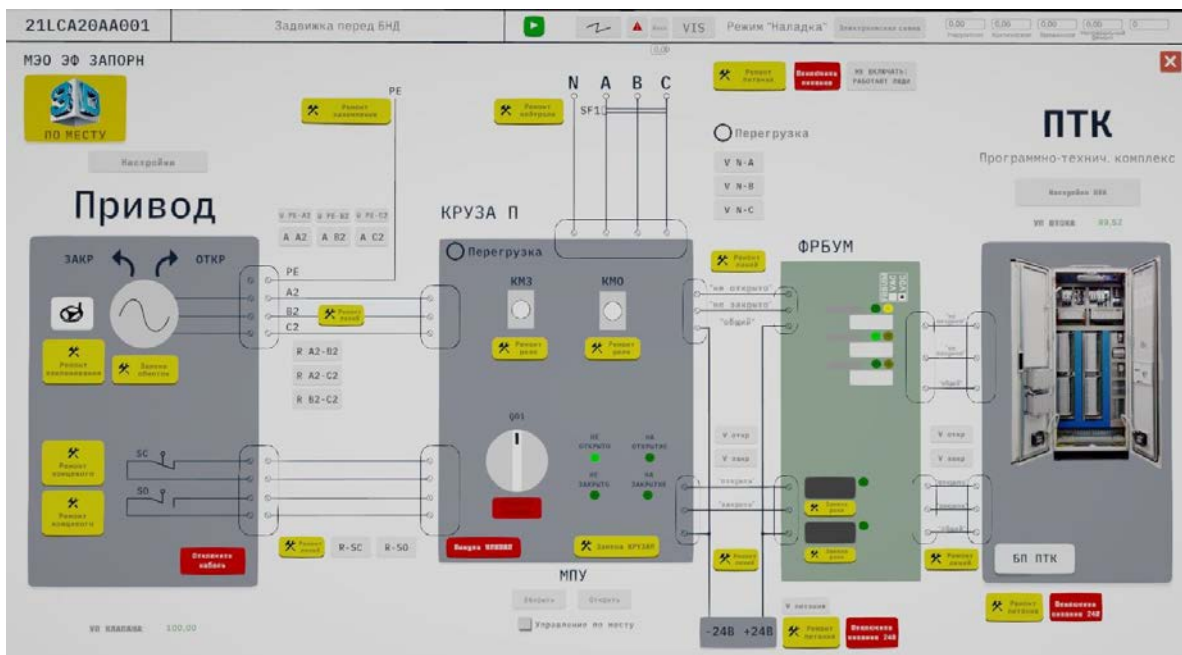


Рис. 3. Пример пользовательского интерфейса управления задвижкой

## Выводы

В рамках исследования разработаны цифровые двойники датчиков давления, расхода, уровня и температуры, включающие детализированные пользовательские интерфейсы.

Разработанные модели устройств КИПиА позволяют проверить функционирование датчиков и исполнительных механизмов, при необходимости изменять их технологическое подсоединение к линиям питания, а также проводить их настройку, проверку исправности, контроль линий подключения к ПТК и другим приборам.

Реализованный тренажер предоставляет персоналу КИПиА ТЭС эффективный инструмент для обучения, отработки навыков обслуживания, диагностики и ремонта измерительных приборов в реалистичных условиях.

## Список литературы

1. Разработка системы обучения персонала КИПиА и ее интеграция с компьютерным тренажером ТЭС / А.В. Голубев, И.К. Муравьев, А.Н. Никоноров, Ю.В. Наумов, А.С. Обуваев, Е.С. Целищев // Автоматизация в промышленности. 2023. №4. С. 3–11.
2. Технологии виртуальной реальности как один из эффективных инструментов обучения на предприятиях энергетики / И.В. Путилова, П.П. Ершевич, Е.В. Скрипкина, К.С. Никишов // Энергия единой сети. 2024. № 3-4(74). С. 46–55.
3. Volman M. Computer modeling and simulators as part of university training for NPP operating personnel // 2017 Journal of Physics: Conference Series. 2017. Vol. 781, No. 1. P. 012055. DOI:10.1088/1742-6596/781/1/012055.
4. Опыт разработки и внедрения VR-тренажеров для повышения квалификации и обучения сотрудников / С.А. Кадыров // Технологии дополненной и виртуальной реальности: I научн.-практ. конф.: сборник статей. Москва: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2025. С. 99–104.
5. Operator training simulators in virtual reality environment for process operators: a review / D.S. Patle, D. Manca, S. Nazir, S. Sharma // Virtual Reality. 2019. Vol. 23. P. 293–311.
6. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей российской федерации (в ред. Приказов Минэнерго РФ от 29.11.2024 N 2321, от 09.12.2024 N 2398).

7. Правила работы с персоналом в организациях электроэнергетики Российской Федерации (в ред. Приказов Минэнерго РФ от 30.11.2022 N 1271, от 09.12.2024 N 2398).
8. Совершенствование системы обучения персонала цеха контрольно-измерительных приборов и автоматики на компьютерном тренажере / А.В. Голубев, И.К. Муравьев, А.Н. Никоноров, Ю.В. Наумов, А.С. Обуаев // Вестник Московского энергетического университета. – 2024. № 3. С. 107–112.

УДК 681.51

<sup>1</sup>Гужов С.В.

<sup>1</sup>Guzhov S.V.

### Алгоритм интеллектуальной системы управления и прогнозирования теплопотреблением в условиях нестационарности и внешних возмущений

#### *Algorithm for intelligent control and forecasting of heat consumption under non-stationarity and external disturbances*

**Аннотация:** Развитие схем на основе программируемых логических контроллеров (ПЛК) требует совершенствования подходов по обработке накопленных данных. Актуальной является цель, состоящая в повышении эффективности управления и прогнозирования потреблением тепловой энергии системами теплоснабжения зданий, районов и городов. Разрабатываемые и используемые модели наиболее часто опираются на линейный многофакторный регрессионный анализ (МФРА), применение которого требует принятия множества допущений, и на искусственные нейронные сети (ИНС), обученных на статистической выборке конкретного объекта. Решение задачи повышения точности АСУ ТП в индивидуальном тепловом пункте (ИТП) невозможно без разработки и применения методологии, учитывающей как преимущества детерминированного подхода, так и метода экспертного анализа в сочетании с МФРА и ИНС. Показано, что применение разработанной методологии на примере уточнения настройки ПЛК в ИТП здания высшего учебного заведения позволяет достичь расчётный эффект 11,60% относительно базового теплопотребления объекта.

**Ключевые слова:** многофакторный регрессионный анализ, искусственная нейронная сеть, индивидуальный тепловой пункт, программируемый логический контроллер, прогнозирование, погрешность, потребление тепловой энергии.

**Abstract:** The development of programmable logic controller (PLC)-based systems requires improved approaches to processing accumulated data. A pressing goal is to improve the efficiency of managing and forecasting thermal energy consumption in heating systems for buildings, districts, and cities. Developed and used models most often rely on linear multivariate regression analysis (LMRA), which requires making numerous assumptions, and artificial neural networks (ANN) trained on a statistical sample of a specific facility. Improving the accuracy of automated process control systems (APCS) in individual heating substations (IHS) is impossible without developing and applying a methodology that takes into account both the advantages of a deterministic approach and expert analysis in combination with LMRA and ANN. It is shown that the application of the developed methodology, using the example of refining PLC settings in the IHS of a higher education institution, allows for a calculated efficiency of 11.60% relative to the facility's baseline heat consumption..

**Keywords:** Multivariate regression analysis, artificial neural network, individual heating unit, programmable logic controller, forecasting, error, thermal energy consumption.

#### Состояние вопроса по рассматриваемой проблеме

Для достижения поставленной цели ЦТС целесообразно представить, как система, описываемая одним из трёх классов математических моделей: агрегативно, основываясь на причинности во времени, считая систему неупреждающей [1]; экономико-математическими

---

<sup>1</sup> Национальный исследовательский университет «МЭИ», Россия, Москва.  
National Research University «MPEI», Russia, Moscow.

моделями, в частности на основании модели Неймана [2]; как сообщество технических изделий  $\sum w_{j,i}$ , на множестве  $W$  которых осуществлено разбиение на семейства  $W_k$  [3]. Детерминированные методы, применяемые к АСУ теплотехническим хозяйством ЦТС, обладают рядом недостатков [4]: невозможность получить полную информацию о статических теплотехнических характеристиках всех физических оставляющих объекта; необходимость в множестве детализированных мат. моделей составляющих теплового баланса объекта; неполнота и частичная некорректность значительной части исходных фактических данных; наличие множества режимов; чрезвычайная сложность моделей, созданных без применения способов декомпозиции процессов на квазиустановившиеся и переходные.

#### **Метод решения и допущения**

Совокупная математическая модель, сформированная на основании описанных выше принципов, неминуемо будет содержать как сложную для обработки нелинейную систему дифференциальных уравнений чрезвычайно большой размерности, так и логические условия большой разветвлённости, что в совокупности не позволяет получить единственное решение полученной системы уравнений. Система уравнений может не иметь решений в случае неполноты информации, что на практике встречается часто.

По причине подчинения рядов статистических данных негауссовым устойчивым распределениям с бесконечной дисперсией негауссовых распределений (приводящих к увеличению разброса средней величины, по сравнению с гауссовыми законами), математически неприменимыми становятся применение статистических методов, основанных на предположении нормальности закона распределения случайной величины [5]. Сглаживание временных рядов производится посредством оценки детерминированной компоненты, параметры которой в большинстве случаев легко интерпретируются.

На основе частично имеющихся данных об объекте предлагается использовать:

1. детализированные детерминированные модели (где позволяет полнота данных);
2. упрощённые детерминированные модели (при недостатке специфических данных);
3. метод экспертных оценок (для учёта качественных данных и экспертных знаний);
4. индексный подход на основании критериев надёжности, устойчивости, эффективности;
5. метод «идеализированных функций» для описания здания в идеальном его состоянии,

что позволяет устанавливать верхнюю и нижнюю границы коридора ожидаемых значений теплопотребления объекта.

Описание процесса функционирования ЦТС может рассматриваться как «чёрный ящик», т.к. сложно математически описать с достаточной точностью и достоверностью все процессы, происходящие в системе. Такого рода системы традиционно настраиваются на основе упрощённых моделей нейронных сетей, опирающихся на статистические данные о наблюдениях на действующем объекте. Применением упрощённых ИНС является в данном случае преимуществом.

Сформированный график идеализированного переходного процесса позволяет определить новые настройки ПИД регулятора посредством метода Циглера-Николса. Для компенсации ограниченности его эффективности в процессах с запаздыванием применяется подход, предложенный методом Козна-Куна [6].

#### **Анализ полученных результатов**

Результаты приведённой методологии повышения точности АСУ ТП в ЦТС посредством применения прогнозных функций энергопотребления показаны на примере двух одинаковых по функционалу учебных корпусов, относящихся к зданиям высшей школы. Тестовое здание обладает установленным ИТП, отапливаемый объём 57,6 тыс.м<sup>3</sup>, год постройки – 1936, модернизация с повышением класса энергоэффективности до уровня «В» проводилась в 2018г. Расход теплоносителя изменяется регулятором перепада давления и тремя параллельно работающими регуляторами на поддержание температуры.

Произведённые численные эксперименты на основании 675 уникальных типов конфигураций ИНС различались по признакам: число эпох обучения: 50, 100, 250, 350, 500 и 750 ед.; число слоев 2 либо 3; количество нейронов в каждом слое – в диапазоне от 2 до 256; функция активации: линейная, сигмоидальная, гиперболический тангенс; функция потерь MAE; MSE; RMSE. Наилучшие результаты прогнозирования приведены в табл. 1.

Таблица 1. Наименьшая величина ошибок для различных заданных функций потерь

Функция потерь	MAPE	MSE	MAE
Конфигурация	50 эпох, tanh, 3 слоя 256-256-256	100 эпох, tanh, 3 слоя 64-128-256	100 эпох, tanh, 3 слоя 256-64-256
Значение RMSE, %	24,1	20,5	19,2

На основании полученной прогнозной функции и сформулированных предварительно «идеализированных» функций выполняется формирование кривой разгона, описывающего объект (рис. 1).

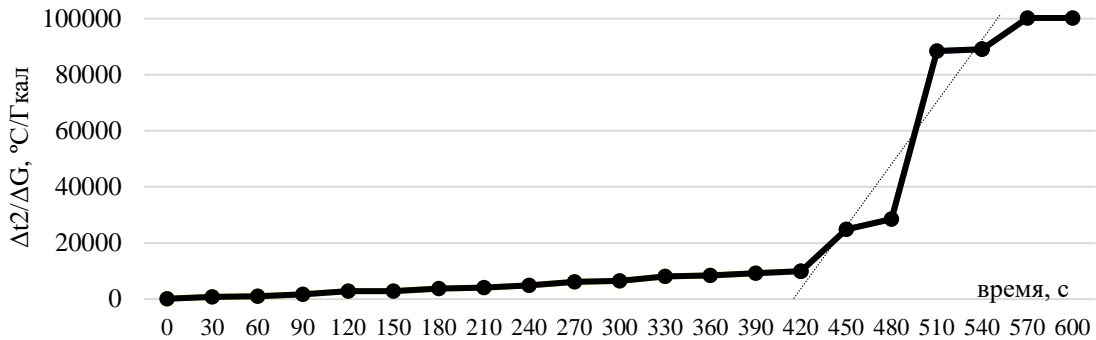


Рис. 1. Участок кривой разгона исследуемого объекта

По кривой разгона с учётом функции управляющего воздействия определяются параметры объекта: постоянная времени  $T=1800\text{с}$ , время запаздывания  $t=400\text{с}$ , коэффициент передачи объекта  $k=68,52$ . На основании передаточной функции объекта типа «А-звено с запаздыванием» и полученных параметров в программе Simulink формируется модель регулятора и расчётное построение графика переходного процесса.

В качестве наиболее показательного изменения режима системы отопления объекта при достаточно резком изменении метеорологических условий [7] принят часовой период 9 января 2023г. с наиболее быстрым изменением температуры наружного воздуха – на  $1^\circ\text{C}$  за 30 мин. С учётом тепловой инерции здания и доступной дискретизации климатических показателей, принят пятиминутный интервал расчёта (рис. 2).

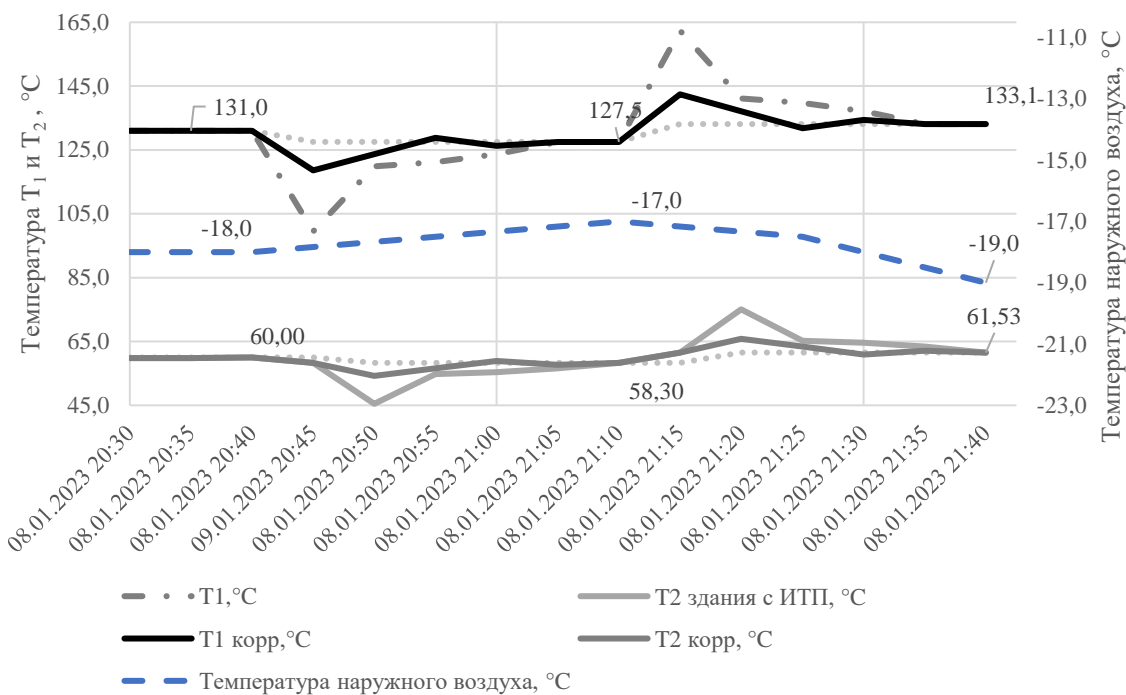


Рис. 2. Теплопотребление до и после оптимизации настроек ПИД регулятора:

$T_1$  и  $T_{1\text{ КОРР}}$  – температуры теплоносителя в прямом трубопроводе с существующими настройками регулятора и с улучшенными настройками регулятора соответственно, °C;  $T_2$  и  $T_{2\text{ КОРР}}$  – температуры теплоносителя в обратном трубопроводе с существующими настройками регулятора и с улучшенными настройками регулятора соответственно, °C

### Заключение

Разработанный алгоритм интеллектуальной системы управления и прогнозирования теплопотреблением в условиях нестационарности и внешних возмущений позволяет производить настройку систем управления в ЦТС в условиях неполноты и частичной некорректности исходных данных.

На основании данных об объекте и существующих настройках ПИД регулятора построены графики температур  $T_1$  в прямом и  $T_2$  в обратном трубопроводах. Использование «идеализированных» функций позволило определить наиболее эффективный график переходного процесса, доступный для здания с анализируемыми характеристиками (рис. 7, кривые  $T_{1\text{ КОРР}}$  и  $T_{2\text{ КОРР}}$ ).

Эффект от уточнения функции регулирования в рассматриваемый период составила 11,60%, что эквивалентно снижению отопительной нагрузки на 0,0579 Гкал относительно базового варианта.

### Список литературы

1. Калужский М.Л. Общая теория систем: Учебное пособие. – М.: Директ-Медиа, 2013. – 177 с. – ISBN 978-5-4458-2855-6
2. Абакумов А.И. Модели Неймана - Гейла. Владивосток: ДВГУ, 2004. 44 с.
3. Кудрин Б. И. Введение в технетику. 2-е изд., переработ. и доп. Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та, 1993
4. Гужов, С. В. Об объединении детерминированного и стохастического подходов при прогнозировании теплового баланса здания для занятий водными видами спорта / С. В. Гужов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2020. – Т. 22, № 1. – С. 103-112. – DOI 10.30724/1998-9903-2020-22-1-103-112. – EDN LXJYJVU.
5. Вержбицкий В.М. Численные методы (математический анализ и обыкновенные дифференциальные уравнения). – М.: Высш. шк., 2001. – 382 с.
6. Метод Коэна-Куна. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.dataforth.com/tuning-control-loops-for-fast-response.aspx> (дата обращения 01.04.2026).

7. Архив погоды в Шереметьево. [Электронный ресурс]. URL: [https://rp5.ru/Архив\\_погоды\\_в\\_Шереметьево,\\_им.\\_А.\\_С.\\_Пушкина\\_\(аэропорт\),\\_METAR\\_\(дата\\_обращения\\_01.04.2026\)](https://rp5.ru/Архив_погоды_в_Шереметьево,_им._А._С._Пушкина_(аэропорт),_METAR_(дата_обращения_01.04.2026)).

УДК 621.391.574.36

<sup>1</sup>Исмаил А., <sup>1</sup>Аракелян Э.К.

<sup>1</sup>Ismail A., <sup>1</sup>Arakelyan E.K.

**Разработка автоматизированной системы термического контроля  
и управления процессом сжигания композитного топлива  
в дизельном двигателе**

**Development of an Automated Thermal Control and Combustion Management  
System for Composite Fuel in a Diesel Engine**

**Аннотация:** В статье рассматривается разработка автоматизированной системы управления процессом сжигания композитного жидкого топлива в лабораторном стенде на базе одноклиндрового четырехтактного дизельного двигателя Kirloskar. Объектом автоматизации является экспериментальная платформа, предназначенная для исследования процессов горения капель нефтяного дизельного топлива и биодизеля, полученного из рапсового масла. В работе подробно описана структура контрольно-измерительной системы, включающая датчики давления, температуры, расхода, газоанализатор и программируемый логический контроллер (ПЛК). Представлена функциональная схема автоматизации с выделением 16 измерительных и управляющих каналов (1-16), соответствующих ГОСТ 21.208-2013. Определены основные задачи автоматического управления: поддержание материально-энергетического баланса двигателя, контроль пропорций смешивания топливных компонентов, обеспечение оптимального соотношения топливо-воздух и снижение энергетических затрат на нагрев и испарение топливных капель. Разработанная система обеспечивает сбор и обработку информации о технологических параметрах, отображение данных на рабочем месте оператора, а также формирование управляющих воздействий для исполнительных механизмов (топливного насоса и воздухоподувки). Внедрение предлагаемой АСУ позволяет повысить эффективность сжигания композитного топлива, улучшить динамические характеристики горения и снизить объем вредных выбросов (CO, CO<sub>2</sub>, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>).

**Ключевые слова:** автоматизация, дизельный двигатель, биодизель, АСУ ТП, программируемый логический контроллер (ПЛК), сжигание топлива.

**Abstract:** This article discusses the development of an automated control system for the combustion process of composite liquid fuel in a laboratory test bench based on a single-cylinder four-stroke Kirloskar diesel engine. The object of automation is an experimental platform designed to study the combustion processes of petroleum diesel and rapeseed oil-based biodiesel droplets. The paper describes in detail the structure of the instrumentation system, including pressure, temperature, flow sensors, a gas analyzer, and a programmable logic controller (PLC). A functional automation diagram is presented, highlighting 16 measurement and control channels (1-16) in accordance with GOST 21.208-2013. The main objectives of automatic control are defined: maintaining the engine's material and energy balance, controlling the mixing proportions of fuel components, ensuring an optimal air-fuel ratio, and reducing energy consumption for heating and evaporating fuel droplets. The developed system provides collection and processing of technological parameter information, data display at the operator's workstation, and the generation of control actions for actuators (fuel pump and air blower). The implementation of the proposed automated system improves the efficiency of composite fuel combustion, enhances the dynamic characteristics of burning, and reduces harmful emissions (CO, CO<sub>2</sub>, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>).

---

<sup>1</sup> Национальный исследовательский университет «МЭИ», Россия, Москва.  
National Research University «MPEI», Russia, Moscow

**Keywords:** automation, diesel engine, biodiesel, process control system (PCS), programmable logic controller (PLC), fuel combustion.

## **Введение**

Автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУ ТП) представляют собой **комплексные решения, предназначенные для управления** производственными процессами, в том числе протекающими с участием человека [1]. В условиях современной экономики автоматизация производства, являясь ключевым направлением научно-технического прогресса, позволяет существенно повысить эффективность работы оборудования и систем в целом [2,3]. Для решения задач автоматизации применяются сложные комплексы устройств, включающие средства теплового контроля, телемеханики, автоматического регулирования и защиты [2,3].

Особое значение автоматизация приобретает в двигателестроении, в частности, при организации рабочего процесса двигателей внутреннего сгорания. Задача ситуационного контроля работы дизельных двигателей сводится к поддержанию заданных значений физических величин (давления, температуры, состава продуктов сгорания), определяющих эффективность сжигания топлива [4]. Применение методов автоматического управления процессами воспламенения и сжигания капель как нефтяного дизельного топлива, так и биодизеля из рапсового масла, является перспективной технологией, позволяющей снизить расход топлива, улучшить динамику горения и уменьшить объем вредных выбросов [5].

Целью данной работы является разработка автоматизированной системы управления горением капель нефтяного дизельного топлива и биодизеля (на основе рапсового масла) в двигателе внутреннего сгорания. Разрабатываемая система должна обеспечивать автоматический контроль технических параметров процесса, а также предоставлять оператору возможность ручного управления и мониторинга.

## **Разработка системы автоматического управления сжиганием топлива**

Объектом автоматизации в данной работе является лабораторная платформа на базе дизельного двигателя внутреннего сгорания (ДВС), предназначенная для исследования процессов сжигания топлива. Схема экспериментального стенда представлена на рис. 1. Данный стенд разработан на основе существующего прототипа [6] и включает в себя одноцилиндровый четырехтактный дизельный двигатель марки Kirloskar с непосредственным впрыском топлива и воспламенением от сжатия.

Конструктивные особенности и принцип работы объекта. В отличие от бензиновых аналогов, дизельные двигатели не имеют свечей зажигания: воспламенение топливовоздушной смеси происходит за счет сжатия воздуха в цилиндре, при этом топливо подается непосредственно форсункой. Современные дизельные агрегаты, как правило, оснащаются турбонагнетателями с изменяемой геометрией для оптимизации наддува во всем диапазоне оборотов, что делает их более эффективными по сравнению с бензиновыми двигателями (более высокий крутящий момент на низких оборотах).

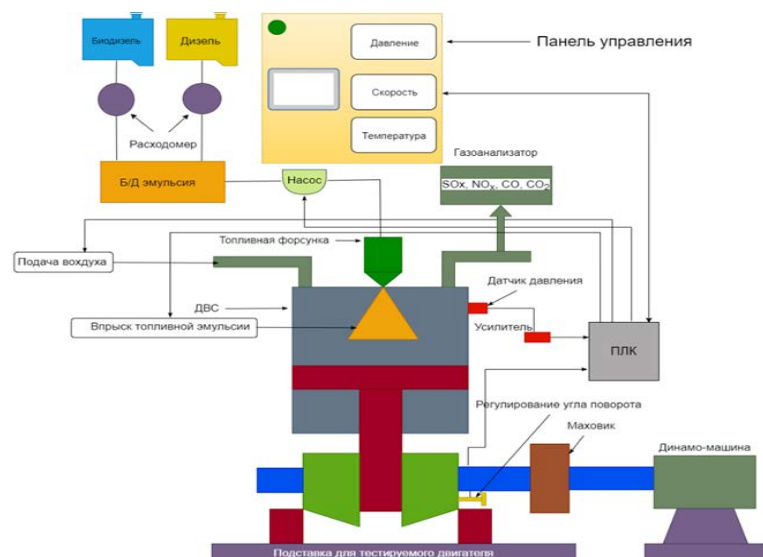


Рис. 1. Экспериментальный стенд на базе дизельного ДВС, предназначенный для исследования процессов сжигания жидкого топлива

### Описание технологического процесса.

Рабочий цикл лабораторного комплекса включает несколько этапов. На первом этапе в емкости заливаются дизельное топливо и биодизель. С помощью датчиков расхода и программируемого логического контроллера (ПЛК) определяются пропорции компонентов топливной смеси. Оператор задает эти пропорции для получения эмпирических значений на различных режимах работы. Далее компоненты смешиваются в ультразвуковой ванне; для стабилизации полученной эмульсии используются эмульгаторы, добавляемые в топливо или инертный компонент. Готовая смесь по топливным каналам через сопловое устройство подается в камеру сгорания ДВС.

После воспламенения продукты сгорания удаляются выхлопной системой, где газоанализатор измеряет концентрацию вредных выбросов.

### Контрольно-измерительная система.

Для управления процессом и сбора данных на стенде установлены следующие датчики:

- расход топлива - определяется расходомером.
- массовый расход воздуха - измеряется датчиком перепада давления, синхронизированным с электронным блоком управления.
- частота вращения коленчатого вала - фиксируется датчиком оборотов.
- температура в камере сгорания и других точках (выхлопные газы, смазка, система охлаждения) контролируется термопарами и датчиками температуры.
- давление впрыска и внутрицилиндровое давление измеряются датчиками давления, установленными непосредственно на двигателе.

Для повышения надежности системы предусмотрено взаимное резервирование датчиков.

Все сигналы от датчиков поступают в ПЛК, который обрабатывает информацию и отображает ход технологического процесса на рабочем месте оператора, обеспечивая возможность контроля и вмешательства.

### Задачи управления.

Основная задача автоматического управления лабораторным стендом сводится к поддержанию материально-энергетического баланса двигателя в установившихся и переходных режимах. Главное назначение ДВС в данном контексте — создание оптимальных условий для сжигания топливных капель при минимизации энергетических затрат на нагрев и испарение. Система управления, получая данные от датчиков расхода, на уровне ПЛК формирует

управляющие воздействия, поддерживая заданные оператором коэффициенты концентрации компонентов топлива. Контроль уровня топлива в баках предотвращает работу двигателя «всухую», а датчик массового расхода воздуха обеспечивает оптимальное соотношение в топливовоздушной смеси.

#### **Разработка функциональной схемы автоматизации процесса сжигания композитного топлива**

В этом разделе рассматривается автоматизированная система управления, использующая микропроцессорную технологию. В верхней части функциональной схемы показан конкретный технический объект, начальный переключатель для измерения технических параметров и запорная арматура. Между тем, в нижней части функциональной схемы показаны трансформаторы, расположенные на объекте, и компьютеры, расположенные в различных местах. Схема показана на рис. 2.

Основной технический документ, описывающий структуру и специфику автоматизированной системы управления, включая ее оборудование и средства автоматизации, известен как функциональная схема. Для функциональной схемы, разработанной для лабораторного стенда по двигателям внутреннего сгорания, необходимо решить следующие задачи:

- 1) Сбор исходной информации;
- 2) Сбор информации о состоянии оборудования;
- 3) Сбор информации о зарегистрированных параметрах и операциях;
- 4) Сбор информации о работе устройства.

На функциональной схеме устройства обычно изображаются в упрощенном виде.

Управляющие и запорные клапаны включаются только в том случае, если они необходимы для работы системы автоматизации и размещения первичного измерительного датчика. При создании функциональной схемы необходимо сначала определить каналы измерения (1-10, 12, 15) и каналы управления (11, 13, 14, 16).

- Канал 1 измеряет температуру двигателя.
- Канал 2 измеряет температуру в системе охлаждения и температуру масла в смазочном материале.
- Канал 3 измеряет температуру выхлопных газов.
- Канал 4 измеряет температуру в помещении.
- Канал 5 измеряет давление впрыска топлива и давление в двигателе внутреннего сгорания.
- Канал 6 измеряет расход топливной смеси.
- Канал 7 измеряет расход воздуха.
- Канал 8 предоставляет информацию об уровне топлива в баке.
- Канал 9 измеряет концентрацию вредных выбросов (углекислого газа, монооксида углерода, оксидов серы и азота) в выхлопной трубе двигателя внутреннего сгорания.
- Канал 10 регистрирует положение вала двигателя внутреннего сгорания.

Информация о контролируемых параметрах поступает в контроллер в виде равномерного сигнала тока мощностью 4-20 мА. Микропроцессорный блок управления формирует отдельный управляющий сигнал, который подается на пусковое устройство, где сигнал усиливается для запуска электродвигателя исполнительного механизма. Каналы 12 и 15 передают информацию о работе заслонок в микропроцессорный контроллер. Каналы 13 и 14 используются для управления топливным насосом и воздухоподкачкой.

Эта часть схемы иллюстрирует расположение приборов, пускателей и панели управления. На панели управления установлен ПЛК. Сигналы, получаемые блоком управления, также передаются на панель управления для инициирования управляющих воздействий и предотвращения аварийных ситуаций.

Технологическое оборудование представлено на функциональной схеме в соответствии с ГОСТ 21.403-80, обозначения запорной арматуры соответствуют ГОСТ 2.785-70, а элементарные и функциональные измерительные приборы соответствуют ГОСТ 21.208-2013.

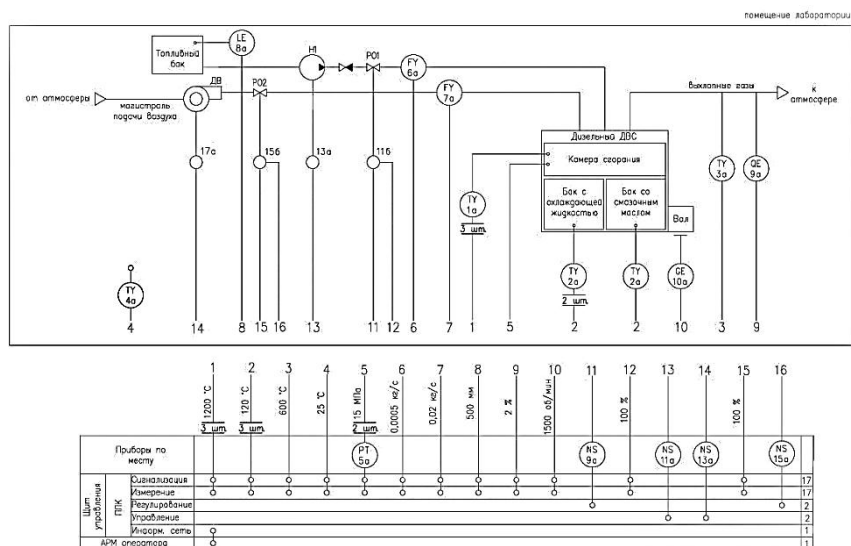


Рис. 2. Схема автоматизации АСУ процессом сжигания жидких топлив в ДВС

### Заключение.

В данной работе представлена разработка автоматизированной системы управления процессом сжигания композитного топлива (нефтяного дизеля и биодизеля из рапсового масла) в лабораторном стенде на базе одноцилиндрового четырехтактного дизельного двигателя Kirloskar.

В ходе исследования были решены следующие задачи:

- Выполнен анализ объекта автоматизации и определены контролируемые параметры.
- Разработана структура контрольно-измерительной системы с использованием современных датчиков давления, температуры, расхода и газоанализатора; составлена функциональная схема автоматизации согласно ГОСТ, включающая 16 каналов измерения и управления.

- Определены алгоритмы поддержания материально-энергетического баланса двигателя и оптимальных пропорций смешивания топливных компонентов.

- Разработанная система на базе программируемого логического контроллера обеспечивает сбор информации с унифицированным сигналом 4-20 мА, формирование управляющих воздействий на исполнительные механизмы и визуализацию параметров процесса для оператора.

Внедрение предлагаемой АСУ позволяет повысить эффективность сжигания композитного топлива, улучшить динамику горения и снизить вредные выбросы ( $CO$ ,  $CO_2$ ,  $SO_x$ ,  $NO_x$ ), что подтверждает перспективность использования биодизеля из рапсового масла в энергетических установках.

### Список литературы

1. Плетнев Г.П. Автоматическое управление и защита теплоэнергетических установок электростанций. – М.: Энергия, 1985. – 340 с.
2. Ключев А.С., Товарнов А.Г. Настройка систем автоматического регулирования котлоагрегатов. – М.: Энергия, 1970. -280 с.
3. Андык В.С. Автоматизация технологических процессов на ТЭС. Учебное пособие к практическим занятиям. - Томск: Изд. ТПУ, 1999-84 с.
4. Кац М.Д. Расчет системы автоматического регулирования температуры перегретого пара парогенератора. Методические указания по выполнению курсового проекта по дисциплине "Автоматизация технологических процессов на ТЭС" для студентов специальности 220301 "Автоматизация технологических процессов и производств". – Томск: Изд. ТПУ, 2006. – 38 с.

5. Исмаил Али, Аракелян Э.К. Экспериментальное определение характеристик воспламенения и горения дизельного и биодизельного топлив для электростанции на базе двигателя внутреннего сгорания // Вестник Московского энергетического института. — 2025. — № 4. — С. 146–155. — DOI: 10.24160/1993-6982-2025-4-146-155. — EDN: ERIARJ.
6. Kumar A.R.M., Kannan M., Nataraj G. A study on performance, emission and combustion characteristics of diesel engine powered by nano-emulsion of waste orange peel oil biodiesel // Renewable Energy. — 2020. — Vol. 146. — P. 1781–1795.

УДК 681.78

<sup>1</sup>Калашиников А.А., <sup>1</sup>Терентьев А.В.

<sup>1</sup>Kalashnikov A.A., <sup>1</sup>Terentyev A.V.

### Разработка конструкции измерительной ячейки недисперсионного инфракрасного газоанализатора

#### Development of the design of a measurement cell for a non-dispersive infrared gas analyzer

**Аннотация:** Целью исследования является разработка конструкции недисперсионной измерительной ячейки с изменяемой длиной оптического пути для проведения экспериментов и накопления данных, необходимых для создания газоаналитического оборудования. Задача работы заключается в теоретическом обосновании модульного исполнения оптического канала, позволяющего изучать влияние давления, расхода газовой среды и геометрических параметров, на поглощение средой инфракрасного излучения и метрологические показатели прибора. В результате выявлено, что фиксированная длина тракта ограничивает динамический диапазон и усложняет калибровку, тогда как разрабатываемая исследовательская ячейка с переменным путём обеспечит систематический сбор экспериментальных данных, валидацию физических моделей и формирование технической базы для разработки серийных анализаторов.

**Ключевые слова:** недисперсионная инфракрасная спектроскопия, переменный оптический тракт, модульная инфракрасная измерительная ячейка, газоаналитические системы, метрологическая верификация.

**Abstract:** Abstract. The aim of the study is to develop a design of a non-dispersive measuring cell with a variable optical path length for conducting experiments and accumulating data necessary to create gas analytical equipment. The objective of the work is to theoretically substantiate the modular design of the optical channel, which makes it possible to study the influence of pressure, gas flow rate and geometric parameters on the absorption of infrared radiation by the medium and the metrological parameters of the device. As a result, it was revealed that the fixed length of the path limits the dynamic range and complicates calibration, while the developed research cell with a variable path will ensure the systematic collection of experimental data, validation of physical models and the formation of a technical base for the development of serial analyzers.

**Keywords:** non-dispersive infrared spectroscopy, variable optical path, modular infrared measuring cell, gas analytical systems, metrological verification.

Метод недисперсионной инфракрасной спектроскопии активно применяется в энергетике и экологическом мониторинге для оперативного контроля газовых сред. Физическая основа метода опирается на селективное поглощение инфракрасного излучения молекулами газов, количественное описание которого формализуется законом Бугера–Ламберта–Бера. Данный закон устанавливает экспоненциальную зависимость интенсивности прошедшего потока излучения от спектрального коэффициента поглощения, концентрации целевого компонента

---

<sup>1</sup> Национальный исследовательский университет «МЭИ», Россия, Москва.  
National Research University «MPEI», Russia, Moscow

и геометрической длины оптического пути измерительного канала [2]. Как показал обзор технических описаний на серийные газоанализаторы, длина оптического пути в измерительной ячейке задана жёстко и не регулируется. Из практики эксплуатации следует: фиксированная геометрия ячейки делает прибор узкоспециализированным, смена диапазона измеряемых концентраций требует изменения длины канала, что в таких конструкциях невозможно.

С другой стороны, детальное изучение физических основ недисперсионной инфракрасной спектроскопии заставляет обратить внимание на то, как термодинамические и гидродинамические параметры газовой среды влияют на метрологические характеристики прибора. Давление газа напрямую меняет ширину спектральных линий поглощения из-за столкновительного уширения, а значит, изменяется и эффективный коэффициент поглощения, что требует введения поправок в расчётные модели [3]. Расход газовой смеси определяет, сколько времени газ находится в измерительном объёме, и напрямую сказывается на динамической погрешности; если поток становится турбулентным, погрешность так же увеличивается. При этом не существует экспериментальных установок, где можно было бы независимо менять длину оптического пути, давление и расход. Это серьёзно тормозит накопление данных, необходимых для построения математических моделей и разработки нового оборудования. Таким образом, создание ячейки с регулируемой длиной оптического пути необходимо для экспериментального определения оптимальной геометрии под конкретные концентрационные диапазоны и для построения эмпирических моделей, связывающих параметры канала с метрологическими характеристиками.

Необходимо спроектировать измерительную ячейку для недисперсионного газоанализатора с переменной длиной оптического пути, которая подойдёт для постановки экспериментов и позволит набрать массив данных, на которые потом можно будет опереться при выпуске серийных приборов. Чтобы достичь этой цели, необходимо внимательно разобрать закон Бугера–Ламберта–Бера применительно к реальным газовым средам, изучить, как длина оптического пути, давление и расход газа влияют на регистрируемую интенсивность инфракрасного излучения, а следовательно, и на метрологические характеристики газоанализатора [4], а также сформулировать техзадание на модульный исследовательский стенд. Решение этих задач обеспечит проведение воспроизводимых экспериментов с изменением как геометрических, так и термодинамических параметров, что в итоге позволит найти оптимальные конфигурации измерительного тракта.

В предлагаемой конструктивной схеме ячейки длина оптического пути изменяется ступенчато от 10 до 100 мм. Это достигается набором промежуточных секций (шириной 10 и 15 мм), которые нанизываются между узлами крепления излучателя и приёмника. Каждая секция представляет собой параллелепипед, внутри которого проходит полированный оптический канал для потока газа. Секции стягиваются резьбой, а уплотнение выполнено эластомерами. Такая компоновка выдерживает многократную разборку, не теряя герметичности, и позволяет оперативно менять конфигурацию ячейки.

При теоретической проработке и подготовке экспериментов введены следующие упрощения, необходимые для сопоставимости результатов. Спектральный коэффициент поглощения газа на рабочей длине волны принят неизменным во всей области исследуемых концентраций. Точность мехобработки при сборке секций гарантирует соосность оптических элементов с отклонением не более долей миллиметра, поэтому паразитные переотражения практически не сказываются ни на форме, ни на интенсивности светового пучка. Расход газовой смеси удерживается в ламинарной области, чтобы турбулентность в измерительном объёме была минимальной. Экспериментальная методика предполагает поочерёдную регистрацию сигнала детектора при варьировании длины пути, давления, расхода и концентрации, последующую статистическую обработку данных и построение многопараметрических зависимостей, пригодных для дальнейшего проектирования серийной аппаратуры.

Испытания на ячейке длиной 110 мм показали: при неизменной оптической длине максимальная чувствительность прибора наблюдается лишь в узкой концентрационной вилке; вы-

ход за её пределы ведёт к резкому падению чувствительности. Корень проблемы – экспоненциальный вид зависимости, на которой базируется метод недисперсионной ИК-спектроскопии. Нарастание длины пути усиливает поглощение, смещая максимум чувствительности в область низких концентраций и ослабляя влияние шумов на измеряемый сигнал. Укорочение пути, напротив, предотвращает насыщение детектора при низких концентрациях.

Разрабатываемая ячейка с переменной длиной оптического пути решает проблему нехватки экспериментальных данных, получаемых в контролируемых условиях. Модульный принцип позволяет быстро перенастраивать измерительный канал под новую задачу, избавляя от трудоёмкой пересборки оптического пути. Такое решение открывает дорогу систематическим исследованиям зависимости метрологических характеристик от геометрии тракта и отработке алгоритмов автоматической подстройки ИК-излучателя.

После изготовления предлагаемая ячейка превращается в стенд для измерений поглощения ИК-излучения в газовой среде при давлении 0,8–2,0 атм, расходе 0,2–10 нл/мин и длине оптического пути 10–100 мм. Модульная схема даёт свободный доступ к внутренним поверхностям канала, что упрощает очистку после работы с газами, содержащими твёрдые примеси или продукты неполного сгорания. Данные, которые предполагается получить в серии экспериментов, предназначены для построения эмпирических зависимостей, обоснования выбора излучателя и приёмника, а также для последующих работ по созданию серийных недисперсионных ИК-газоанализаторов с расширенным динамическим диапазоном и повышенной метрологической надёжностью [1].

В ходе экспериментального исследования установлено, что применение оптического тракта с фиксированной геометрией (110мм) приводит к сужению динамического диапазона недисперсионных инфракрасных газоанализаторов и сопровождается снижением точности измерений в условиях широкого варьирования концентраций анализируемых компонентов. В связи с этим обоснована необходимость разработки модульной измерительной ячейки, допускающей регулирование длины оптического пути, что позволяет гибко адаптировать параметры измерительного канала к конкретным задачам эксперимента. Предложенная концепция последовательного набора стандартных секций обеспечивает изменение длины канала в значительных пределах при сохранении герметичности и оптической соосности узлов, что выступает определяющим фактором для достижения воспроизводимости экспериментальных данных. В качестве приоритетных направлений дальнейшей работы выделены: детальная проработка конструкции механических соединительных элементов, экспериментальная оценка метрологических характеристик действующего макета, планомерное накопление данных о влиянии давления, длины ячейки и расхода газового потока на интенсивность инфракрасного излучения, а также создание методики управления интенсивностью инфракрасного излучателя. Реализация перечисленных мероприятий позволит сформировать надёжную экспериментальную и расчётную основу для газоаналитических систем.

### Список литературы

1. ГОСТ 32465-2013 «Топливо твердое минеральное. Определение серы с использованием ИК-спектрометрии» .
2. Hodgkinson J., Tatam R.P. "Optical gas sensing: a review" . Measurement Science and Technology, Vol. 24, No. 1, 2013.
3. Martin C.R. et al. "Evaluation and environmental correction of ambient CO<sub>2</sub> measurements from a low-cost NDIR sensor" . 2017.
4. Антонов А. С., Ишанин Г. Г. Экспериментальные исследования оптико-электронного газоанализатора диоксида азота // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Приборостроение. 2015. № 2. С. 3–7.

**Совершенствование системы управления электрофильтрами****Improvement of the control system for electrostatic precipitators**

**Аннотация:** В статье рассматриваются актуальные вопросы модернизации систем управления электрофильтрами, эксплуатируемых на объектах энергетики. На основе анализа классификации систем управления выявлены основные недостатки устаревших решений, а также ограниченные возможности диагностики. Предложен комплексный подход к усовершенствованию, включающий переход на микропроцессорные комплексные системы (АРК), расширение номенклатуры контролируемых параметров за счет установки современных датчиков температуры и уровня, а также внедрение алгоритмов управления по обратной связи путем установки датчиков контроля тока и напряжения на электродах. Особое внимание уделено повышению информативности систем для оперативного персонала и интеграции в АСУ ТП верхнего уровня.

**Ключевые слова:** система управления, электрофильтр, диагностика, визуализация.

**Abstract:** The article discusses the current issues of modernization of control systems for electrostatic precipitators operated at energy facilities. Based on the analysis of the classification of control systems, the main disadvantages of outdated solutions, as well as limited diagnostic capabilities, have been identified. A comprehensive approach to improvement is proposed, including the transition to microprocessor-based integrated systems (ARC), the expansion of the range of controlled parameters through the installation of modern temperature and level sensors, as well as the introduction of feedback control algorithms by installing current and voltage monitoring sensors on the electrodes. Special attention is paid to increasing the information content of the systems for operational personnel and integration into the upper-level automated process control systems.

**Keywords:** control system, electrostatic precipitator, diagnostics, visualization.

Электростатические фильтры (ЭФ) являются основным типом пылеулавливающего оборудования на тепловых электростанциях и предприятиях многих отраслей промышленности. Эффективность их работы напрямую определяет соблюдение природоохранных норм и технико-экономические показатели производства [1]. В условиях ужесточения требований к предельно допустимым выбросам (ПДВ)) задача обеспечения стабильной и высокоэффективной работы электрофильтров приобретает особую значимость [2,3].

Опыт эксплуатации показывает, что значительная часть проблем, приводящих к снижению степени очистки газов, связана не столько с износом механической части, сколько с несовершенством или недостаточной функциональностью систем управления. Целью данной работы является определение перспективных направлений модернизации систем управления ЭФ на основе современных средств автоматизации, контроля и диагностики.

**1. Анализ функциональной структуры систем управления электрофильтрами**

Согласно действующему ГОСТ 28904-91 по функциональному назначению системы управления подразделяются на несколько типов: система автоматического регулирования питанием (АРП), система автоматического регулирования встряхиванием (АРВ), система автоматического регулирования обогревом (АРО), а также комплексные системы (АРК), объединяющие функции перечисленных подсистем [4].

Анализ парка установленного оборудования на российских предприятиях показывает, что большинство электрофильтров оснащены системами АРП и АРВ. Системы АРО, как правило, присутствуют лишь частично (например, обогрев изоляторных коробок без контроля температуры бункеров). Ключевым недостатком существующей конфигурации является отсутствие тесного информационного взаимодействия между этими независимыми подсистемами.

---

<sup>1</sup> Национальный исследовательский университет «МЭИ», Россия, Москва.  
National Research University «MPEI», Russia, Moscow

мами. Параметры работы АРП (токи и напряжения на полях) не используются для оптимизации циклов АРВ, а данные от систем обогрева не интегрируются в общий алгоритм диагностики предотказных состояний.

Кроме того, подавляющее большинство эксплуатируемых систем являются аналоговыми. В соответствии с классификацией ГОСТ 28904-91, аналоговые системы (А) значительно уступают микропроцессорным (М) по количеству каналов управления, возможности обратных связей и гибкости настройки алгоритмов [4, 5]. Это ограничивает возможность внедрения современных методов диагностики и делает систему «не прозрачной» для оператора, который не получает достаточной информации о процессах, протекающих внутри фильтра.

## **2. Расширение системы контрольно-измерительных приборов и датчиков**

Для перехода от разрозненных аналоговых систем к комплексной микропроцессорной системе управления (АРК) необходимо в первую очередь расширить номенклатуру контролируемых параметров. Ограниченный набор датчиков, характерный для старых систем, не позволяет организовать полноценную диагностику и управление по обратной связи.

Ключевыми направлениями оснащения электрофильтра современными средствами контроля являются:

роль теплового состояния: Установка датчиков температуры (термометров сопротивления) в изоляторных коробках критически важна для предотвращения выпадения конденсата и перекрытия изоляторов. Контроль температуры стенок бункеров и газов на входе/выходе секций позволяет не только управлять ТЭНами, но и диагностировать подсосы воздуха через обшивку или зависание золы.

Контроль уровня золы в бункерах: Для надежного контроля уровня уловленной пыли целесообразно применять современные средства непрерывного измерения. Радарные (микроволновые) уровнемеры, особенно с высокой частотой (80 ГГц), являются наилучшим выбором для работы в условиях сильной запыленности, так как взвешенная пыль практически не влияет на точность измерения [6]. В качестве альтернативного или дублирующего средства могут использоваться лотовые (грузовые) или емкостные уровнемеры.

Контроль механизмов встряхивания и пылеобрушения: Необходим контроль наличия сигнала с датчиков работы приводов встряхивателей электродов и вибраторов бункеров. Это позволяет не только констатировать факт включения механизма, но и косвенно судить о его исправности.

## **3. Совершенствование алгоритмов управления**

Наличие расширенной информационной базы позволяет перейти к более совершенным алгоритмам управления, в частности, к управлению по технологическому параметру с обратной связью.

Наиболее показательным примером является оптимизация режима встряхивания коронирующих электродов. По мере осаждения пыли на электродах их эффективный радиус увеличивается, что при стабилизированном напряжении приводит к снижению тока короны. Современный регулятор, реализованный на микропроцессорной элементной базе, способен непрерывно сравнивать текущее значение тока ( $I$ ) с эталонным ( $I_{эт}$ ), зафиксированным после предыдущего эффективного встряхивания [7]. Когда разность  $\Delta I = I_{эт} - I$  превышает заданную уставку, формируется команда на запуск цикла встряхивания. Такой подход позволяет адаптировать частоту встряхивания к реальной запыленности газов и свойствам золы, сводя к минимуму как вторичный унос (из-за редкого встряхивания), так и излишний износ механической части и взмучивание газа (из-за слишком частого).

Аналогичные принципы могут применяться и для управления питанием. Современные микропроцессорные регуляторы питания обеспечивают поддержание максимально возможного рабочего напряжения, приближая его к пробивному, независимо от колебаний состава газа и слоя пыли. Они реализуют такие методы, как регулирование по заданному числу искровых разрядов, по максимальной мощности короны или с использованием алгоритмов детектора обратной короны для пыли с высоким удельным сопротивлением [7].

## **4. Интеграция в АСУ ТП и диагностика**

Ключевым преимуществом микропроцессорных систем является возможность их интеграции в общую автоматизированную систему управления технологическим процессом (АСУ ТП) предприятия. Информация от всех подсистем (питания, встряхивания, обогрева, уровня) по цифровым каналам связи (например, RS-485 с протоколом Modbus) должна передаваться

на верхний уровень — сервер и автоматизированные рабочие места (АРМ) операторов блочного щита управления (БЩУ) [8].

Визуализация технологических параметров на АРМ позволяет оператору в реальном времени наблюдать за состоянием каждого поля, каждого бункера и механизма. При выходе параметров за допустимые границы система должна не просто сигнализировать об общем нарушении, а выдавать сообщение с точной локализацией неисправности: «Отказ ТЭНа обогрева бункера №5 поля №2» или «Превышение верхнего уровня золы в бункере №1 секции А». Такой подход, основанный на применении современных программируемых логических контроллеров (ПЛК) и SCADA-систем, позволяет персоналу быстро локализовать проблему и перейти к ее устранению, минимизируя время простоя оборудования.

Как показано в ряде источников, эффективная система диагностики должна реализовывать двух- или трехуровневую структуру сбора и обработки информации [8, 9]. Нижний уровень (полевые датчики и исполнительные механизмы) передает данные на средний уровень — локальный контроллер или панель оператора, где осуществляется первичная обработка и отображение. Верхний уровень обеспечивает архивацию данных, отображение мнемосхем и формирование отчетов (рис. 1).

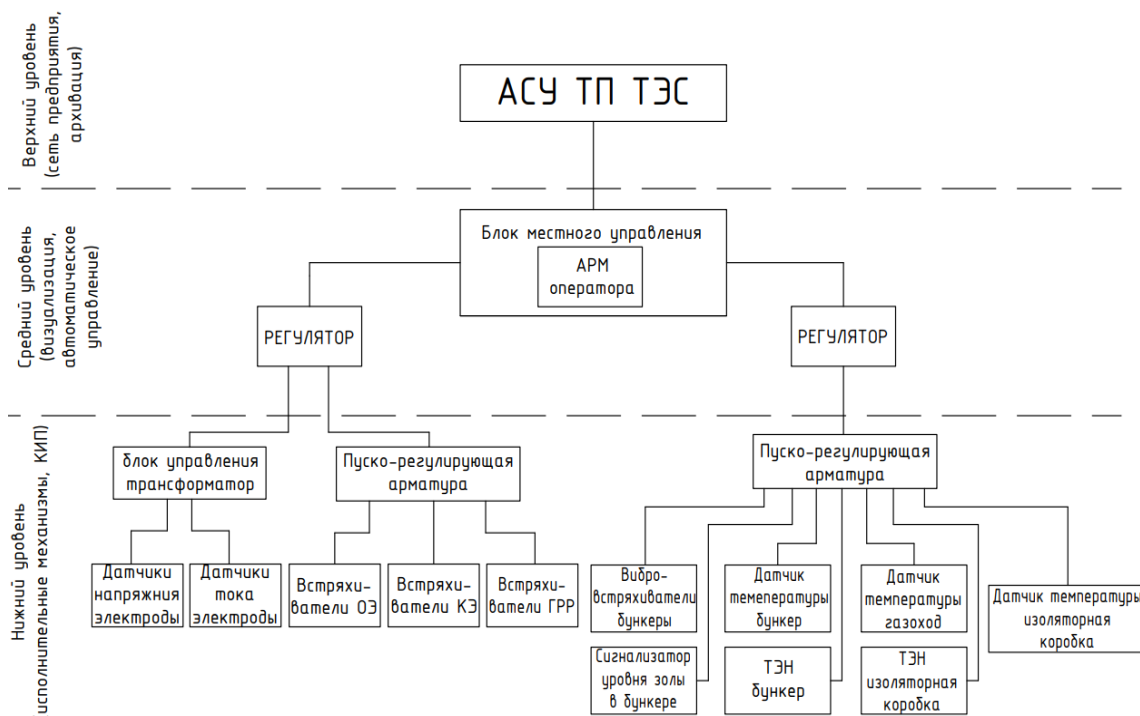


Рис. 1. Схема трехуровневой системы диагностики электрофильтра

АРМ – автоматизированное рабочее место; ОЭ – система осадительных электродов; КЭ – система коронирующих электродов; ГРП – газораспределительная решетка; ТЭН – тепло-электронагреватель

### Заключение

Проведенный анализ показывает, что существующий парк систем управления электрофильтрами, базирующийся на разрозненных аналоговых регуляторах (АРП, АРВ, АРО), обладает значительным потенциалом для модернизации.

Основными направлениями усовершенствования являются:

1. Переход к комплексным микропроцессорным системам управления (АРК), объединяющим в едином информационном пространстве управление питанием, встряхиванием и обогревом.

2. Расширение парка контрольно-измерительных приборов, в первую очередь за счет установки современных датчиков температуры изоляторных коробок и стенок бункеров, а также радарных уровнемеров для непрерывного контроля золы.

3. Внедрение алгоритмов управления по обратной связи, например, инициирование встряхивания по снижению тока короны, что позволяет оптимизировать режим работы в реальном времени.

4. Интеграция систем управления электрофильтрами в общую АСУ ТП предприятия с выводом детализированной информации на АРМ операторов для быстрой диагностики и локализации неисправностей.

Реализация данных мероприятий позволит не только повысить эффективность пылеулавливания и снизить выбросы, но и уменьшить эксплуатационные затраты за счет энергосбережения и увеличения межремонтного пробега оборудования.

#### Список литературы

1. Чекалов, Л. В. Электрофильтры в промышленной энергетике / Л. В. Чекалов. — М.: Энергоатомиздат, 2005. — 320 с.
2. **Постановление Правительства РФ от 09.12.2020 № 2055** (ред. от 20.10.2023) «О предельно допустимых выбросах, временно разрешенных выбросах, предельно допустимых нормативах вредных физических воздействий на атмосферный воздух и разрешениях на выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух» // Собрание законодательства РФ. — 2020. — № 51. — Ст. 8472.
3. **ИТС 22-2016**. Очистка выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферный воздух при производстве продукции (товаров), а также при проведении работ и оказании услуг на крупных предприятиях : информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. — М. : Бюро НДТ, 2016. — 351 с.
4. ГОСТ 28904-91. Системы управления электрофильтром. Общие технические требования и методы испытаний. — М.: Издательство стандартов, 1991. — 16 с.
5. РД 34.25.303-90. Методические указания по наладке и эксплуатации электрофильтров. — М.: ОРГРЭС, 1991. — 104 с.
6. Измерение уровня в высоких запыленных бункерах // Горно-обогатительное производство. Технический обзор. — Endress+Hauser, 2020. — С. 7.
7. Микропроцессорный регулятор управления агрегатов питания электрофильтров типа МЭФИС-03. Руководство по эксплуатации / ООО «Рамэнерги». — М., 2019. — 45 с.
8. **AlMadhoun, A. S. PLC SCADA for Beginners: Understanding and Implementing Industrial Automation Systems.** — Apress, 2025. — 475 p
9. Афанасьев, В. Н. Системы управления и диагностики электрофильтров / В. Н. Афанасьев // Автоматизация в промышленности. — 2022. — № 3. — С. 28–32.

УДК 621.438

<sup>1</sup>Орлов А.А., <sup>1</sup>Щербачков В.М., <sup>1</sup>Кенжалыев А.М.

<sup>1</sup>Orlov A.A., <sup>1</sup>Shcherbakov V.M., <sup>1</sup>Kenzhalyev A.M.

#### **Алгоритмизация процессов параметрического диагностирования в интеллектуальной автоматизированной системе управления газовых турбин большой мощности**

#### **Algorithmization of parametric diagnostics processes in an intelligent automatic control system for high-power gas turbines**

**Аннотация:** Целью работы является разработка алгоритма параметрического диагностирования газовых турбин большой мощности в составе интеллектуальной автоматизированной системы управления. Задача исследования состоит в формировании структурированной

---

<sup>1</sup> Национальный исследовательский университет «МЭИ», Россия, Москва.  
National Research University «MPEI», Russia, Moscow.

схемы обработки и логического согласования измерительной информации для повышения достоверности оценки технического состояния в реальном времени. В результате предложена модульная архитектура алгоритма, обеспечивающая комплексную обработку данных, формирование диагностических и прогностических признаков и выработку обоснованного диагностического решения.

**Ключевые слова:** газотурбинный двигатель; ГТД; интеллектуальная автоматизированная система управления; параметрическое диагностирование.

**Abstract:** The aim of the study is to develop an algorithm for parametric diagnostics of high-power gas turbines within an intelligent automated control system. The objective of the research is to design a structured scheme for processing and logical coordination of measurement data in order to improve the reliability of real-time technical condition assessment. As a result, a modular algorithm architecture is proposed, providing comprehensive data processing, the formation of diagnostic and prognostic features, and the generation of a justified diagnostic decision.

**Keywords:** gas turbine engine; GTE; intelligent automatic control system; parametric diagnostics.

### Введение.

Современные газотурбинные установки большой мощности являются сложными динамическими объектами управления, функционирующими в условиях интенсивных тепломеханических и газодинамических процессов. Повышение требований к надежности, энергоэффективности и экологической безопасности обуславливает необходимость перехода от традиционных методов контроля к интеллектуальным системам мониторинга и диагностики, способным функционировать в режиме реального времени [1].

### Структурная схема алгоритма параметрического диагностирования.

Алгоритм параметрического диагностирования реализуется в составе интеллектуальной автоматизированной системы управления [2] и встроен в её модульную архитектуру (рис. 1).

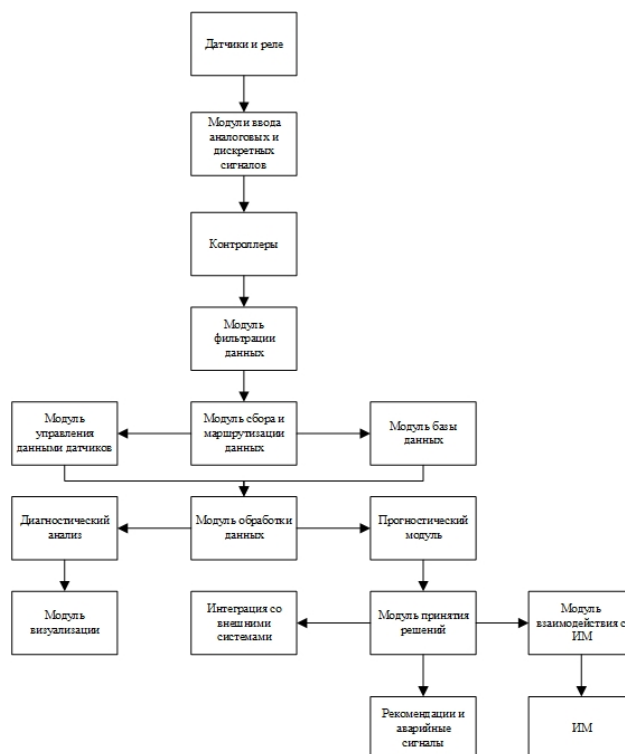


Рис. 1. Структурная схема алгоритма параметрического диагностирования

На вход системы поступают сигналы от датчиков и реле, которые через модули ввода и контроллеры преобразуются и передаются в вычислительную среду. Предварительная обработка включает фильтрацию и исключение некорректных значений измеряемых параметров.

Далее данные поступают в модуль сбора и маршрутизации, обеспечивающий их распределение между функциональными подсистемами и запись в базу данных. Основная алгоритмическая обработка выполняется в модуле обработки данных, где формируются диагностические признаки и оцениваются отклонения параметров от нормативных значений.

Результаты направляются в блоки диагностического и прогностического анализа, обеспечивающие выявление текущих отклонений и оценку динамики изменения технического состояния. Итоговая оценка формируется в модуле принятия решений, где вырабатываются рекомендации, аварийные сигналы или управляющие воздействия.

#### **Заключение.**

Разработанная структурная схема алгоритма параметрического диагностирования обеспечивает комплексную обработку измерительной информации и формирование обоснованного диагностического решения в составе интеллектуальной автоматизированной системы управления.

#### **Список литературы**

1. Орлов А.А., Крылова Е.В., Щербаков В.М., Будадин О.Н., Калашников Е.А. Интеллектуальная система автоматического управления технологическими режимами работы энергоемкого агрегата // Электротехническая сталь–2024: материалы конференции. М.: Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», 2024. С. 40.
2. Орлов А.А., Крылова Е.В., Щербаков В.М., Кенжалыев А.М., Авдеев А.Д. Цифровизация элементов объектов энергетической отрасли на примере лопатки газотурбинного двигателя // Инновационные перспективы Донбасса: материалы конференции. Донецк: Донецкий национальный технический университет, 2024. С. 154.

**УДК (519.233)**

<sup>123</sup>Орлов А.А., <sup>1</sup>Щербаков В.М., <sup>1</sup>Ксёнда Е.А.  
<sup>123</sup>Orlov A.A., <sup>1</sup>Shcherbakov V.M., <sup>1</sup>Ksenda E.A.

#### **Диагностика технического состояния газотурбинного двигателя на основе интеграции порогового контроля на программируемом логическом контроллере с прогнозной аналитикой искусственного интеллекта**

#### **Diagnostics of the technical condition of a gas turbine engine based on the integration of threshold control on a programmable logic controller with predictive analytics of artificial intelligence**

**Аннотация.** Целью работы является создание системы параметрической диагностики газотурбинного двигателя ГТД-110М, базирующейся на отечественном программируемом логическом контроллере ПЛК160 и методах искусственного интеллекта. В ходе исследования решались задачи разработки архитектуры сбора и первичной обработки данных на уровне контроллера, организации передачи информации на верхний уровень для углубленного анализа и формирования диагностических заключений. Предложенный подход обеспечивает непрерывный мониторинг отклонений рабочих параметров, раннее выявление дефектов и прогнозирование

---

<sup>1</sup> Национальный исследовательский университет «МЭИ», Россия, Москва.  
National Research University «MPEI», Russia, Moscow.

<sup>2</sup> Российская инженерная академия (РИА), г. Москва, Россия.  
Russian Academy of Engineering (RAE), Moscow, Russia.

<sup>3</sup> Акционерное Общество «Научно-Учебно-Производственно-Экологическое Предприятие «Карат», с. Старое Шаткино, Россия.  
Joint-stock company «Scientific, Educational, Industrial and Environmental Enterprise «Karat», Staroye Shatkin, Russia.

вание остаточного ресурса узлов. Полученные результаты подтверждают эффективность гибридной схемы, сочетающей быстрдействие ПЛК и интеллектуальные алгоритмы обработки данных, что позволяет перейти к обслуживанию оборудования по фактическому состоянию и снизить эксплуатационные затраты.

**Ключевые слова:** параметрическая диагностика; газотурбинный двигатель ГТД-110М; программируемый логический контроллер ПЛК160; искусственный интеллект; прогнозирование остаточного ресурса; автоматизация.

**Annotation.** The aim of the work is to create a parametric diagnostic system for the GTD-110M gas turbine engine based on the domestic PLK160 programmable logic controller and artificial intelligence methods. During the research, the tasks of developing an architecture for data collection and primary processing at the controller level, organizing the transfer of information to the upper level for in-depth analysis and the formation of diagnostic conclusions were solved. The proposed approach provides continuous monitoring of deviations in operating parameters, early detection of defects and prediction of the remaining resource of nodes. The results obtained confirm the effectiveness of the hybrid scheme, which combines PLC performance and intelligent data processing algorithms, which makes it possible to switch to equipment maintenance based on actual condition and reduce operating costs.

**Keywords:** parametric diagnostics; GTD-110M gas turbine engine; PLK160 programmable logic controller; artificial intelligence; residual resource forecasting; automation.

**Введение.** Параметрическое диагностирование газотурбинных установок представляет собой эффективный подход к контролю технического состояния, основанный на анализе отклонений рабочих параметров от номинальных значений [1]. Современные тенденции развития автоматизированных систем управления требуют применения отечественной элементной базы и интеллектуальных алгоритмов обработки данных для повышения надёжности и экономической эффективности [2]. Цель данной работы – разработка комплексной системы диагностики газотурбинного двигателя ГТД-110М на базе программируемого логического контроллера ПЛК160 (производство «ОВЕН») с интеграцией методов искусственного интеллекта для анализа отклонений измеряемых параметров и формирования рекомендаций по устранению неисправностей. Задачами исследования являются: выбор контролируемых параметров, разработка алгоритмов первичной обработки сигналов на ПЛК и организация передачи данных на верхний уровень для интеллектуальной диагностики.

**Параметрическое диагностирование технического состояния ГТД.** В качестве аппаратной платформы среднего уровня используется программируемый логический контроллер ПЛК160-24.А-М. Он обладает 14-разрядными АЦП, быстрыми дискретными входами и поддержкой интерфейсов Ethernet и RS-485, что обеспечивает связь контроллера с вышестоящим процессором, снабжённым интеграцией с искусственным интеллектом [2, 3]. Программирование контроллера осуществляется в среде CODESYS 2.3 на языке СFC; такая среда позволяет реализовать не только логику управления, но и диагностические алгоритмы [4]. На уровне ПЛК реализован пороговый контроль: вычисляются отклонения текущих значений от номиналов, и при превышении установленных границ (например,  $\Delta T > 20$  °С – требуется диагностика,  $\Delta T > 40$  °С – авария) формируются соответствующие сигналы.

ГТД-110М рассматривается как ММО-система (много входов – много выходов), где входными величинами служат расход топлива, частота оборотов и т.д., а выходными – отклонение контролируемых параметров. Информация о выходных параметрах и их отклонениях передается по протоколу Modbus TCP на автоматизированное рабочее место (АРМ) оператора (рис. 1.). На АРМ развернуты алгоритмы искусственного интеллекта, выполняющие глубокий анализ: корреляцию взаимосвязанных параметров, выявление паттернов неисправностей, идентификацию конкретного дефекта (например, загрязнение компрессора, износ подшипника) и прогнозирование остаточного ресурса. Подобные подходы к диагностике на основе машинного обучения показали высокую эффективность для газотурбинных установок [5-7].

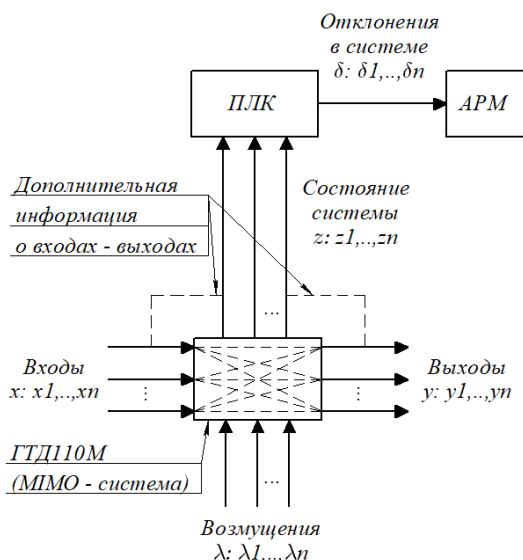


Рис. 1. ГТД-110М, как МИМО система параметрического диагностирования

В среде CODESYS разработана программа, реализующая пороговый контроль температуры газов перед турбиной (рис. 2). Измеренное значение температуры (Temp\_FT) сравнивается с уставками: нижняя граница диагностики – 1190 °С, верхняя – 1230 °С; нижняя граница технического обслуживания – 1170 °С, верхняя – 1250 °С. При выходе за пределы устанавливаются соответствующие флаги, а обобщённые сигналы передаются на визуализацию. Отклонение  $\Delta T = \text{Temp\_FT} - 1210$  вычисляется и записывается в переменную Delta\_FT. Переменная Ind\_AlarmW типа WORD формируется для передачи по сети на АРМ, где далее искусственный интеллект анализирует динамику отклонений. На рис. 3 показан пример диагностического сообщения, генерируемого ИИ: указывается вероятная причина («загрязнение проточной части компрессора»), рекомендации по обслуживанию и оценка остаточного ресурса. Такой подход позволяет оператору своевременно реагировать на возникающие проблемы и планировать ремонтные работы. Для оценки достоверности диагностики использовались синтетические временные ряды, имитирующие нормальную работу и развитие дефектов (засорение компрессора, повреждение подшипника). Метрики качества классификации (precision, recall, F1) рассчитывались на тестовой выборке; для класса «дефект подшипника» точность составила 0,93, полнота – 0,88, что подтверждает эффективность предложенного гибридного подхода. Аналогичные результаты получены при мониторинге подшипников в микротурбореактивных двигателях [7].

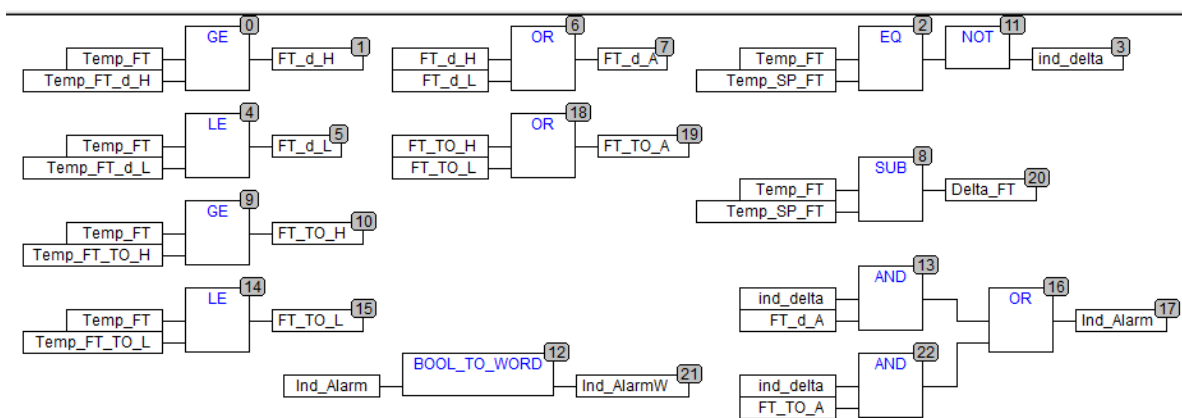


Рис. 2. Алгоритм для контроля температуры газов перед турбиной на языке CFC

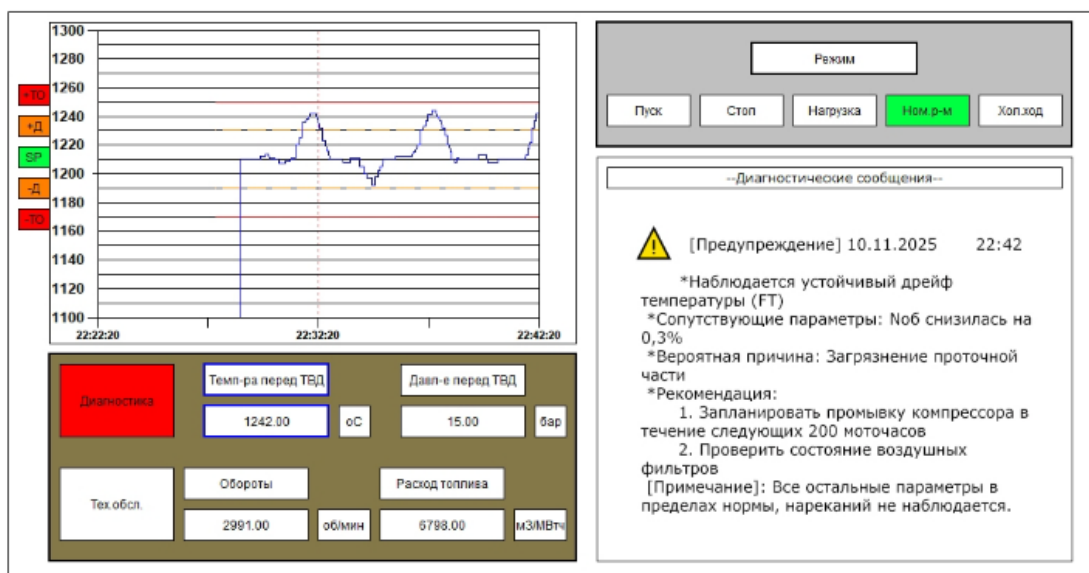


Рис. 3. Диагностическое сообщение для АРМ оператора

**Заключение.** Разработанная система параметрической диагностики ГТД-110М на базе ПЛК160 успешно сочетает функции быстрого порогового контроля и интеллектуального анализа на верхнем уровне. Применение отечественного контроллера «ОВЕН» отвечает задачам импортозамещения и цифровизации энергетики [2]. Использование среды программирования CODESYS позволяет гибко настраивать алгоритмы под конкретные требования [4]. Внедрение такой системы позволяет перейти от планово-предупредительных ремонтов к обслуживанию по фактическому состоянию, снижая эксплуатационные затраты и риск внезапных отказов. Дальнейшие исследования будут направлены на разработку самообучающихся алгоритмов, учитывающих индивидуальные особенности конкретного экземпляра ГТД, и на интеграцию методов неразрушающего контроля в единую информационную базу.

### Список литературы

1. Орлов А.А., Крылова Е.В., Щербаков В.М., Авдеев А.Д. Интеллектуальная система мониторинга и диагностики элементов газотурбинной установки // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2025. Т. 27, № 2. С. 211–221.
2. Лотфуллин Ф.И., Хамидуллин М.Р., Гареева Г.А. Создание программ для управления программируемыми логическими контроллерами с использованием универсальных инструментов разработки // International Journal of Advanced Studies. 2025. № 1. С. 112–120.
3. Камалов К.Ф., Соколов О.А. Автоматизированные системы управления и их роль в снижении воздействия человеческого фактора на безопасность полетов в гражданской авиации // Вестник науки. 2023. № 11 (68). С. 23–30.
4. Przynowa R., Majewski P., Ślęczek J., Grundas D., Wachłaczhenko M. Health monitoring of the shaft bearings in a micro turbojet based on vibration analysis // Journal of Physics: Conference Series. 2023. Vol. 2526, No. 1. P. 012070.
5. Саутнер Р.Н., Вилданов Р.Р. Программируемые логические устройства в системах энергоснабжения // Вестник науки. 2023. № 12 (69). С. 78–85.
6. Муганов И.С. Исследование: использование ПЛК в промышленности // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 12. С. 89–96.
7. Almujiyah H., Hamza M. A deep learning approach for fault diagnosis of hydrogen fueled micro gas turbines // Journal of Engineering Research. 2023. Vol. 15, No. 3. P. 123–135.

**Комбинированный автоматизированный интеллектуальный  
неразрушающий контроль и диагностика составных частей  
газотурбинных двигателей**

**Combined automated intelligent non-destructive testing and diagnostics of gas  
turbine engine components**

**Аннотация:** В работе рассматривается проблема повышения эффективности неразрушающего контроля и диагностики составных частей газотурбинных двигателей, обусловленная ограниченными возможностями применения отдельных методов контроля в условиях сложных эксплуатационных нагрузок. Отмечается, что существующие подходы, как правило, основаны на использовании изолированных методов неразрушающего контроля, что снижает полноту и достоверность диагностической информации. В этой связи особое внимание уделяется разработке комбинированного автоматизированного интеллектуального метода неразрушающего контроля, интегрирующего данные различных физических принципов, сенсорных систем и средств сбора информации.

**Ключевые слова:** газотурбинные двигатели, комбинированный неразрушающий контроль, автоматизированная диагностика, интеллектуальные методы, надежность.

**Abstract:** The paper addresses the problem of improving the efficiency of non-destructive testing and diagnostics of gas turbine engine components, which is limited by the use of individual testing methods under complex operating conditions. It is noted that existing approaches are typically based on the use of isolated non-destructive testing methods, which reduces the completeness and accuracy of diagnostic information. Therefore, the paper focuses on developing a combined automated intelligent non-destructive testing method that integrates data from various physical principles, sensor systems, and information collection tools.

**Keywords:** gas turbine engines, combined non-destructive testing, automated diagnostics, intelligent methods, reliability.

Составные части и элементы газотурбинных двигателей относятся к числу наиболее ответственных и наукоемких технических систем, эксплуатация которых осуществляется в условиях высоких температур, значительных механических нагрузок и циклических воздействий. Надёжность и безопасность их работы в значительной степени определяются техническим состоянием отдельных узлов и деталей, отказ которых может привести к тяжёлым последствиям. В связи с этим актуальной задачей является развитие методов неразрушающего контроля и диагностики, обеспечивающих своевременное выявление дефектов.

В настоящее время при диагностике составных частей и элементов газотурбинных двигателей применяются различные методы неразрушающего контроля, каждый из которых ориентирован на выявление определённых типов дефектов [1–3]. Однако использование отдельных методов не позволяет получить комплексную информацию о техническом состоянии объекта, особенно при наличии дефектов сложной природы. Это обуславливает необходимость разработки новых подходов, основанных на комбинировании нескольких методов контроля и автоматизации процессов диагностики.

**Анализ существующих методов неразрушающего контроля**

К числу наиболее распространённых методов неразрушающего контроля газотурбинных двигателей относятся ультразвуковой, вихретоковый, радиографический и тепловой контроль [4]. Ультразвуковой метод эффективен для выявления внутренних дефектов, однако его применение ограничено сложной геометрией деталей и зависимостью результатов от условий акустического контакта. Вихретоковый контроль отличается высокой чувствительностью к поверхностным дефектам, но имеет малую глубину зондирования. Радиографический метод

---

<sup>1</sup> Национальный исследовательский университет «МЭИ», Россия, Москва.  
National Research University «MPEI», Russia, Moscow.

обеспечивает визуализацию внутренней структуры материала, однако связан с высокими затратами и требованиями к радиационной безопасности. Тепловой контроль обеспечивает визуализацию тепловых полей.

Таким образом, каждый метод обладает как преимуществами, так и существенными ограничениями. В практике технической диагностики это приводит к разрозненному применению различных методов, что увеличивает трудоёмкость контроля и снижает достоверность оценки технического состояния.

#### **Комбинированный автоматизированный интеллектуальный подход**

В данной работе предлагается комбинированный автоматизированный интеллектуальный подход к неразрушающему контролю и диагностике составных частей газотурбинных двигателей тепловым и ультразвуковым методами. Его отличительной особенностью является интеграция нескольких методов неразрушающего контроля в рамках единой диагностической системы с последующей интеллектуальной обработкой получаемых данных.

Комбинирование методов позволяет компенсировать недостатки каждого из них за счёт взаимного дополнения диагностической информации. Применение ультразвукового контроля обеспечивает выявление как внутренних, так и поверхностных дефектов, а использование тепловых методов позволяет обнаруживать зоны локальных перегревов и скрытых повреждений. В отличие от традиционных подходов, основанных на последовательном применении отдельных методов, предлагаемый подход ориентирован на формирование целостной картины технического состояния объекта.

Автоматизация процессов сбора данных снижает влияние человеческого фактора и повышает воспроизводимость результатов контроля. Использование сенсорных систем и цифровых средств регистрации создаёт условия для накопления массивов диагностической информации, пригодных для интеллектуального анализа.

#### **Интеллектуальная обработка и преимущества подхода**

Интеллектуальная обработка диагностических данных осуществляется с применением алгоритмов машинного обучения и распознавания образов [5, 6]. Интеграция данных, полученных различными методами контроля, позволяет формировать многомерные диагностические признаки и выявлять скрытые закономерности, недоступные при использовании одиночных методов.

Ключевым преимуществом предлагаемого подхода является возможность ранней диагностики дефектов и прогнозирования остаточного ресурса деталей газотурбинных двигателей. Это создаёт предпосылки для перехода от регламентного обслуживания к обслуживанию по фактическому техническому состоянию, что повышает надёжность и экономическую эффективность эксплуатации.

#### **Заключение**

В работе показано, что традиционные методы неразрушающего контроля, применяемые разрозненно, не обеспечивают необходимой полноты и достоверности диагностической информации при контроле составных частей газотурбинных двигателей. Предложен комбинированный автоматизированный интеллектуальный подход, основанный на интеграции нескольких методов неразрушающего контроля и интеллектуальной обработке данных. Реализация данного подхода позволяет повысить эффективность диагностики, обеспечить раннее выявление дефектов и создать основу для прогнозирования технического состояния и остаточного ресурса элементов газотурбинных двигателей.

#### **Список литературы**

1. Ермолов И. Н. Неразрушающий контроль: методы и средства. М.: Машиностроение, 2010. 456 с.
2. Хренов А. К., Шаталов В. П. Техническая диагностика авиационных двигателей. М.: Транспорт, 2012. 320 с.
3. Клюев В. В. Неразрушающий контроль и диагностика. М.: Машиностроение, 2015. 672 с.

4. Бирюков В. В., Пахомов А. А. Применение методов неразрушающего контроля при диагностике газотурбинных двигателей // Контроль. Диагностика. 2018. № 6. С. 24–30.
5. Соловьёв А. Н., Иванов Д. С. Интеллектуальные методы обработки данных в системах технической диагностики // Вестник машиностроения. 2020. № 9. С. 45–51.
6. Орлов А.А., Крылова Е.В., Щербаков В.М., Будадин О.Н., Калашников Е.А. Интеллектуальная система автоматического управления технологическими режимами работы энергоёмкого агрегата // Электротехническая сталь–2024: материалы конференции. М.: Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», 2024. С. 40.

УДК 681.3, 681.518.5

<sup>1</sup>Орлов А.А.

<sup>1</sup>Orlov A.A.

**Развитие автоматизированных систем научных исследований  
для автоматизированного теплового неразрушающего контроля металлических  
объектов сложной формы и внутренней структуры  
с оценкой надежности их эксплуатации**

**Development of automated research systems for automated thermal  
non-destructive control of complex-shaped metal objects and their internal structure,  
with assessment of their operational reliability**

**Аннотация:** Металлические объекты сложной формы и внутренней структуры (изделия) – это элементы дорогостоящего, зачастую стратегически важного, ТСО. От качества изделий напрямую зависит надежность и безопасность функционирования ТСО. Дефекты изделий возникают как при их изготовлении, так и в процессе эксплуатации ТСО. Благодаря проведенным исследованиям дефекты изделий идентифицируются перед сборкой ТСО с помощью АСНИ для АТНК, и надежность и безопасность функционирования повышается благодаря не допуску бракованных изделий на сборку ТСО, что исключает из жизненного цикла ТСО дорогостоящие затраты на внеплановый ремонт ТСО из-за бракованных изделий и затраты от простоя ТСО.

**Ключевые слова:** АСУ ТП, АСНИ, АТНК, металлические объекты сложной формы и внутренней структуры, дефекты, надежность эксплуатации, теплофизические характеристики.

**Abstract:** Metal objects of complex shape and internal structure (products) are elements of expensive, often strategically important, technically complex equipment (TCO). The reliability and safety of TCO operation directly depend on the quality of the products. Defects in products can occur during their manufacture and during the operation of TCO. Thanks to the research conducted, product defects are identified before the TSO is assembled using the ASNI for ATNK, and the reliability and safety of operation are improved by preventing defective products from being assembled into the TSO, which eliminates the costly costs of unscheduled TSO repairs due to defective products and the costs of TSO downtime from the TSO's life cycle.

**Keywords:** Automated Process Control Systems, Automated System for Scientific Research, Automated Thermal Network Control, complex-shaped and internally structured metal objects, defects, operational reliability, and thermophysical characteristics.

**Цель работы:** развитие и применение новых АСНИ для АТНК металлических объектов сложной формы и внутренней структуры (на примере лопаток ГТА) и оценки надежности их эксплуатации.

Для достижения цели сформулированы следующие задачи:

---

<sup>1</sup> Национальный исследовательский университет «МЭИ», Россия, Москва.  
National Research University «MPEI», Russia, Moscow

1. Выполнить исследования и анализ современного состояния методов и средств АНК и ТД металлических объектов сложной формы и внутренней структуры;
2. Провести теоретические исследования АТНК металлических объектов сложной формы и внутренней структуры;
3. Осуществить развитие теории АТНК металлических объектов сложной формы и внутренней структуры;
4. Разработать методические принципы АТНК качества и диагностики технического состояния металлических объектов сложной формы и внутренней;
5. Разработать методы и средства повышения достоверности АТНК и оценки надежности эксплуатации металлических объектов сложной формы;
6. Синтезировать АСНИ для АТНК металлических объектов сложной формы и внутренней структуры и оценки надежности их эксплуатации;
7. Провести экспериментальные исследования основных принципов АТНК качества и диагностики технического состояния металлических объектов сложной формы и внутренней структуры с оценкой надежности их эксплуатации.

#### **Состояние вопроса по рассматриваемой проблеме.**

В условиях общепринятой мировым сообществом стремительно развивающейся и крайне тяжелой по последствиям эпидемии техногенных катастроф повышение безопасности эксплуатации ТСО становится одной из первостепенных задач. При этом проблемы обеспечения надежности и безопасности эксплуатации ТСО энергетики-, машино-, судо-, авиа-, ракетостроения, металлургии с учетом все возрастающих эксплуатационных требований и экономической эффективности в условиях конкуренции производителей становится все более актуальной.

Развитие промышленного производства современных отраслей, требуют применение все большего числа деталей – металлических объектов сложной формы и внутренней структуры. И здесь вступают в противоречие два направления: с одной стороны для обеспечения современных тактико-технических характеристик современного создаваемого ТСО требуется увеличения числа и усложнение формы и конструкции деталей, что можно обеспечить современной технологической базой, но с другой стороны для обеспечения качества все изготовленные детали должны проходить АНК качества (это особенно важно для стратегически важных опасных производств - АЭС, ТЭЦ, магистральных трубопроводов, авиационной промышленности, и т.д.), что невозможно в том числе без современных методов и средств АТНК. Необходимость обеспечения достоверного АТНК сложных конструкций, с одной стороны, сдерживает фантазию конструкторов и вынуждает их проектировать детали более простой конструкции, а с другой стороны, заставляет разрабатывать новые технологии АТНК и АСНИ на их основе.

Необходимость решения актуальной проблемы создания новых научно обоснованных технических и технологических решений, которые вносят значительный вклад в развитие Страны по оценке степени опасности влияния выявленных дефектов на надежность и безопасность функционирования металлических объектов сложной формы и внутренней структуры на основе результатов идентификации дефектов АСНИ для АТНК для не допуская бракованных изделий на сборку ТСО (что позволит исключить из жизненного цикла ТСО дорогостоящие затраты на аварийный внеплановый ремонт из-за бракованных изделий и затраты от простоя аварийного ТСО) легли в основу данной диссертационной работы.

В настоящее время АСНИ для АТНК металлических объектов сложной формы и внутренней структуры с оценкой надежности их эксплуатации представлены достаточно слабо. Неудовлетворительно развита теория АТНК металлических объектов сложной формы и внутренней структуры. Плохо изучены методические принципы АТНК качества и диагностики технического состояния металлических объектов сложной формы и внутренней структуры, в том числе: отсутствуют методы обработки данных АТНК изделий на основе разностных уравнений, не исследованы режимы АТНК объектов контроля, отсутствуют комплексы методов определения характеристик дефектов в условиях производственного контроля, не выработаны критерии оценки качества охлаждения металлических объектов сложной формы и внутренней структуры с внутренними каналами и критерии оценки теплового состояния металлических объектов сложной формы и внутренней структуры по результатам АТНК, не исследовано вли-

яние характеристик различных дефектов на распределение температуры в режиме эксплуатации. Недостаточно изучены и не получили широкого распространения методы и средства повышения достоверности АТНК и оценки надежности эксплуатации металлических объектов сложной формы и внутренней структуры, в том числе: отсутствуют методы и алгоритмы компенсации неоднородности коэффициента излучения поверхности металлических объектов сложной формы и внутренней структуры при АТНК, не выявлена методическая погрешность АТНК, отсутствует распознавание малоразмерных дефектов в условиях неопределенности их формы, отсутствует достоверность АТНК металлических объектов сложной формы и внутренней структуры на основе комплексирования информации многопараметрового АТНК, отсутствует повышение достоверности АТНК на основе оптимизации многопараметрового АТНК металлических объектов сложной формы и внутренней структуры и алгоритмы обработки результатов контроля, отсутствуют методологии идентификации дефектов изделий и оценки степени опасности его влияния на сложный технический объект, отсутствуют технологии повышения качества технологического процесса изготовления исходных заготовок металлических объектов сложной формы и внутренней структуры. Слабо развиты АСНИ для АТНК металлических объектов сложной формы и внутренней структуры с оценкой надежности их эксплуатации. Мало исследованы экспериментально основные принципы АТНК качества и диагностики технического состояния металлических объектов сложной формы и внутренней структуры с оценкой надежности их эксплуатации.

Проблемами разработки методов НК и оценкой ресурса конструкций занимались и в настоящее время занимаются такие ведущие ученые России и Зарубежа, как Абрамова Е.В., Андрюшин А.В., Аракелян Э.К., Будадин О.Н., Вавилов В.П., Васильев В.В., Дарищев В.Д., Ивановский В.С., Казельская С.О., Каштанов В.И., Кикин А.И., Кульков А.А., Лычев А.С., Матвеев А.Д., Матвиенко Ю.Г., Махутов Н.А., Майер М., Носов В.В., Охтилев М.Ю., Половко А.М., Потапов А.И., Пугачев С.Б., Пшеничкин А.П., Ройтман А.Г., Тузовский А.Ф., Хоциалов Н.Ф., Abdelbar A., Andrews E., El-Hemaly M., Esposito F., Fanizzi N., Ferilli S., Semeraro G., Wunsch II D., Морозова Т.Ю., Салихов З.Г. и др.

Анализ научных и научно-исследовательских работ предшественников показал, что в настоящее время развитие и применение новых АСНИ для АТНК металлических объектов сложной формы и внутренней структуры сдерживается неудовлетворительным развитием теории АТНК металлических изделий сложной формы и внутренней структуры и нерешенными проблемами создания методических принципов АТНК качества и диагностики технического состояния металлических объектов сложной формы и внутренней структуры (на примере лопаток ГТА), а так же методов и средств повышения достоверности АТНК и оценки надежности эксплуатации металлических объектов сложной формы и внутренней структуры.

#### ***Постановка задачи.***

В настоящей работе решается проблема создания новых научно обоснованных технических и технологических решений, которые вносят значительный вклад в развитие Страны (п.9 Постановления Правительства Российской Федерации от 24.11.2013 №842 (ред. От 25.01.2024): ***оценка степени опасности влияния выявленных дефектов на надежность и безопасность функционирования металлических объектов сложной формы и внутренней структуры на основе результатов идентификации дефектов АСНИ для АТНК.***

Решаемая проблема является актуальной и имеет важное народно-хозяйственное значение. (Актуальность данной работы подтверждается Указом Президента Российской Федерации от 06.05.2018г. № 198 «Об Основах государственной политики Российской Федерации в области промышленной безопасности на период до 2025 года и дальнейшую перспективу» и Указом Президента Российской Федерации от 07.05.2018 N 204 (ред. от 21.07.2020) «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024года»).

Данные технические и технологические решения относятся к высокоэффективной и ресурсосберегающей энергетике (п.1 приоритетных направлений научно-технического развития Российской Федерации) и относятся к критическим технологиям создания высокоэффективных систем генерации, распределения и хранения энергии (в том числе атомной) (п.1); технологиям создания энергетических систем с замкнутым топливным циклом (п.2); транспортным технологиям для различных сфер применения (море, земля, воздух), в том числе беспилотные

и автономные системы (п.14); технологии космического приборостроения для развития современных систем связи, навигации и дистанционного зондирования Земли (п.15); экологически чистым технологиям эффективной добычи и глубокой переработки стратегических и дефицитных видов полезных ископаемых (п.20) и сквозным технологиям создания новых материалов с заданными свойствами и эксплуатационными характеристиками (п.23); технологиям искусственного интеллекта в отраслях экономики, социальной сферы (включая сферу общественной безопасности) и в органах публичной власти (п.25); технологиям создания отечественных средств производства и научного приборостроения (п.26) (Указ Президента Российской Федерации от 18.06.2024 № 529 «Об утверждении приоритетных направлений научно-технологического развития и перечня важнейших наукоемких технологий»).

***Метод решения и допущения.***

При выполнении исследований использовались методы, научные основы и технологии построения АСУ ТП АСНИ для АТНК металлических объектов сложной формы и внутренней структуры и оценки надежности их эксплуатации при формулировке и решении поставленных задач, современные методы оценки адекватности МММ, теоретический МММ прохождения теплового фронта через многослойную среду; методы решения аэродинамических и обратных задач теплофизики; традиционные методы статистических исследований, выделения случайных сигналов на фоне помех; методы фильтрации и распознавания образов; методы теории вероятности и кластерного анализа; методы синтеза АСНИ.

***Анализ полученных результатов.***

Разработаны методические, математические, алгоритмические, программные и технические средства АСНИ повышения достоверности АТНК и ТД, а также оценки надежности эксплуатации металлических объектов сложной формы и внутренней структуры (на примере лопаток ГТА), применение которых: повысило отношение сигнал/шум в 2...4 раза; упростило технологию контроля и уменьшило стоимость технических и программных средств контроля на 30% благодаря снижению требования к методической погрешности; увеличило достоверность обнаружения слабых аномалий (дефектов) на 20...30%; повысило надежность обнаружения аномалий (дефектов) на 25...35 % и более; установило, что увеличение температуры вследствие влияния дефекта на 5°C в процессе проведения контроля (соответствует 10°C в режиме эксплуатации) приводит к уменьшению ресурса в 1,89; установило увеличение точности прогноза на 20...30 % при прогнозировании момента наступления предаварийной ситуации по изменению динамики измеренных данных.

• Разработана методология идентификации дефектов изделий и комплексной оценки надежности и безопасности функционирования металлических изделий сложной формы и внутренней структуры; Разработаны математические модели, описывающие процесс АТНК от тепловых до аэродинамических процессов в материале и внутренних конструкциях изделия; Разработаны новые алгоритмы (и программное обеспечение на их основе), решающее задачи идентификации типа дефектов и оценки порога принятия решения о допуске изделия в эксплуатацию, диагностики и классификации типов дефектов лопаток по результатам АТНК с использованием алгоритмов векторного квантования и самоорганизующихся карт, методов комплексирования информации и обработки многопараметровой информации, повышающие достоверность АТНК и технической диагностики и оценки надежности эксплуатации металлических объектов сложной формы и внутренней структуры; Разработана технология и АСНИ для АТНК для повышения качества технологического процесса изготовления исходных заготовок металлических изделий сложной формы и внутренней структуры на основе непрерывного анализа динамических температурных полей поверхности, определенных экспериментально и рассчитанных посредством разработанных математических моделей с возможностью в дальнейшем автоматизировать выполнение следующих задач: представление данных; идентификация дефекта с использованием логического формализма модифицированных рассуждений; определение опасности дефекта с помощью искусственных нейронных сетей; обучение и настройка нейронной сети; визуализация результатов; Проведены теоретические и экспериментальные исследования процесса АТНК металлических изделий сложной формы и внутренней структуры (на примере лопаток ГТА) и внутренней структуры для определения наилучших режимов контроля.

- Обоснованность и достоверность научных положений и основных выводов, представленные в диссертационной работе, подтверждаются: использованием современных теоретических и экспериментальных методов исследования; применением высокоточного оборудования; большим объемом теоретических и экспериментальных исследований; согласованностью результатов теоретических и экспериментальных исследований; сопоставлением полученных результатов теоретических и экспериментальных исследований с исследованиями других авторов и действующими нормативными документами; корректным использованием разработанных математических методов и моделей; достаточным количеством научных публикаций и патентов на изобретения; положительными результатами использования в деятельности Предприятий и в учебном процессе Университетов России и Зарубежа; проведение экспериментальных исследований осуществлялось с использованием метрологически поверенных средств ТК и современной микропроцессорной измерительной аппаратуры; обработка данных проводилась на ЭВМ с помощью оригинальных, написанных на высокоуровневых языках программирования VISUAL BASIC, C++, и стандартных программ.

- Основные результаты и положения диссертационной работы изложены в 29 публикациях в журналах ВАК и 8-ми публикациях прочих журналах, докладывались, широко обсуждались, публиковались и получили положительную оценку более чем на 44 конференциях, выставках и семинарах за последние 26 лет.

***Выводы (заключение).***

На основании выполненных исследований сформулированы следующие основные выводы и положения [1-29]:

1. Решена проблема оценки степени опасности влияния выявленных дефектов на надежность и безопасность функционирования металлических объектов сложной формы и внутренней структуры на основе результатов идентификации дефектов АСНИ для АТНК;

2. Достигнута цель – осуществлено развитие и применение новых АСНИ для АТНК металлических объектов сложной формы и внутренней структуры и оценки надежности их эксплуатации;

3. Впервые разработана методология автоматической идентификации дефектов изделий и оценки степени опасности влияния дефектов на надежность и безопасность функционирования металлических изделий сложной формы и внутренней структуры на основе анализа динамических температурных полей поверхности контролируемого объекта в процессе автоматизированного АТНК;

4. Разработаны математические модели автоматизированных научных исследований процессов АТНК от тепловых до аэродинамических процессов в материале и внутренних конструкциях изделия, с учетом ИК излучения во внутренней структуре материала;

5. Разработаны новые методы (алгоритмы и программное обеспечение на их основе) повышения достоверности АТНК и ТД для оценки надежности эксплуатации и качества изготовления исходных заготовок металлических объектов сложной формы и внутренней структуры, отличающиеся от существующих возможностью компенсации неоднородности коэффициента ИК излучения с поверхности изделия и полостей внутренней структуры методами векторного квантования и самоорганизующихся карт, комплексирования информации и обработки многопараметровой информации;

6. Впервые синтезирована комплексная АСНИ метода АТНК металлических объектов сложной формы и внутренней структуры, отличающаяся от существующих АСНИ возможностью автоматической идентификации дефектов изделий, на основе анализа динамических температурных полей поверхности контролируемого объекта, зависящих от тепловых и аэродинамических процессов в материале и внутренних конструкциях изделия, с учетом ИК излучения во внутренней структуре материала, компенсацией неоднородности коэффициента ИК излучения с поверхности изделия и полостей внутренней структуры методами векторного квантования и самоорганизующихся карт, комплексирования информации и обработки многопараметровой информации для оценки степени опасности влияния выявленных дефектов на надежность и безопасность функционирования изделий;

7. Определены наилучшие режимы контроля качества и автоматизированной диагностики технического состояния металлических изделий сложной формы и внутренней струк-

туры методом АТНК с оценкой надежности их эксплуатации, обеспечивающие одновременное обнаружение и распознавание дефектов, с минимизацией погрешности измерения и выявлением методической погрешности АТНК;

8. Получены и исследованы характеристики реальных дефектов и параметры шумов при проведении АТНК и исследовано их влияние на надежность эксплуатации металлических объектов сложной формы и внутренней структуры;

9. Новизна полученных научных результатов подтверждена 8-ю патентами РФ на изобретения (№2666158, №2630160, №2537520, №2539127, №2533321, № 2395773, №2237218, №2232959), заявкой на патент РФ №2012132224/02(050945) и свидетельством о регистрации секретов производства (НОУ-ХАУ) в Депозитарии ноу-хау НИТУ «МИСиС» №18-014-2014 ОИС от 22.05.2014г., организована лаборатория АТНК (кафедра «Автоматизации» НИТУ МИСиС) 2013г., результаты диссертационной работы используются в деятельности и в учебном процессе 16-ти Предприятий и Университетов России и Зарубежа, по материалам диссертационной работы разработаны и внедрены в учебный процесс Университетов России и Зарубежа 15-ть учебных пособий.

#### **Список сокращений.**

АНК – автоматизированный неразрушающий контроль;

АСНИ – автоматизированная система научных исследований;

АСУ ТП – автоматизированная система управления технологическими процессами;

АТНК – автоматизированный тепловой неразрушающий контроль;

АЭС – атомная электрическая станция;

ВАК – Высшая аттестационная комиссия;

ГТА – газотурбинный агрегат;

ИК – инфракрасное;

МММ – метод математического моделирования;

НИТУ МИСиС – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»;

ТД – техническая диагностика;

ТК – тепловой контроль;

ТСО – технически сложное оборудование;

ТЭЦ – теплоэлектроцентраль;

ЭВМ – электронно-вычислительная машина;

C ++ – язык программирования, который сочетает свойства как высокоуровневых, так и низкоуровневых языков программирования;

VISUAL BASIC – язык программирования, сочетающий процедуры и элементы объектно-ориентированных и компонентно-ориентированных языков программирования.

#### **Список литературы**

1. Орлов А.А., Крылова Е.В., Щербаков В.М., Авдеев А.Д. Интеллектуальная система мониторинга и диагностики элементов газотурбинной установки (ИСМДЭГТУ). // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2025. – Т. 27, № 2. – С. 211-221. – DOI 10.30724/1998-9903-2025-27-2-211-221. – EDN NFQLQT.
2. Равад Д., Дудолин А.А., Бураков И.А., Орлов А.А. Модификация формы выемок и её влияния на аэродинамические характеристики пластины с выемками. // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. – 2025. – Т. 26, № 3. – С. 64-86. – DOI 10.33257/PhChGD.26.3.1182. – EDN SCGQOI.
3. Деев Р., Орлов А.А. Экспериментальное и численное исследование влияния формы шипов на коэффициент аэродинамического сопротивления оребренной трубы. // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. – 2024. – Т. 25, № 3. – С. 32-48. – DOI 10.33257/PhChGD.25.3.1101. – EDN KQVENR.
4. Орлов А.А., Крылова Е.В., Сириченко А.В. Разработка 2D и 3D моделей лопатки газотурбинного агрегата. // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2024. – Т. 16, № 4(64). – С. 72-82. – EDN PYYVHE.
5. Орлов А.А., Крылова Е.В. Математическое моделирование темпа охлаждения в контролируемых зонах при автоматизированном тепловом неразрушающем контроле металлических изделий сложной формы и внутренней структуры. // Вестник

- Казанского государственного энергетического университета. – 2024. – Т. 16, № 4(64). – С. 93-103. – EDN BRBVBF.
6. Орлов А.А., Крылова Е.В., Сириченко А.В., Пыткина Е.А., Будадин О.Н., Козельская С.О., Федотов М.Ю. Программный модуль определения физических размеров диагностируемых металлических изделий сложной формы и внутренней структуры на тепловом поле при автоматизированном тепловом неразрушающем контроле. // *Промышленные АСУ и контроллеры*. – 2023. – № 12. – С. 3-8. – DOI 10.25791/asu.12.2023.1473. – EDN FLQUCI.
  7. Орлов А.А., Будадин О.Н., Богачев А.С., Борисенко В.В., Крылова Е.В., Козельская С.О., Пыткина Е.А., Гладков А.П., Сапожков Е.А. Автоматизированный неразрушающий контроль качества изделий сложной конструкции и структуры материалов. // *Промышленные АСУ и контроллеры*. – 2023. – № 9. – С. 3-12. – DOI 10.25791/asu.9.2023.1456. – EDN NWFLRF.
  8. Крылова Е.В., Орлов А.А., Пыткина Е.А. Повышение надежности и достоверности обнаружения аномалий и дефектов при тепловом автоматизированном неразрушающем контроле металлических изделий сложной формы и внутренней структуры (на примере лопаток газотурбинных агрегатов). // *Тяжелое машиностроение*. – 2023. – № 5-6. – С. 17-22. – EDN YVKJLQ.
  9. Рыков А.Н., Будадин О.Н., Сычугов С.Н., Бекаревич А.А., Карпов И.В., Полуниин А.А. Автоматизированная система производственного неразрушающего контроля. // *Промышленные АСУ и контроллеры*. – 2020. – № 4. – С. 8-16. – DOI 10.25791/asu.4.2020.1172. – EDN MZSYSH.
  10. Бекаревич А.А., Певзнер Л.Д., Морозова Т.Ю., Будадин О.Н., Валиахметов С.А. Математическое моделирование процесса теплового контроля локальных дефектов металлических изделий сложной формы на примере лопаток турбин газотурбинных двигателей. // *В мире научных открытий*. – 2015. – № 8(68). – С. 34-42. – DOI 10.12731/wsd-2015-8-3. – EDN UBQRUP.
  11. Морозова Т.Ю., Бекаревич А.А., Будадин О.Н. Новый подход к идентификации дефектов материалов изделий. // *Контроль. Диагностика*. – 2014. – № 8. – С. 42-48. – DOI 10.14489/td.2014.08.pp.042-048. – EDN SHOACX.
  12. Бекаревич А.А. Тепловой контроль деталей сложной формы валковых машин отделочного производства. // *Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности*. – 2013. – № 4(346). – С. 136-140. – EDN SFIRYR.
  13. Бекаревич А.А., Будадин О.Н., Пичугин А.Н. Исследование возможности автоматизированной дефектоскопии материалов с распознаванием малоразмерных дефектов в условиях неопределенности их формы. // *Контроль. Диагностика*. – 2013. – № 3. – С. 29-33. – EDN PXHUXB.
  14. Бекаревич, А.А. Обнаружение дефектов сложных конструкций на основе комплексирования информации многопараметрового неразрушающего контроля. // *Цветные металлы*. – 2013. – № 3(843). – С. 82-88. – EDN PXVXKH.
  15. Бекаревич А.А., Будадин О.Н., Крайний В.И., Пичугин А.Н. Исследование возможности комплексирования информации многопараметрового неразрушающего контроля сложных конструкций. // *Контроль. Диагностика*. – 2013. – № 2. – С. 75-80. – EDN PWCSXT.
  16. Крайний В.И., Будадин О.Н., Бекаревич А.А. Оптимизация многопараметрового неразрушающего контроля материалов, конструкций и объектов. // *Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана*. – 2012. – № 8(8). – С. 26. – EDN QZPOGN.
  17. Бекаревич А.А., Будадин О.Н., Чумаков А.Г. Метод автоматизированного теплового контроля лопаток турбин. // *Контроль. Диагностика*. – 2012. – № 10. – С. 27-33. – EDN PEZFBJ.
  18. Бекаревич А.А., Будадин О.Н. Исследование возможностей обнаружения внутренних дефектов сложных конструкций на основе комплексирования информации многопараметрового неразрушающего контроля. // *Промышленные АСУ и контроллеры*. – 2012. – № 12. – С. 5-10. – EDN STETNL.

19. Бекаревич А.А., Чумаков А.Г., Будадин О.Н. Разработка метода теплового автоматизированного неразрушающего контроля лопаток турбин. // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2012. – № 11. – С. 27-32. – EDN OZTKHR.
20. Бекаревич А.А., Ухаров А.С., Будадин О.Н., Пичугин А.Н. Распознавание малоразмерных дефектов в условиях неопределенности их формы в процессе автоматизированного неразрушающего контроля. // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2012. – № 10. – С. 5-9. – EDN STETDL.
21. Бекаревич А.А., Салихов З.Г., Газимов Р.Т., Шубин М.В. Практические аспекты автоматизированного выявления и устранения сколов обмазки и футеровки вращающейся печи без ее останова. // Металлург. – 2010. – № 7. – С. 67-70. – EDN MUD-MBV.
22. Рутковский А.Л., Мешков Е.И., Бекаревич А.А., Ковалева М.А. Математическое моделирование процесса факельного сжигания газообразного топлива // Цветные металлы. – 2009. – № 1. – С. 75-78. – EDN KYIMSR.
23. Салихов З.Г., Газимов Р.Т., Шубин М.В., Бекаревич А.А. Автоматизированное выявление и устранение сколов обмазки и футеровки вращающейся печи без ее останова. // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. – 2011. – № 3. – С. 53-57. – EDN NUETWV.
24. Шубладзе А.М., Салихов З.Г., Гуляев С.В., Шубладзе А.А., Бекаревич А.А. Оптимальные автоматически настраиваемые регуляторы. // Цветные металлы. – 2003. – № 12. – С. 86-89. – EDN QAEWRP.
25. Салихов, З.Г., Бекаревич А.А. Компьютерная система автоматического управления процессами обжига материалов в трубчатых вращающихся печах. // Цветные металлы. – 2003. – № 5. – С. 85-87. – EDN QAEXXD.
26. Салихов, З. Г. Алгоритм расчета уставок регуляторов стабилизации температурного профиля обжигаемого материала в функции длины корпуса вращающейся печи / З. Г. Салихов, А. А. Бекаревич, А. П. Щетинин // Цветные металлы. – 2003. – № 3. – С. 92-96. – EDN QAEXHJ.
27. Салихов З.Г., Бекаревич А.А. Построение компьютерной системы автоматического управления процессами обжига материалов в трубчатых вращающихся печах с использованием датчиков инфракрасного излучения. // Автоматизация в промышленности. №3. 2003г. Стр. 15-17. (ISSN 1819-5962).
28. Салихов З.Г., Бекаревич А.А., Киселев Л.А. Алгоритмы расчета температурного профиля обжигаемого материала по длине корпуса вращающейся печи методом Л.С. Понтрягина и модифицированным методом Р.Беллмана. // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. № 2, 2003. Стр. 73-82. (ISSN: 0021-3438).
29. Салихов, З.Г., Бекаревич А.А. Разработка бесконтактного метода автоматического контроля температуры обжигаемого материала по всей длине вращающейся печи. // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. № 6, 2002. Стр. 67-73. (ISSN: 0021-3438).

**Разработка АСУ ТП энергетического объекта на примере системы автоматического регулирования температуры перегретого пара барабанного котла****DEVELOPMENT OF AN AUTOMATIC CONTROL SYSTEM FOR AN ENERGY FACILITY ON THE EXAMPLE OF AN AUTOMATIC CONTROL SYSTEM FOR THE TEMPERATURE OF SUPERHEATED VAPOR IN A DRUM KETTLE**

**Аннотация:** объектом исследования являются: барабанный котел БКЗ-210-140, работающий на газовом топливе, каскадная автоматическая система регулирования температуры острого пара и среда программирования логических контроллеров.

**Ключевые слова:** АСУ ТП, котел, барабанный, перегретый пар, система, регулирование.

**Abstract:** The object of the study is: the BKZ-210-140 drum boiler running on gas fuel, a cascade automatic hot steam temperature control system and a programming environment for logic controllers.

**Keywords:** automated process control system, boiler, drum, superheated steam, system, regulation.

**Цель работы** – провести тепловой расчет барабанного котла БКЗ-210-140, определить коэффициент полезного действия, определение оптимальных геометрических параметров топки котла, расчет оптимальных настроек ПИ-регуляторов одноконтурной и каскадной подсистем регулирования по минимуму линейного интегрального показателя и по критерию запаса устойчивости в виде ограничения на частотный показатель колебательности, сравнение качества переходных процессов по каналу задающего сигнала и каналу возмущающего сигнала, синтез модели подсистемы автоматического регулирования в интегрированной среде программирования промышленных контроллеров компании ОВЕН Codesys v3.5.

В процессе работы проводились расчеты **по методу** номинального режима работы котла в математическом пакете Mathcad 15. Реализация данной цели обусловила необходимость решения следующих задач:

- рассчитать коэффициент полезного действия и расход топлива котла БКЗ-210-140;
- рассчитать настройки регуляторов подсистем регулирования и сделать сравнение, какая из автоматических систем регулирования более качественно справляется с регулирование температуры острого пара;
- рассмотреть способ программирования логического контроллера с учетом логики выбранной подсистемы.

**Описание водопарового тракта котла** [1]. Питательная вода поступает в экономайзер, получая тепло посредством отдачи тепла от уходящих газов через трубы экономайзера воде, нагревается до состояния насыщения и далее движется в барабан. Уже котловая вода циркулирует по контурам опускных труб, связанных с топочными экранами нижними коллекторами. Пароводяная смесь поступает из топочных экранов в барабан, где происходит процесс сепарации. Насыщенный пар направляется в радиационный, холодный, ширмовый пакеты пароперегревателей, далее в первую и вторую ступени горячего пакета пароперегревателя. В дальнейшем перегретый пар поступает через паровую задвижку в первую ступень турбины. В схеме присутствуют два впрыска конденсата для регулирования температуры острого пара. Данный конденсат получают в установке собственного конденсата.

---

<sup>1</sup> Национальный исследовательский университет «МЭИ», Россия, Москва.  
National Research University «MPEI», Russia, Moscow



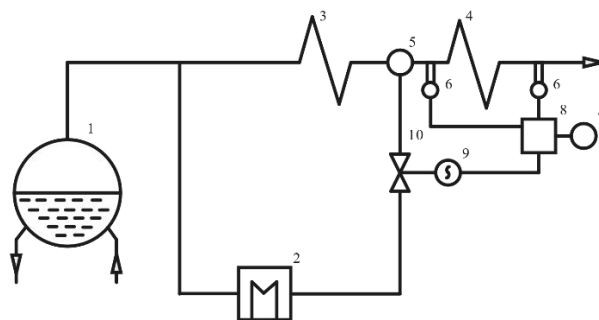


Рис. 2. Схема регулирования температуры перегретого пара  
 1 - барабан; 2 – установка собственного конденсата; 3 – первая ступень пакета; 4 – вторая ступень горячего пакета; 5 – впрыск; 6 – термоэлектрический преобразователь; 7 – задающее устройство; 8 – регулятор; 9 – электродвигатель клапана; 10 – регулирующий клапан.

Одноконтурная подсистема регулирования представляет схему, в основу которой входит регулятор, в случае данной работы – ПИ-регулятор, входное воздействие, выходное (управляющее) воздействие и единичная обратная отрицательная связь. Наличие такой связи дает возможность устранять ошибку регулирования, то есть возвращать параметр регулирования в исходное положение.

Каскадная подсистема регулирования представляет из себя более сложную структуру. В ее состав входят два ПИ-регулятора, две единичные обратные отрицательные связи, входное, выходное воздействия, также канал, который подразумевает под собой случайные возмущающие воздействия на данную систему. Регуляторы названы корректирующим и стабилизирующим неспроста: корректирующий регулятор “грубо” меняет значение параметра, приводя его в определенную область значений, откуда стабилизирующий регулятор “точно” доводит параметр до заданной уставки.

По передаточным функциям каналов произведем расчет обеих подсистем при помощи нахождения настроек регуляторов через вспомогательные функции.

**Моделирование подсистем регулирования в SimInTech.** Теперь, когда стали известны настройки регуляторов каждой из системы регулирования, смоделируем структуры данных подсистем регулирования в SimInTech [4-6]. По полученным графикам при помощи трассировки определяем динамическое, статическое отклонение и время регулирования, затем производим расчет степени затухания.

**Таблица 1** – прямые показатели качества переходных процессов по каналу задания

Одноконтурная система			
$\Delta u_{дин}$	$\Delta u_{стат}$	$t_{рег}$	$\psi$
0,314	0	12000	0,867
Каскадная система			
$\Delta u_{дин}$	$\Delta u_{стат}$	$t_{рег}$	$\psi$
0,295	0	10000	0,846

**Таблица 2** - прямые показатели качества переходных процессов по каналу возмущения

Одноконтурная система			
$\Delta u_{дин}$	$\Delta u_{стат}$	$t_{рег}$	$\psi$
0,232	0	13000	0,99
Каскадная система			
$\Delta u_{дин}$	$\Delta u_{стат}$	$t_{рег}$	$\psi$
0,0043	0	8000	0,763

Сравнивая данные из таблиц, можно сделать вывод, что каскадная подсистема регулирования более эффективна в регулировании температуры острого пара по каналу возмущения за счет меньшего времени регулирования и меньшего динамического отклонения.

**Программирование контроллера.** Для программирования логических контроллеров будем использовать среду программирования Codesys v3.5 от компании “ОВЕН” [5]. В качестве программируемого логического контроллера была выбрана модель ПЛК 210. В данной среде программирования будет использоваться язык **continuous function chart** [6] – данный язык является аналогом языка **function block diagram**. Суть данных языков программирования заключается в записи реальных физических объектов в виде математических блоков для моделирования реальных объектов. В данной программе основной задачей является проверка процесса регулирования температуры острого пара посредством изменения расхода собственного конденсата, впрыскиваемого в трубопровод с паром.

Реализуем каскадную систему, представленную на рисунке 3, на выбранном языке.

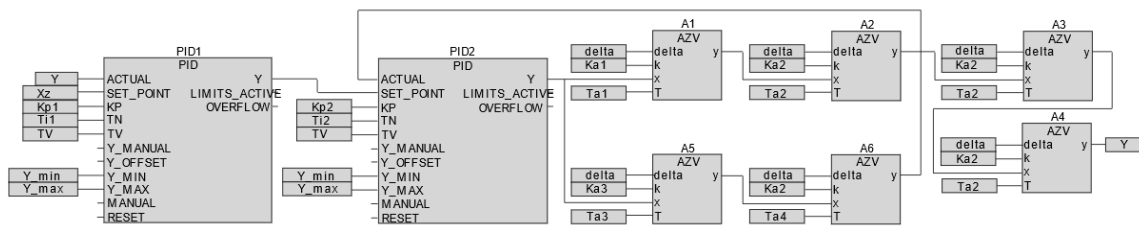


Рис. 3. Каскадная система на языке continuous function chart в CoDeSys v3.5

Итогом данной работы:

1. Проведен тепловой расчет котла. При тепловом расчете коэффициент полезного действия котла брутто было определено значение в 94,628%. Довольно высокое значение, учитывая, что реальные значения коэффициент полезного действия котлов данного типа в диапазоне 85-88%, работающих на твердом топливе.
2. Рассчитаны настройки регуляторов обеих автоматических систем регулирования;
3. Выполнено сравнение подсистем регулирования: каскадная система превосходит одноконтурную по каналу возмущения. Достигается данное преимущество за счет наличия малоинерционного контура, который опережает по скорости работу основного канала, за счет чего исправление ошибки регулирования происходит более качественно.
4. В итоге рассмотрения Codesys v3.5 была смоделирована каскадная автоматическая система регулирования. Представленные языки программирования дают огромную возможность в реализации более масштабных систем, которые применяются на станциях.

### Список литературы

1. Липов Ю.М. Тепловой расчет парового котла : (учеб. пособие для вузов) / Ю. М. Липов. - Москва ; Ижевск : НИЦ "Регуляр. и хаот. динамика", 2001. - 172, [4] с. : ил., табл.; 20 см.; ISBN 5-93972-046-3.
2. Иванова, Г. М. Теплотехнические измерения и приборы : учебник для студентов вузов, обучающихся по направлению подготовки "Теплоэнергетика" / Г. М. Иванова, Н. Д. Кузнецов, В. С. Чистяков ; Г. М. Иванова, Н. Д. Кузнецов, В. С. Чистяков. – 3-е изд., стер.. – Москва : МЭИ, 2007. – 458 с. – ISBN 978-5-383-00155-4. – EDN QMJXKT.
3. Ротач В.Я. Теория автоматического управления: учебник для вузов / В.Я. Ротач. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательский дом МЭИ 2008. – 396 с.
4. Крылова Е.В., Орлов А.А., Пыткина Е.А., Левинский М.С. Исследование каскадной подсистемы автоматического регулирования температуры перегретого пара барабанного котла ТГМ-96Б на ТЭЦ-21. // Тяжелое машиностроение. – 2023. – № 9. – С. 30-37.
5. CODESYS V3.5 Вопросы и ответы (FAQ) руководство пользователя 14.05.2025 версия 3.5
6. SYSMAC Руководство пользователя функциональные блоки / структурированный текст 2011г.

УДК 681.5.073

<sup>1</sup>Тищенко Н.Р., <sup>2</sup>Полежаев Д.С., <sup>2</sup>Паржицкий С.С. <sup>2</sup>Долбилов А.Г.

<sup>1</sup>Tishchenko N.R., <sup>2</sup>Polezhaev D.S., <sup>2</sup>Parzhitsky S.S., <sup>2</sup>Dolbilov A.G.

**Автоматизация управления и мониторинг вентиляционной системы бытовых помещений лаборатории информационных технологий**

**им. М.Г. Мещерякова ОИЯИ г.Дубна**

**Automation of control and monitoring of the ventilation system of domestic premises of the M.G. Meshcheryakov Laboratory of Information Technologies of the Joint Institute for Nuclear Research, Dubna**

**Аннотация:** В работе рассмотрены вопросы модернизации системы автоматизированного управления и мониторинга вентиляции бытовых помещений Лаборатория информационных технологий им. М.Г. Мещерякова Объединённый институт ядерных исследований. Проведён анализ текущего состояния вентиляционной системы, выполнен выбор средств автоматизации и разработаны алгоритмы управления. Предложена трёхуровневая архитектура АСУ ТП на базе программируемых логических контроллеров, интеллектуальных датчиков и SCADA-системы. Реализованы иерархические алгоритмы управления с применением ПИД-регулирования и механизмов аварийной защиты. Программное обеспечение разработано в среде PRO-Logic Master (МЭК 61131-3, язык FBD), визуализация выполнена в Pro-Screen Master. Внедрённая система обеспечивает поддержание нормативных параметров микроклимата в реальном времени и повышает эффективность контроля вентиляции.

**Ключевые слова:** АСУ ТП, программно-аппаратный комплекс SCADA, вентиляция помещения.

**Abstract:** This paper examines the modernization of an automated control and monitoring system for ventilation in domestic premises at the M.G. Meshcheryakov Information Technology Laboratory, Joint Institute for Nuclear Research. The current state of the ventilation system was analyzed, automation tools were selected, and control algorithms were developed. A three-level architecture for the automated process control system (APCS) based on programmable logic controllers, intelligent sensors, and a SCADA system was proposed. Hierarchical control algorithms were implemented using PID regulation and emergency protection mechanisms. The software was developed in PRO-Logic Master (IEC 61131-3, FBD language), and visualization was performed in Pro-Screen Master. The implemented system ensures the maintenance of standard microclimate parameters in real time and improves the efficiency of ventilation control.

**Keywords:** automated process control system, SCADA hardware and software system, room ventilation.

Одним из важнейших направлений автоматизации технологических процессов на промышленных объектах является управление вентиляцией для поддержания микроклимата помещений, в связи с возрастающими требованиями к условиям труда и повышению производительности, а также обеспечения надежной работы технологического оборудования [1].

Выбранные типы и характеристики систем вентиляции серьезно влияют на выбор и разработку средств автоматизированного управления [2], так как особенностью объекта является наличие в смежных помещениях лаборатории (или непосредственно в бытовых помещениях) чувствительного технологического оборудования, что накладывает дополнительные ограничения на выбор систем вентиляции и, как следствие, требует интеграции в систему автоматизации функций аварийного оповещения и резервирования управляющих модулей.

---

<sup>1</sup> Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М. И. Платова, Новочеркасск, Россия

South-Russian State Polytechnical University (NPI) named after M.I. Platov, Novocherkassk, Russia

<sup>2</sup> Лаборатории информационных технологий им М.Г. Мещерякова, Объединенного института ядерных исследований, Дубна, Россия

M.G. Meshcheryakov Information Technology Laboratory, Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

Актуальны системы управления приточно-вытяжной вентиляции с использованием отечественной элементной базы, так как в условиях современной экономической ситуации в России особую значимость приобретает курс на импортозамещение в промышленности [3].

Интеграция технологий искусственного интеллекта, Интернет вещей (IoT), Большие данные (Big Data) и облачных вычислений в системы промышленной автоматизации создает предпосылки для реализации концепции «умного завода» на уровне инженерных систем [4,5]. Применение данного подхода к автоматизации приточно-вытяжной вентиляции бытовых помещений лаборатории информационных технологий (ЛИТ) позволит обеспечить автономный анализ данных в реальном времени и адаптивное поддержание микроклимата в соответствии с требованиями к условиям труда.

Целью настоящей работы является модернизация системы автоматизированного управления и мониторинга параметров вентиляции в бытовых помещениях ЛИТ имени М.Г. Мещерякова ОИЯИ для повышения эффективности контроля и обеспечения нормативных параметров микроклимата.

Для реализации поставленной цели в работе решаются задачи анализа текущего состояния вентиляции, выбора средств автоматизации, разработки алгоритмов управления и программного обеспечения.

В результате проведенной оценки состояния системы вентиляции был выявлен ряд критических недостатков, препятствующих ее эффективной эксплуатации. ЛИТ была основана в 1966 году, время второго и третьего поколений ЭВМ (переход от транзисторов к первым интегральным схемам). Тогда требования к вентиляционным системам были другими, в частности главной проблемой был отвод огромного количества тепла, а управление и сбор данных строилось на базе аналоговых приборов и релейной логики. Технологической нормой того периода были грубые термостаты, электромеханические датчики давления и щиты управления на базе реле, что не позволяло обеспечивать высокую точность поддержания параметров среды и мониторинг.

Современные системы, работающие сегодня в ОИЯИ (МИВК, ЦОД Tier-1, СК «ГОВОРУН») предъявляют принципиально другие требования: чистота воздуха, точный контроль температуры и влажности, интеллектуальное управление. Реализация этих требований стала возможна благодаря переходу от устаревших аналоговых средств автоматики к цифровым технологиям. На смену электромеханическим датчикам пришли прецизионные цифровые сенсоры с высокой дискретностью измерения, а вместо релейных шкафов – программируемые логические контроллеры и микропроцессорная техника, позволяющие вести непрерывный мониторинг, сбор данных и гибкую настройку параметров микроклимата в реальном времени.

Таким образом показано, что технологическое оборудование характеризуется высокой степенью физического и морального износа, поскольку функционирует на устаревшей элементной базе. Ключевой проблемой является отсутствие средств объективного контроля: используемая система вентиляции не оснащена современными приборами учета и датчиками, что делает невозможным мониторинг ее параметров в реальном времени. Сложившаяся ситуация обуславливает необходимость полной замены устаревшего оборудования и последующего внедрения автоматизированной системы управления технологическими процессами (АСУ ТП), обеспечивающей непрерывный мониторинг и дистанционное управление системой вентиляции ЛИТ ОИЯИ.

Исходя из требований к новой системе вентиляции, таких как надежность, энергоэффективность, информативность, выбор средств автоматизации осуществлялся по следующим направлениям:

- низкий уровень (промышленные контроллеры, поддерживающие современные протоколы обмена данными (OPC UA, Modbus TCP/IP, Modbus RTU) для интеграции в общую АСУ ТП);
- полевой уровень (интеллектуальные датчики и исполнительные устройства, позволяющие проводить удаленную диагностику и калибровку);
- верхний уровень (SCADA-система, обеспечивающая интуитивно понятный интерфейс для оператора и архивацию ключевых параметров работы вентиляции).

Предложенная конфигурация средств автоматизации позволяет полностью отказаться от устаревшего неконтролируемого оборудования и перейти на современные стандарты управления микроклиматом.

Для реализации функций автоматизированного управления и мониторинга параметров работы вентиляционной системы были разработаны алгоритмы управления, учитывающие технологические требования к микроклимату и режимы работы оборудования.

Алгоритмы построены по следующему иерархическому принципу.

1. Верхний уровень, в котором реализованы алгоритмы снятия параметров с датчиков и вывода в НМИ (человеко-машинный интерфейс). На основе полученных данных строятся графики тренды, указывающие оператору на текущие значения температуры, влажности, и т.д (рисунок 1).

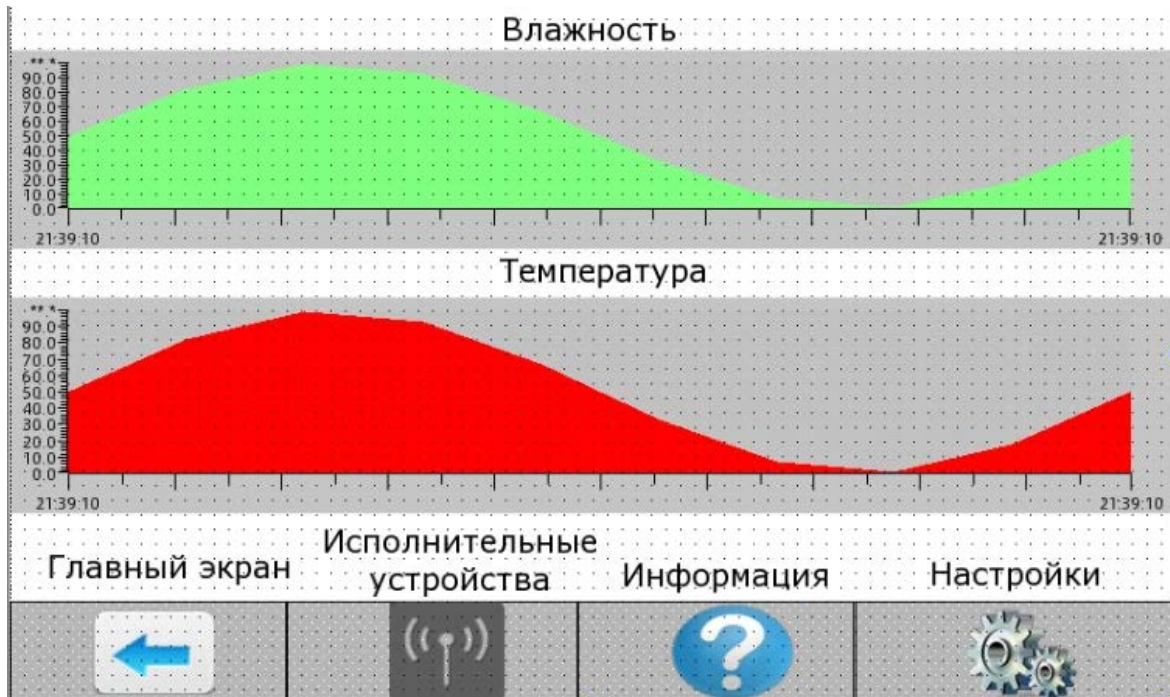


Рис. 1. Среда программирования PRO-Screen Master, разработанный человеко-машинный интерфейс

2. Полевой уровень, в котором разработаны алгоритмы ПИД-регулирования для поддержания заданной температуры приточного воздуха путем управления клапаном калорифера/охладителя и частотными преобразователями вентиляторов для поддержания требуемого давления в сети (рисунок 2).

3. Нижний уровень, в котором применены алгоритмы аварийной защиты, предотвращающие запуск вентиляторов при закрытых заслонках и включающие сигнализацию при выходе параметров за допустимые пределы.

Программное обеспечение реализовано в среде программирования PRO-Logic Master на языке FBD (Язык функциональных блоков), входящий в международный стандарт МЭК 61131-3. Визуализация технологического процесса разработана в Pro-Screen Master, что обеспечивает оператору интуитивно понятный интерфейс для контроля параметров, изменения уставок и архивирования данных.

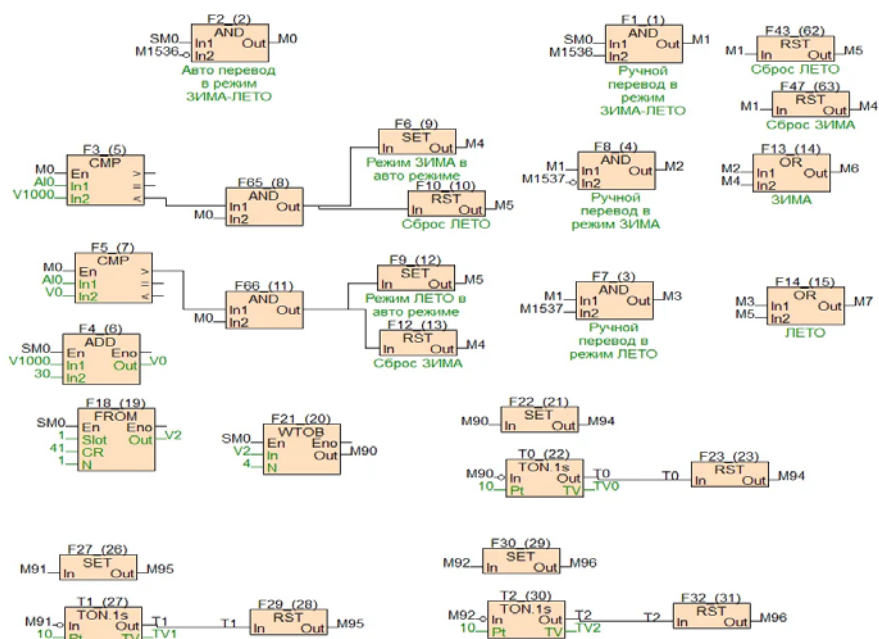


Рис. 2. Среда программирования PRO-Logic Master, разработанные алгоритмы управления системой вентиляции

Таким образом, в ходе выполнения работы был осуществлен мониторинг и модернизация системы управления вентиляцией бытовых помещений ЛИТ им. М.Г. Мещерякова ОИЯИ. Проведенный анализ выявил высокую степень износа существующего оборудования. Предложена и обоснована трехуровневая архитектура АСУ ТП с использованием современных контроллеров, интеллектуальных датчиков и SCADA-системы. Разработаны иерархические алгоритмы управления, включающие ПИД-регулирование и аварийную защиту. Программное обеспечение создано в среде PRO-Logic Master на языке FBD (МЭК 61131-3), визуализация — в Pro-Screen Master. Реализованная система полностью обеспечивает поддержание нормативных параметров микроклимата в реальном времени и создает базу для дальнейших работ по автоматизации лабораторного комплекса, в частности, для интеграции подсистемы предиктивной диагностики и мониторинга технического состояния оборудования. Использование накапливаемых массивов данных и методов машинного обучения позволит перейти от реактивного обслуживания к упреждающему выявлению признаков выхода из строя компонентов, обеспечивая заблаговременное прогнозирование отказов и тем самым повышая надежность и безопасность эксплуатации вентиляционного комплекса.

### Список литературы

1. Ягьяева Л.Т., Ахметханов А.А. Автоматизированная система управления приточно-вытяжной вентиляцией // Вестник Казанского технологического университета. 2013. Т. 16, № 22. С. 264-266.
2. Rashid F.L., Al-Obaidi M.A., Al Maimuri N.M.L., et al. Mechanical Ventilation Strategies in Buildings: A Comprehensive Review of Climate Management, Indoor Air Quality, and Energy Efficiency. Buildings, 2025. vol. 15. № 14, p. 2579.
3. Пачкин С.Г., Котляров Р.В., Шевцова Т.Г., и др. Разработка автоматизированной системы управления приточно-вытяжной вентиляцией // Modern High Technologies. 2022. № 1. С. 80–84.
4. Горбов В.Ю., Борисова О.В. Система вентиляции с использованием искусственного интеллекта // Тенденции развития науки и образования. 2023. №104-13. С. 40-43.
5. Бояринцев А.Э., Солдатов А.И. Веб-сервер для мониторинга параметров технологических процессов производства // Молодежь и современные информационные технологии: сборник трудов XXII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, 15-17 апреля 2025 г., Томск. Томск: Изд-во ТПУ, 2025. С. 52-54.

## Синтез поисковой системы на основе расширенного алгоритма булевого поиска

### SYNTHESIS OF A SEARCH SYSTEM BASED ON AN EXTENDED BOOLEAN SEARCH ALGORITHM

**Аннотация:** В данной статье выполнен разбор основных этапов проектирования системы информационного поиска, реализующей расширенный булев алгоритм, и выполнен анализ элементов, из которых состоит такая система. Основной целью создания подобных поисковых систем являются оптимизация поиска необходимой информации, корректировка опечаток, а также ранжирование документов, возвращаемых в ответ на запрос пользователя.

**Ключевые слова:** поисковые системы, методы обработки данных, анализ текстовой информации.

**Abstract:** In this article, the main stages of designing an information retrieval system that implements an extended Boolean algorithm are analyzed, and the elements that make up such a system are examined. The main goal of creating such search systems is to optimize the search for necessary information, correct typos, and rank the documents returned in response to a user's query.

**Keywords:** search engines, searching systems, data processing methods, text information analysis.

#### Введение

Информационный поиск, или процесс нахождения информации в большом объеме неструктурированного материала, становится основной формой доступа к информации. Современные поисковые системы должны реализовывать навигацию пользователей по документам, содержащимся в базах данных, фильтрацию, а также дальнейшую обработку найденных документов. Причем базы данных, с которыми работают поисковики, как правило, не имеют ясной, семантически очевидной и легко реализуемой структуры, в отличие от классических реляционных баз данных. Цель поисковой системы – найти в базе документы, которые являются наиболее релевантными по отношению к запросу, причем полученная в процессе поиска выборка документов должна быть упорядоченная таким образом, чтобы в начале полученной выборки стояли те документы, которые лучше всего подходят под запрос.

#### Поисковая система и ее устройство

Опишем алгоритм подготовки базы данных для внедрения в нее поисковой системы и рассмотрим более подробно все элементы, из которых состоит данная система. В начале делается лингвистический разбор и декодировка базы данных текстовых документов в набор лексем. Лексема – это набор последовательности символов, который представляет собой одно слово. При разделении текста на лексемы знаки препинания игнорируются. Как правило, именно знаки препинания и пробелы отделяют одну лексему от другой в тексте [1,2,3]. Далее следует процесс нормализации лексем, цель которого – устранение несуществующей разницы между последовательностями символов. Например, популярное сокращенное название Российской Федерации – РФ, или же Р.Ф. – это эквивалентные лексемы, несмотря на разницу в написании, и наличия двух знаков препинания во втором варианте. То же самое касается и слов синонимов. Таким образом создаются классы эквивалентности лексем. Лексемы внутри одного класса имеют различное написание, но идентичное значение с точки зрения поисковой системы. И, следовательно, поисковая система при соответствующем запросе должна вывести документы, содержащие все лексемы одного класса эквивалентности.

Помимо эквивалентов, возникает вопрос о разных формах одной и той же лексемы за счет разных окончаний одного и того же слова. Поисковая система не должна воспринимать одно и то же слово с разными окончаниями, как две совершенно разные лексемы. Для решения этого вопроса применяются процедуры стемминга, либо лемматизации. Стемминг – это более

<sup>1</sup> Национальный исследовательский университет «МЭИ», Россия, Москва.  
National Research University «MPEI», Russia, Moscow

грубый процесс, в результате которого отбрасываются окончания. Лемматизация – это процесс, в результате которого слово приводится к своей изначальной словарной форме, так называемой лемме. Также составляется список стоп-слов – слов, которые очень часто встречаются во всех текстах и не несут информационной нагрузки, как правило, это предлоги и союзы. Это необходимо для того, чтобы при наличии в запросе стоп-слов, система их игнорировала [2]. Данные задачи выполняются автоматически. Существуют различные лемматизаторы и алгоритмы стемминга. Например, классический алгоритм Портера хорошо оптимизирован под многие языки, в том числе и русский. Однако у данного алгоритма есть недостаток: иногда он удаляет слишком большие части у сложных слов, в результате может потеряться смысл. Также одно из расширений Python, называемое NLTK, имеет встроенный русскоязычный и англоязычный стеммер. Помимо этого, NLTK отлично справляется с автоматическим удалением стоп-слов. В качестве альтернативы используются лемматизаторы, например Rulemma. Данный лемматизатор написан на языке Python.

Далее происходит процесс составления словарей терминов поисковика на основе множества лексем документов базы данных. А также определяется инвертированный индекс – соответствие термина из словаря его словопозиции. Словопозиция показывает номера документов базы, в которых встречается данный документ.

Еще одним важным компонентом поисковой системы является механизм исправления опечаток. При реализации процесса исправления опечаток в тексте пользовательского запроса выбирается ближайший по написанию корректный вариант слов запроса. В случае, если ближайших вариантов два и более, алгоритм поисковой системы должен выбрать тот, который более распространен. В качестве критерия распространенности может приниматься либо количество появления термина в документах базы данных, либо частота использования термина в запросах других пользователей. Чтобы выбрать ближайший по написанию корректный вариант написания слова с опечатками, необходимо вычислить расстояние редактирования - минимальное количество операций, с помощью которых некорректно напечатанное слово можно трансформировать в исправленный вариант. Одной операцией считается вставка нового символа, либо удаление имеющегося символа, либо замена одного символа другим. При этом операции одного и того же типа, могут иметь различную значимость (различный вес). Большой вес присваивается операции с большей правдоподобностью - замена одного символа другим, если они стоят рядом на клавиатуре компьютера. Для расчета степени схожести терминов также может быть использовано  $k$ -граммное индексирование с использованием оценивания по коэффициенту Жаккара. Для этого составляется отдельный индекс  $k$ -грамм, последовательностей, состоящих из  $k$ -символов. Например, последовательность *ve, ek, kt, to, or* является биграммой слова «вектор». Для составления  $k$ -граммного индекса необходимо, чтобы словарь базы данных содержал  $k$ -граммы всех слов, содержащихся во всех документах базы данных, а также словопозиции всех  $k$ -грамм. Для определения степени соответствия между словом с опечатками из запроса и правильными вариантами написания из словаря базы можно использовать коэффициент Жаккара. Коэффициент Жаккара определяется по следующей формуле:

$$K = \frac{w}{x+y-w} \quad (1)$$

где  $x$  – количество  $k$ -грамм в запросе;  $y$  - количество  $k$ -грамм в термине документа;  $w$  – количество совпадений, то есть количество  $k$ -грамм, содержащихся и в запросе, и в термине из базы.

Если значение коэффициента Жаккара превышает заданное пороговое значение, то термин из базы и документы, его содержащие, добавляются в результаты поиска.

Помимо этого, используется отдельный инструмент для исправления ошибок, связанных с фонетикой. Такие ошибки возникают, когда пользователь пишет запрос так, как он его слышит. Для этой цели используется алгоритм фонетического хэширования. Для его создания необходимо сделать дополнительный словарь фонетических форм всех терминов, содержащихся в документах базы данных, а также составить дополнительный инвертированный индекс для поиска исходных документов по фонетическим формам. Также необходимо преобразовать в фонетическую форму термины запроса и выполнить их поиск по полученному инвер-

тированному индексу. Алгоритм фонетического хэширования основан на том, что в транскрипции гласные могут заменять друг друга, а согласные с подобными звуками можно отнести к одному классу эквивалентности. Данный алгоритм сводится к преобразованию терминов, содержащихся в документах базы данных в четырехсимвольное представление. В результате получается четырехсимвольный код, в котором первый символ — это первая буква термина, а остальные три символа - цифры от 0 до 9. Приведем такой алгоритм для английского языка на рис. 1.

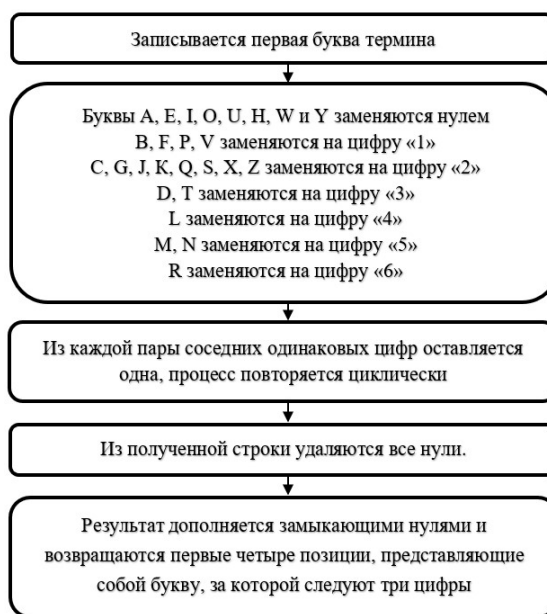


Рис.1. Алгоритм фонетического хэширования

Рассмотрим принцип функционирования модели поисковой системы, основанной на алгоритме булева поиска. Такая система способна находить документы в базе данных, представляя обрабатываемый запрос в виде логического выражения, включающего в себя содержание запроса в сочетании со стандартными булевыми операциями *and*, *or*, *not*. Например, у пользователя, в ответ на поисковый запрос, есть возможность получить выборку документов, которые содержат термин *A* и термин *B*, или термин *A* и термин *C*, но не содержат термин *D*. Расширенный алгоритм булева поиска также позволяет указать, насколько близко должны располагаться термины из запроса в документе базы данных. Например, оператор */k*, прописанный после первого слова означает, что последующее слово должно находиться рядом с первым в документе базы, оператор */s* – что последующее находится в том же предложении, оператор */p* говорит о том, что термины должны находиться в одном абзаце. Еще одной функцией данного алгоритма является возможность использования джокера на случай, если возникают сомнения в правильности написания слова, либо, если необходимо найти все документы, содержащие фрагмент слова из запроса. Данный алгоритм также способен обрабатывать запросы, напечатанные в свободной форме, то есть без операторов – система по умолчанию будет ставить логический элемент *and* либо *or*, в зависимости от того, что будет прописано в алгоритме.

Одним из важных механизмов поисковой системы является ранжирование. Система расширенного булева поиска справляется с этой задачей, но все же не так эффективно, как векторные системы. Ранжирование является довольно важным элементом поисковика, так как нам необходимо, чтобы в ответ на запрос система выдавала упорядоченное множество документов таким образом, чтобы в начале выборки стояли документы, наиболее соответствующие запросу, а ближе к концу стояли документы, которые соответствуют запросу в меньшей степени. Для этого необходимо определить степень соответствия или рейтинг каждого документа по отношению к запросу, иначе говоря – провести взвешивание каждого документа, то есть определить его вес, пропорционально степени релевантности документа запросу. Расширенный алгоритм булева поиска производит взвешивание терминов на основе метаданных доку-

мента, или критериев, по которым система определяет степень релевантности документа запросу. Например, наличие искомого термина в тексте документа, наличие искомого термина в его заголовке, или в списке авторов. Релевантность документа в системе расширенного булева поиска определяется по формуле:

$$R_{q,j} = \sum_{j=1}^n g_j \cdot s_j \quad (2)$$

где:  $q$  – номер запроса;  $n$  – количество метаданных;  $s$  – двоичное число, которое обозначает соответствие или несоответствие запроса  $j$ -тому критерию;  $g$  – вес каждого критерия, при этом каждый  $j$ -тый вес изменяется в диапазоне от нуля до единицы. Сумма всех весов также должна быть равна единице, то есть  $\sum_{j=1}^n g_j = 1$ .

Веса документов определяются методом машинного обучения, на основе тестовой выборки. Веса документов в тестовой выборке определяются экспертами.

Теперь соберем это все вместе в единую структурную схему системы информационного поиска. Структурная схема данной поисковой системы представлена на рис.2

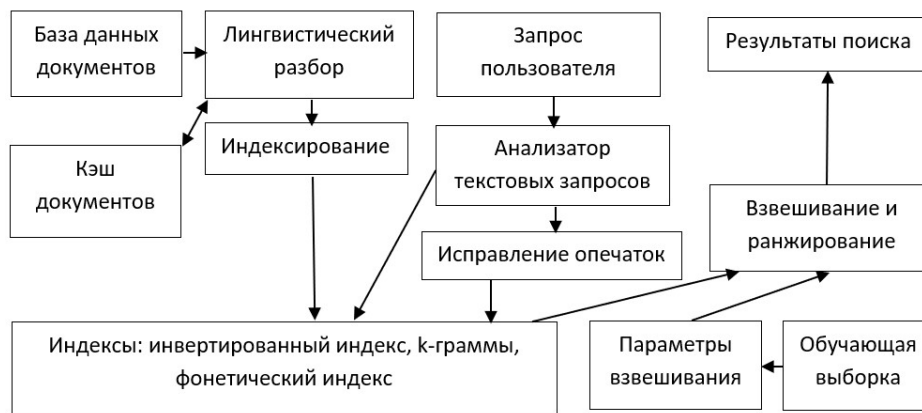


Рис. 2. структурная схема поисковой системы

## Заключение

Булевы системы поиска хорошо зарекомендовали себя во многих сферах, несмотря на свою специфику и на тот факт, что они непривычны и, на первый взгляд, неудобны для пользователя. Запрос получается довольно громоздким – около десяти слов, плюс логические операторы, знаки близости терминов – прописанные через косую черту буквы английского алфавита, значки джокера (как правило – восклицательный знак, либо звездочка). Однако такой поисковик позволяет сделать область поиска более конкретной. Расширенный алгоритм булева поиска эффективен в тех случаях, когда необходимо найти наилучший ответ на запрос относительно документов, содержащих или не содержащих определенные слова. Такая система может быть использована как в качестве локальной поисковой системы, так и в вебе в качестве дополнительной подсистемы, обрабатывающей запросы с булевыми операторами.

## Список литературы

1. Мохов А.С. Анализ и обработка текстовых данных: практикум по курсу «Интеллектуальные информационные системы» для студентов, обучающихся по направлению подготовки магистров 27.04.04 «Управление в технических системах» / А. С. Мохов, В. О. Толчеев, А.А. Бородкин; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Национальный исследовательский университет «МЭИ». – Москва: Изд-во МЭИ, 2020. – 51 с.
2. Мохов А.С. Основы анализа текстовых данных: учебное электронное издание: для студентов, обучающихся по направлению "Бизнес информатика" / А. С. Мохов; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Националь-

ный исследовательский университет "МЭИ", Институт дистанционного дополнительного образования. - Москва: НИУ "МЭИ", 2022. - 1 электрон. опт. диск (CD-ROM); 12 см.; ISBN 978-5-7046-2672-5: 10 дисков

3. Толчеев В.О. Современные методы обработки и анализа текстовой информации: учебное пособие / В.О. Толчеев. Москва: Издательство МЭИ, 2006. – 76 с.

УДК 621.438

<sup>1</sup>Феткуллин Т.Р.

<sup>1</sup>Fetkullin T.R.

### Обработка и получение характеристики надежности турбоагрегата Т-100 основанной на малой выборке

#### Processing and obtaining the reliability characteristics of the T-100 turbounit based on a small sampling

**Аннотация:** В статье рассматриваются методы обработки и оценки характеристик надёжности энергоблока на основе данных малой выборки. Особое внимание уделяется статистическим и вероятностным методам анализа, позволяющим получать достоверные результаты при ограниченном объёме наблюдений. Представлены подходы к обработке данных, оценке отказов и прогнозированию надёжности работы энергоблока в условиях неопределённости. Проведён сравнительный анализ различных методик, выявлены их преимущества и ограничения. Полученные результаты могут быть полезны при диагностике и управлении техническим состоянием энергосистем. Также предложен подход по оптимизации затрат на проведение ремонтных работ.

**Ключевые слова:** надёжность, интенсивность отказов, искусственный интеллект, диагностика энергетического оборудования, энергетика.

**Abstract:** The article examines methods for processing and evaluating the reliability characteristics of a power unit based on small sample data. Special attention is given to statistical and probabilistic analysis methods that enable obtaining reliable results despite the limited volume of observations. The study presents approaches to data processing, failure assessment, and reliability forecasting of the power unit under uncertainty conditions. A comparative analysis of various methodologies is conducted, highlighting their advantages and limitations. The obtained results can be useful for diagnosing and managing the technical condition of power systems. Additionally, an approach to optimizing maintenance costs is proposed.

**Keywords:** reliability, failure rate, artificial intelligence, diagnostics of energy equipment, energy sector.

#### Введение

Современные энергетические установки представляют собой сложные системы с множеством компонентов, что значительно влияет на их надёжность. В связи с этим в процессе эксплуатации электрогенерирующих станций одной из ключевых задач становится оценка надёжности эксплуатируемого оборудования. Диагностика позволяет оценивать текущее состояние оборудования, обеспечивая более обоснованный подход. Для эффективной диагностики особое внимание уделяется параметрам, которые обеспечивают достоверную и избыточную информацию о техническом состоянии системы в условиях реальной эксплуатации. На практике, как правило, используется комплекс диагностических показателей. К таким параметрам могут относиться характеристики рабочих процессов (мощность, напряжение, ток и др.), сопутствующие процессы, геометрические размеры и другие величины. Объем измеряемых параметров зависит, в том числе, от типов используемых измерительных приборов [4].

---

<sup>1</sup> Национальный исследовательский университет «МЭИ», Россия, Москва.  
National Research University «MPEI», Russia, Moscow.

Существует объективная необходимость совершенствования технологии ремонтно-эксплуатационного обслуживания паровых турбин, частично отработавших производственный срок, в направлении продления безотказной эксплуатации.

### Основная часть

В качестве объекта исследования был выбран турбоагрегат Т-100-130. Турбина представляет собой трёхцилиндровый одновальный агрегат, состоящий из цилиндра высокого давления (ЦВД) с двухвенечной регулирующей ступенью и восьмью ступенями давления, цилиндра среднего давления (ЦСД), состоящего из 14-ти ступеней давления и двухпоточного цилиндра низкого давления (ЦНД), имеющего по две ступени в каждом потоке, ЦВД выполнен противоточным по отношению к ЦСД.

Парораспределения турбины сопловое, с четырьмя регулирующими клапанами. Турбина имеет два регулируемых отопительных отбора пара – верхний (после 12 ступени ЦСД) и нижний (за последней 14 ступенью ЦСД), предназначенных для ступенчатого подогрева сетевой воды в подогревателях

Режим работы турбоагрегата может быть:

- Конденсационным (с отключёнными верхними и нижними регулируемыми отборами пара);
- Одноступенчатым (с включённым нижним регулирующим отбором пара при подогреве сетевой воды в сетевом подогревателе первой ступени регулируемое давление поддерживается в нижнем отборе);
- Двухступенчатом (с включённым верхним и нижним отборами пара при последовательном подогреве сетевой воды в подогревателях 1 и 2 ступени и поддержании соответствующего значения регулируемого давления в верхнем отборе путём воздействия на регулирующую диафрагму ЦНД).

Среди причин вывода из работы энергетического оборудования одно из первых мест занимает износ. Значительная часть паровых турбин электростанций работает за пределами своего заложенного ресурса. Основной задачей является сбор и анализ информации о техническом состоянии турбоагрегата, фиксация отказов и изучение эксплуатационных параметров в межремонтный период, а также оценка надежности функционирования оборудования.

Анализ отказов оборудования электростанций в прошлые годы по стране в целом и по отдельным энергосистемам проводился на основе представляемой информации – актов расследования аварий и инцидентов, карт отказов, отчетов об аварийности оборудования и др. В диаграмме 1 приведена статистика по отказам турбины Т-100-130.



Диаграмма 1

Следуя данным из диаграммы, можно предположить проведение капитального ремонта на рубеже 2019-2020 годов, поскольку после этого количество отказов резко снизилось.

Расчет показателей надежности ТЭЦ представляется чрезвычайно важным, но он осложняется трудностями, вызванными целым рядом причин [6]:

- многообразии конфигурации технологической схемы и наличие в ней большого числа элементов;
- наличие в технологической схеме элементов, зависящих друг от друга, с точки зрения функционирования;
- зависимость надежности ТЭЦ от режима её работы;
- отсутствие информации об отказах отдельных элементов, узлов и недостаточная её достоверность.

Последнее представляет особенную сложность в текущих реалиях. Анализ при ограниченном объеме данных представляет собой важную задачу в области энергетики, статистики и научных исследований. Малые выборки часто возникают в ситуациях, когда сбор данных затруднен, например, при оценке надежности энергетических систем. Работа с ограниченным числом наблюдений накладывает определённые ограничения и требует применения специализированных методов анализа. Например, традиционные статистические подходы — стандартные проверки гипотез или регрессионные модели — могут давать недостоверные результаты из-за высокой вариативности данных. Вместе с тем существуют специальные методики, позволяющие сократить риски ошибочных выводов и извлекать полезную информацию даже при малом объеме данных. В энергетике проблема малых выборок особенно актуальна. При анализе и исследовании отказов оборудования нередко доступен лишь ограниченный набор данных. Тем не менее, при грамотном подходе можно проводить эффективный прогноз технологической эффективности, оптимизировать ресурсное планирование и снизить затраты на проведение исследований. Среди применяемых методов — стохастическое моделирование, экспертные оценки и байесовские алгоритмы, которые помогают компенсировать нехватку данных и обеспечивать достоверность прогнозов.

Также, присутствует ряд характерных проблем, связанных с анализом малых выборок. Прежде всего, такие данные подвержены значительным случайным колебаниям, что увеличивает риск ошибок и снижает надежность выводов, поскольку дисперсия оценок в них существенно выше, чем в больших выборках. Кроме того, ограниченность данных снижает репрезентативность, что может привести к тому, что выборка не будет отражать характеристики всей совокупности, вызывая смещение результатов и неправильные заключения. Еще одна трудность — низкая статистическая мощность, из-за которой становится сложнее выявить слабые эффекты, а вероятность ошибок второго рода возрастает. Это препятствует обнаружению реальных закономерностей. Также малый объем данных ограничивает возможности применения сложных моделей машинного обучения, так как они требуют большого количества наблюдений для адекватного обучения и предотвращения переобучения. Наконец, большинство классических статистических тестов предполагают наличие достаточно большого объема данных, что делает необходимым применение альтернативных методов, таких как бутстрап или байесовский анализ, при работе с малыми выборками.

Оптимизация затрат на ремонт энергетического оборудования является важной задачей для предприятий энергетической отрасли. Анализ данных об отказах оборудования позволяет минимизировать расходы, повысить надежность и продлить срок службы техники. Рассмотрим подход к оптимизации ремонтных затрат на основе анализа отказов.

Предложенный подход включает следующие этапы:

1. Сбор и анализ данных о техническом состоянии оборудования – регистрация отказов, анализ параметров эксплуатации.
2. Оценка надежности и прогнозирование отказов – использование статистических и аналитических методов для предсказания вероятности выхода из строя.
3. Определение оптимального времени ремонта – расчет на основе экономических показателей и уровня деградации оборудования.

Экономический критерий оптимальности учитывает: индекс равновесных цен, цены на материалы и услуги, затраты, связанные с вынужденным простоем оборудования. [1]

Целевой функцией выступает маржинальная прибыль и ее максимизация на каждом этапе оптимизации:

$$M_t = \sum_{t=1}^{24} \sum_{i=1}^n ((D_{tNi} + D_{tQit}) - (\sum_{k=1}^K 3_{tiK,(N*i*Qit)} + 3_{i\text{пуск}} + 3_{i\text{над}})), (1)$$

В расчетную формулу маржинальной прибыли входят следующие составляющие:

$D_{tNi} = N_{ti} * C_{tээ}$  – часовой доход от продажи электроэнергии для  $i$ -ого агрегата;

$D_{tQit} = Q_{tiT} * C_{QT}$  – часовой доход от продажи тепловой нагрузки  $i$ -ого агрегата;

$Z_{tiK,(N*i*Qit)}$  – часовые затраты на  $k$ -тый вид топлива стационарного процесса для любого  $i$ -ого агрегата при заданном значении  $Q_i$ ;

$Z_{iпуск}$  – затраты на пусковые операции  $i$ -ого агрегата. [5]

$$Z_{инад} = q_i Y_i$$

Где  $q_i$  – вероятность отказа  $i$ -го рассматриваемого агрегата;

$Y_i$  – ущерб от отказа (аварийного останова)  $i$  – го рассматриваемого агрегата.

Ущерб от отказа (аварийного останова)  $i$  – го рассматриваемого агрегата:

$$Y_i = (N * C_N * t + \Xi_{it} * C_{эбр}) \quad (2)$$

$N$  – недоотпуск располагаемой мощности  $i$  – го рассматриваемого агрегата при выходе его из строя, кВт;

$C_N$  – цена мощности  $i$  – го рассматриваемого агрегата, руб/кВт за час;

$\Xi_{it}$  – величина недоотпуска электроэнергии  $i$  – го рассматриваемого агрегата, кВтч;

$C_{эбр}$  – цена электроэнергии на балансирующем рынке, руб/кВтч;

$t$  – продолжительность отказа (время до конца суток).

Применение предложенного подхода позволяет минимизировать затраты на обслуживание, одновременно поддерживая высокий уровень надежности оборудования.

### Заключение

Работа с малыми выборками сопровождается как определёнными трудностями, так и возможностями. Несмотря на то, что небольшое количество данных может снижать достоверность выводов, использование специализированных аналитических методов позволяет снизить риск ошибок и максимально эффективно задействовать имеющуюся информацию. Для получения качественных результатов в условиях ограниченности данных необходимо комбинировать различные подходы — от статистических методов до алгоритмов машинного обучения и экспертных оценок. Кроме того, следует учитывать особенности исследуемой области и, при необходимости, использовать объединённые данные из разных источников. Подводя итог, анализ малых выборок требует вдумчивого выбора методологии и тщательного подхода к работе с данными. Современные инструменты и внимание к контексту позволяют успешно решать задачи даже при ограниченных объёмах информации, что особенно актуально в сферах энергетики и научных исследований.

### Список литературы

1. ГОСТ 27.002-2015 Надежность в технике. Основные понятия и определения.
2. Smith A.M. Reliability-Centered Maintenance. McGraw-Hill, 2005.
3. Фомин В.В., Сидоров А.А. Прогнозирование технического состояния энергетического оборудования. – М.: Энергетика, 2018.
4. Байнов, А. М. Повышение надежности работы основного оборудования ТЭС с помощью анализа и прогнозирования индекса технического состояния / А. М. Байнов, Л. В. Плотникова // КИП и автоматика: обслуживание и ремонт. – 2022. – № 1. – С. 6-8. – EDN TQMZEA.
5. Ягупова Ю.Ю. Разработка методических положений оптимального распределения тепловой и электрической нагрузок тэс с учетом факторов надежности, экономичности и текущего технического состояния сетевых подогревателей. – НИУ МЭИ 2022 Диссертация.
6. Андрюшин А.В. Совершенствование организации и управления системы технического обслуживания и ремонта оборудования ТЭС // диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Московский энергетический институт, Москва, 2002. – 410 с.

**Использование метода определения статизма и мертвой полосы  
первичного регулирования при оценке реального участия ТЭС  
в нормированном первичном регулировании частоты**

**The use of the method for the primary frequency control droop  
And deadband estimation in assessing the actual participation of thermal power  
plants in the standardized primary frequency control**

**Аннотация:** Генерирующее оборудование электростанций, участвующих в нормированном первичном регулировании частоты в энергосистеме, должно соответствовать определенным требованиям, формализованным в виде нескольких критериев, которые используются для контроля участия электростанций в регулировании частоты. Один из критериев - оценка фактических значений мертвой полосы и статизма первичного регулирования. В статье описаны опыт оценки статических характеристик генерирующего оборудования ТЭС при реальном участии в нормированном первичном регулировании частоты и проведенный анализ особенностей этих характеристик.

**Ключевые слова:** регулирование частоты, статизм, методика оценки.

**Abstract:** Operation of thermal power plant (NPP) generation equipment, which participates in standardized primary frequency control (SPFC), must meet specific requirements. These requirements are formalized as a number of criteria, which are used for monitoring of TPP participation in frequency control. One of these criteria - primary frequency control droop and deadband actual values estimation. This paper describes the experience of evaluating the governing characteristics of TPP generating equipment with real participation in SPFC.

**Keywords:** frequency control, droop, estimation method.

В настоящее время достаточно большое количество тепловых электростанций (ТЭС) России участвует в нормированном первичном регулировании частоты (НПРЧ) в энергосистеме [1]. Генерирующее оборудование таких ТЭС должно соответствовать определенным требованиям. Для оценки соответствия этим требованиям используется набор критериев. Один из критериев – соответствие/несоответствие фактических значений мертвой полосы и статизма первичного регулирования требуемым значениям [2].

Мертвая полоса первичного регулирования - задаваемое значение отклонения частоты от номинального значения, при котором не происходит первичного регулирования. Минимальное значение мертвой полосы равно зоне нечувствительности первичного регулирования.

Статизм первичного регулирования - коэффициент, определяющий зависимость изменения активной мощности электрогенератора под воздействием регулятора частоты вращения турбины (регулятора мощности) от изменения частоты.

Для выполнения оценки по исходным значениям частоты вращения турбины  $f$ , заданной плановой мощности  $N_{пл}$ , фактической мощности  $N_{факт}$  и номинальной мощности  $N_{ном}$  рассчитываются величины  $\Delta f$  и  $\Delta N$  (отклонение частоты от номинального значения и отклонение мощности от значения планового задания):

$$\Delta f_i = f_i - 50 \quad (1)$$

$$\Delta N_i = \frac{N_{факт,i} - N_{пл,i}}{N_{ном}} \cdot 100 \quad (2)$$

По этим данным строится «облако точек»  $\Delta f$ ,  $\Delta N$ , дающее представление о статической характеристике первичного регулирования оцениваемого энергоблока (турбоагрегата). Пример «облака точек» представлен на рисунке 1.

<sup>1</sup> ООО «Центр энергетических исследований РАМЗИН», г. Москва  
LLC «Power engineering research center RAMZIN»

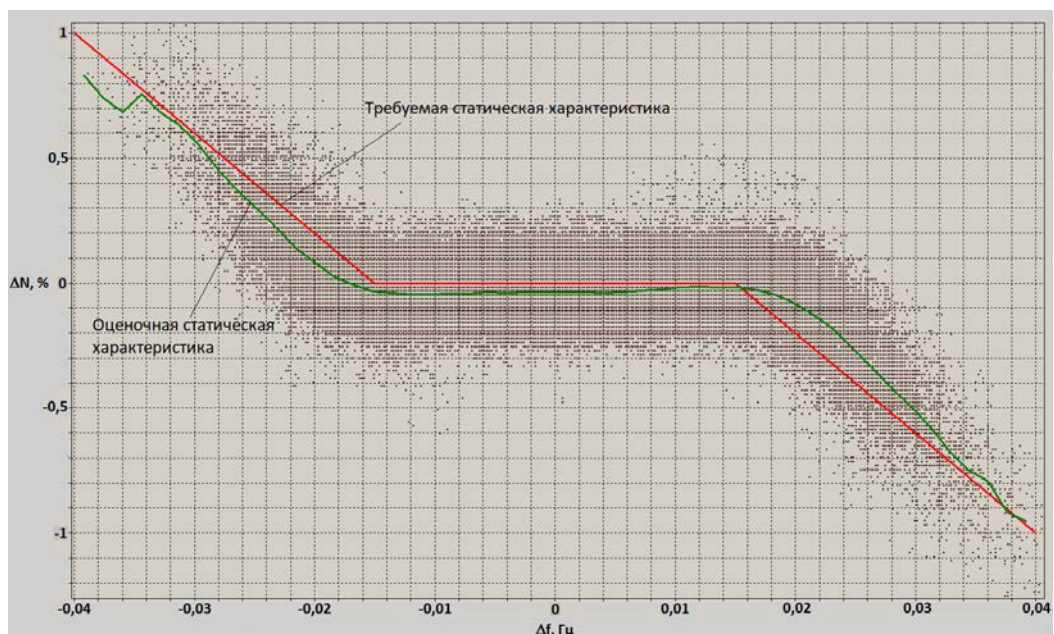


Рис. 1. «Облако точек» для энергоблока ст. №4 Шатурской ГРЭС

Для оценки фактических значений статизма и мертвой полосы в настоящее время используются статистические методы обработки данных, которые не во всех случаях работают корректно. Авторами статьи был предложен альтернативный метод расчёта, на базе которого была разработана программа, позволяющая проводить оценку статизма и мёртвой полосы [2, 3, 4]. Уже несколько лет этот метод успешно применяется на практике для оценки и анализа работы ТЭС, участвующих в НПРЧ (паросиловых и парогазовых энергоблоков, ТЭС с поперечными связями по воде и пару).

На основании опыта проведения оценки статизма и мёртвой полосы первичного регулирования при работе оборудования ТЭС в режиме НПРЧ можно выделить ряд особенностей, которые могут наблюдаться у «облаков точек»:

- оценка статизма не соответствует требуемому значению;
- оценка статизма левой части статической характеристики (это соответствует увеличению мощности) заметно отличается от оценки статизма правой части статической характеристики (это соответствует уменьшению мощности);
- заметный шаг дискретности значений частоты или мощности;
- смещение «облака точек» по оси отклонений мощности относительно начала координат.

Ниже будет подробнее рассмотрена каждая из особенностей.

При фактической работе оборудования в режиме НПРЧ оценка значения статизма, как правило, отличается от требуемого значения. Например, оценочное значение может составлять 6% в отличие от требуемого значения 5%. В этом случае фактическое изменение мощности будет меньше требуемого на 0,1...0,2% от номинальной мощности энергоблока (при фактических отклонениях частоты, как правило, редко превышающих 0,03 Гц). Это немного по сравнению с требуемой точностью поддержания мощности, равной 1% от номинальной мощности энергоблока. Также необходимо отметить, что во время испытаний статизм оценивается при ступенчатом отклонении частоты на 0,05 Гц, а оценка фактического участия выполняется по реальным отклонениям, значения которых меньше, и они постоянно меняются. Данные, иллюстрирующие влияние значения статизма на изменение мощности представлены в таблице 1.

Изначально в нормативных требованиях значение допустимого отклонения статизма от требуемого было задано равным 1% (в абсолютных единицах измерения статизма). По представленным выше результатам анализа погрешности оценки допустимое отклонение статизма в нормативных требованиях было увеличено с 1% до 1,5%.

Таблица 1. Влияние значения статизма на изменение мощности

Отклонение частоты, Гц	Изменение мощности при S=5%, %	Изменение мощности при S=6%, %	Разница изменений мощности, %	Примечание
0,01	0,4	0,33	0,07	Типичные отклонения для реального участия
0,02	0,8	0,67	0,13	
0,03	1,2	1,00	0,20	
0,05	2	1,67	0,33	Отклонения во время испытаний
0,125	5	4,17	0,83	
0,25	10	8,33	1,67	

Практические во всех случаях оценка статизма левой части статической характеристики отличается от оценки статизма правой части статической характеристики. Разница может быть небольшой (например, 0,5%), а может быть более заметной (до 2%). Это различие говорит о том, что скорость изменения мощности не одинакова при разгрузке и нагрузке энергоблока. Это связано с тем, что динамические характеристики процессов изменения расхода и давления пара не одинаковы при увеличении и уменьшении мощности. Своё влияние оказывают и характеристики регулирующих клапанов турбины, значение текущей мощности энергоблока (в верхней, средней или нижней части регулировочного диапазона), зависящее от расхода пара на турбину и других технологических параметров.

В некоторых случаях хорошо заметна дискретность значений частоты или мощности. Эта дискретность записи значений параметров в архив, она не должна превышать значений, установленных нормативными документами (0,001 Гц для частоты вращения и 0,1% от номинальной мощности агрегата для электрической мощности). Пример «облака точек» с хорошо заметной дискретностью значений частоты, превышающей нормативные требования, представлен на рисунке 2.

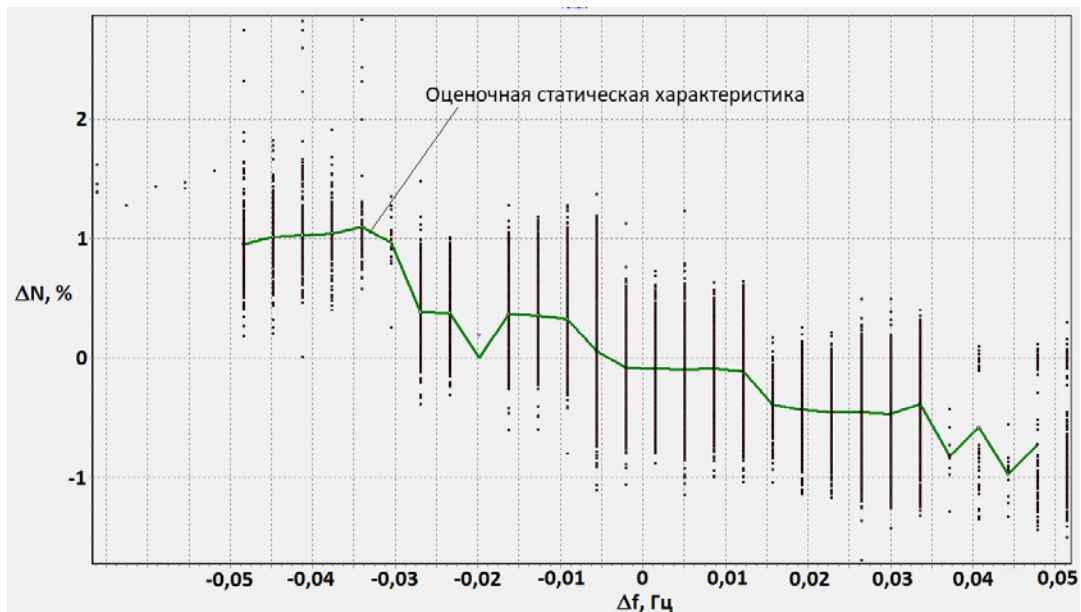


Рис. 2. «Облако точек» для энергоблока ПГУ Ижевской ТЭЦ-1

Довольно часто наблюдается смещение «облака точек» по оси отклонений мощности относительно начала координат. В таких случаях видно, что в каждый момент времени фактическая мощность отличается (чаще в большую сторону) от плановой на некоторое значение (обычно 0,2-0,5% от номинальной мощности энергоблока). Такая разница присутствует и при работе оборудования на постоянной нагрузке, и в режимах изменения нагрузки. Пример смещенного «облака точек» представлен на рисунке 3.

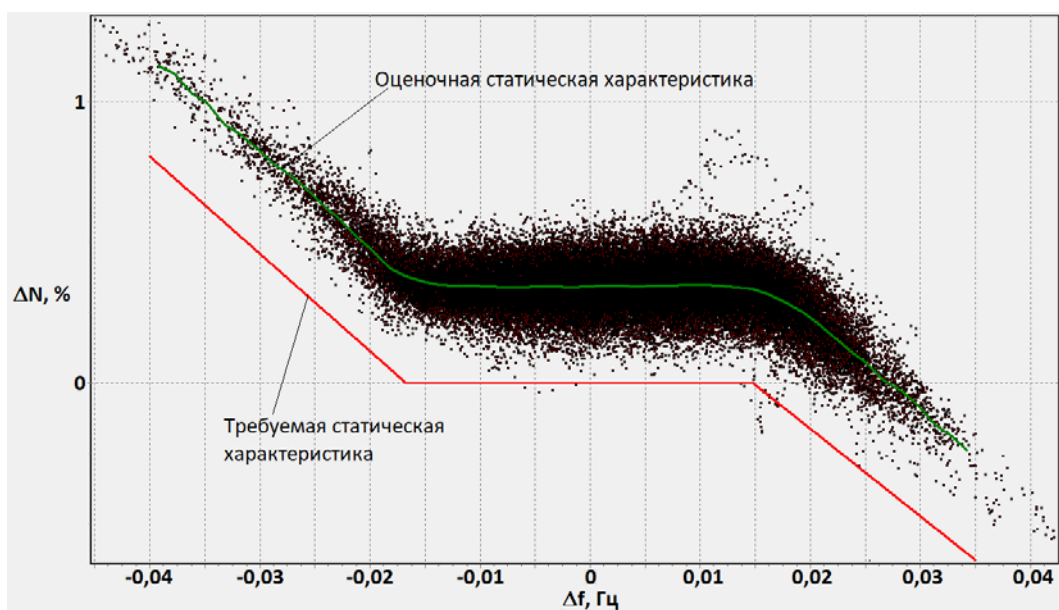


Рис. 3. «Облако точек» для энергоблока ПГУ Ново-Салаватской ТЭЦ

Это связано с тем, что на ТЭС используются разные приборы измерения мощности для использования в системе управления и в системе коммерческого учёта. Значения, измеренные этими приборами, отличаются. Скорее всего, это связано с тем, что для поддержания значения мощности в соответствии с показаниями приборов коммерческого учёта к значению заданной плановой мощности добавляется специальная поправка, и суммарный сигнал задания поступает в алгоритм регулирования мощности. При этом для оценки фактических значений статизма и мёртвой полосы используется сигнал заданной плановой мощности без поправки и значения измеренной мощности, используемой в системе управления. Это и создаёт смещение «облака точек».

Из-за этого оценка статизма статистическими методами может быть выполнена некорректно, его значение может как занижаться, так и завышаться. Для корректного выполнения оценки должен использоваться тот сигнал заданной плановой мощности, в котором учитываются необходимые поправки.

Опыт проведения оценки работы оборудования ТЭС позволяет сделать выводы о корректности работы разработанного авторами алгоритма, позволяет выявить особенности «облаков точек», характеризующие соответствие или отклонение от нормативных значений показателей работы оборудования ТЭС в режиме НПРЧ. На основании выполняемого анализа «облаков точек» формулируются рекомендации персоналу ТЭС по внесению корректировок в алгоритмы контроля и управления оборудованием ТЭС.

### Библиография

1. ГОСТ Р 55890-2013. Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы. Оперативно-диспетчерское управление. Регулирование частоты и потоков активной мощности. Нормы и требования. М.: Стандартинформ, 2014. 20 с.
2. Никифоров А.А. Оптимизация оценки фактических значений статизма и мертвой полосы первичного регулирования частоты // Тинчуринские чтения. Материалы XIV Международной молодежной научной конференции. В 3-х томах. Под общей редакцией Э.Ю. Абдуллазянова. 2019. С. 234-240.
3. Никифоров А.А., Чаплин А.Г., Зорченко Н.В. Методика определения фактических значений статизма и «мертвой полосы» первичного регулирования оборудования ТЭС // Теплоэнергетика. 2021. № 8. С. 64-71.
4. Nikiforov A.A., Chaplin A.G. Developing of method for primary frequency control droop and deadband actual values estimation // Journal of Physics: Conference Series. 2017. С. 012291.

### Способ регулирования параметров дутья на фурме доменной печи дожимным нагнетателем

#### A method for controlling blast parameters at the tuyere of a blast furnace using a booster blower

**Аннотация:** Целью настоящей работы является экспериментальное подтверждение возможности регулирования дожимным нагнетателем и исследование динамических режимов совместной работы двух агрегатов с помощью имитационного моделирования. Разработанная имитационная модель в SimInTech позволяет исследовать динамические режимы совместной работы двух агрегатов. Предложенный способ регулирования с дожимным нагнетателем расширяет возможности регулирования турбокомпрессора, перераспределяя нагрузку и снижая мощность на валу основного турбокомпрессора.

**Ключевые слова:** турбокомпрессор, дутьё, дожимной нагнетатель, способ регулирования, имитационное моделирование.

**Abstract:** The aim of the study is to experimentally confirm the possibility of control using a booster blower and to investigate the dynamic modes of joint operation of two units using simulation modeling. The developed simulation model in SimInTech makes it possible to study the dynamic modes of joint operation of two units. The proposed control method with a booster blower expands the control capabilities of the turbocharger by redistributing the load and reducing the power on the shaft of the main turbocharger.

**Keywords:** turbocharger, blast, booster blower, control method, simulation modeling.

#### ВЕДЕНИЕ

Стабильная и безопасная работа доменной печи металлургических комбинатов невозможна без обеспечения ее сжатым воздухом, обогащённым кислородом (дутьём). Для этого на паровоздуховных станциях (ПВС) используются турбокомпрессоры (ТК), традиционные способы регулирования которых либо недостаточно гибки, либо энергозатратны [1].

В связи с этим актуальной является задача поиска новых способов регулирования, позволяющих расширить диапазон регулирования параметров дутья и повысить энергоэффективность системы воздушоснабжения доменной печи.

Целью настоящей работы является экспериментальное подтверждение возможности регулирования дожимным нагнетателем и исследование динамических режимов совместной работы двух агрегатов с помощью имитационного моделирования.

#### МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объекта исследования выбран центробежный турбокомпрессор К5500-41-1М производства АО «Невский Завод», г. Санкт-Петербург, эксплуатирующийся на одном из металлургических комбинатов страны. Настоящие способы регулирования агрегатом ограничены изменением частоты вращения ротора и сбросом в атмосферу при помощи воздушно-разгрузочного клапана (СНОРТ).

Проведенные промышленные испытания [2] с целью исследования режимов работы двух компрессоров с разными характеристиками для обеспечения дутьём с требуемыми параметрами на фурме доменной печи показали, что использование второго нагнетателя расширяет возможности регулирования турбокомпрессора.

---

<sup>1</sup> ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина», кафедра Систем управления  
Ivanovo State Power Engineering University named after V.I. Lenin,  
Department of Control Systems  
2 ООО НТЦ «Промышленная Энергетика»  
STC "Industrial Power Energy" LLC

Подключенные параллельно два нагнетателя образуют узел смешения, в котором поток от основного нагнетателя (K5500-41-1M) при смешении потоков с дожимным нагнетателем (компрессор, коллектор сжатого воздуха) затормаживается, вследствие чего давление на нагнетании увеличивается, а расход основного нагнетателя уменьшается. Нехватка расхода компенсируется дожимным нагнетателем. Процесс происходит из-за возникновения местного сопротивления в узле смешения [3,4].

Для моделирования работы двух нагнетателей выбрана среда динамического моделирования SimInTech. Использование теплогидравлического HS-кода [5] для расчета динамики поведения основных параметров сжимаемой среды позволяет разработать имитационную модель (рис. 1) технологической цепочки «ПВС – доменная печь» с дожимным нагнетателем.

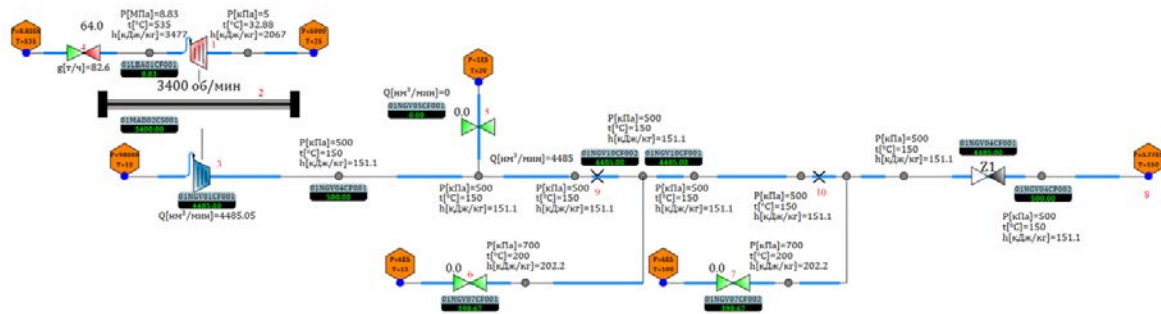


Рис. 1. Имитационная модель технологической цепочки «ПВС – доменная печь»: 1 – паровая турбина К-22-90-2М; 2 – ротор; 3 – компрессор К5500-41-1М; 4 – регулирующий паровой клапан; 5 – воздушно-разгрузочный клапан (ШОПТ); 6 – регулирующий клапан станции кислородного обогащения; 7 – регулирующий клапан дожимного нагнетателя; 8 – потребитель (доменная печь); 9, 10 – местное сопротивление

## ОСНОВНОЙ РЕЗУЛЬТАТ

Разработанная имитационная модель [6] позволяет исследовать статические и динамические режимы совместной работы основного и дожимного нагнетателей, в том числе с автоматическим регулированием частоты вращения ротора.

При поддержании заданного расхода у потребителя ( $Q_{\text{потреб}}=4850 \text{ м}^3/\text{мин}$ ) частотой вращения и открытии регулирующего клапана дожимного нагнетателя для повышения давления (рис. 2, а) на фурме доменной печи на +6 кПа (изменение давления с 534 до 540 кПа), частота вращения ротора (рис. 2, б) снижается на 80 об/мин, что составляет примерно 9% мощности на валу.

В динамической модели обороты подстраиваются под новые условия, и система автоматически перераспределяет нагрузку между основным и дожимным нагнетателями.

Имитационное моделирование показало, что совместная работа двух нагнетателей при автоматическом регулировании расхода является двухсвязной системой («обороты – объемный расход дутья», «дожимной нагнетатель – давление дутья»).

Полученные результаты позволяют перейти к следующему этапу исследований – разработке автоматической системы регулирования (АСР), обеспечивающей стабилизацию расхода и давления у потребителя, минимизацию взаимного влияния каналов и безаварийную работу турбокомпрессора.

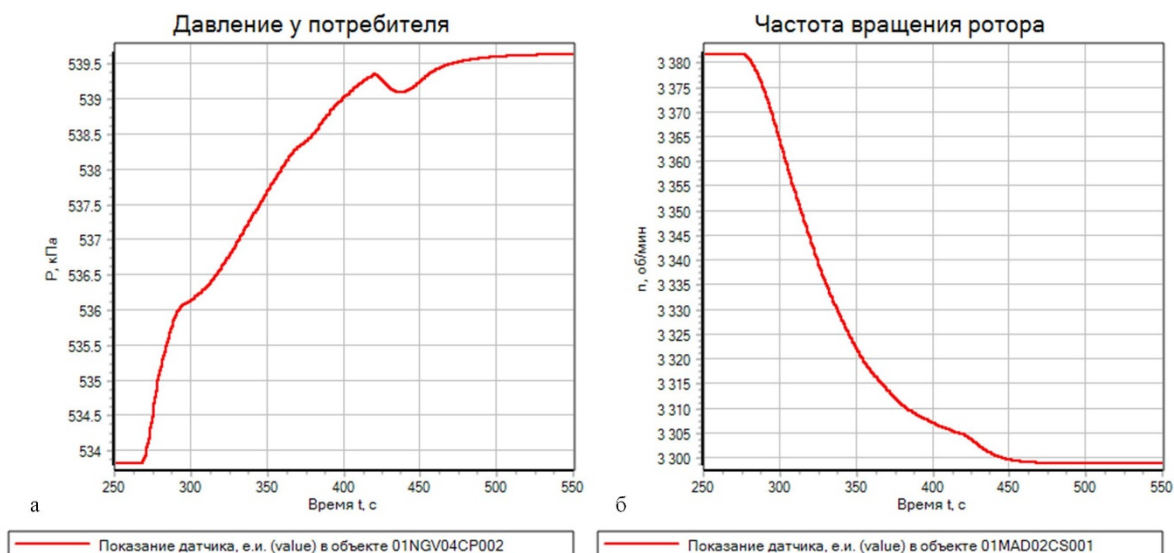


Рис. 2. а – изменение давления на фурме доменной печи; б – изменение частоты вращения ротора паровой турбины

## ВЫВОДЫ

Разработанная имитационная модель в SimInTech позволяет исследовать динамические режимы совместной работы двух агрегатов.

Показано, что использование дожимного нагнетателя расширяет возможности регулирования турбокомпрессора, перераспределяя нагрузку и снижая мощность на валу основного турбокомпрессора.

Выявлена двухсвязная структура системы, что требует дальнейшей разработки многосвязной АСР давления и расхода.

## Список литературы

1. Проектирование и эксплуатация промышленных центробежных компрессоров / Хисамеев И.Г., Максимов В.А., Баткис Г.С., Гузельбаев Я.З. – Казань: Изд-во «ФЭН», 2010. – 671 с.
2. Исследование режимов работы двух компрессоров с разными характеристиками для обеспечения дутьём доменной печи / Шомов П.А., Краснов О.Г., Кулагин С.М., Шинкевич Д.А., Сурков М.Д. // Промышленная энергетика. – 2026. – № 2. – с. 22-32. DOI: 10.71759/3s9d-py15.
3. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям, под ред. М.О. Штейнберга. - 3-е изд. перераб. и доп.-М.: Машиностроение. – 1992. – 622 с.: ил.
4. Прандтль Л. Гидроаэромеханика / пер. с нем. Г.А. Вольперта. – 2-е изд., испр. и доп. — М.; Л.: Изд-во иностр. лит., 1951. — 575 с.
5. Щекатуров А.М. Корсаков А.Р. SimInTech: Методика моделирования динамики паротурбинной установки – Москва: ДМК Пресс, 2021. – 242 с.
6. Прогнозирование рабочей точки центробежного турбокомпрессора и совершенствование алгоритма АСУТП противоположной защиты на основе математического моделирования / Шомов П.А., Шинкевич Д.А., Муравьев И.К., Кулагин С.М., Праньков Д.А. // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2025. – № 4. – с. 12-18.