

## **Применение искусственной нейронной сети для повышения точности настроек регуляторов ИТП на примере зданий высшей школы**

**С. В. Гужов<sup>1</sup>, А. А. Арбатский<sup>2</sup>, Е. В. Крылова<sup>1</sup>, Д. З. Дзахмишева<sup>1,3</sup>**

<sup>1</sup>Национальный исследовательский университет «МЭИ»,

<sup>1</sup>11250, г. Москва, Красноказарменная улица, дом 14, стр. 1, Россия,

<sup>2</sup>НИИ «Энергоэффективных технологий микроклимата»,

<sup>2</sup>390029, г. Рязань, ул. Чкалова, д. 68В, помещ. НЗ, офис 213, Россия,

<sup>3</sup>АО «Атомэнергопроект»,

<sup>3</sup>107996, г. Москва, ул. Бакунинская, д. 7, стр. 1., Россия

**Резюме. Цель.** Целью исследования является создание системы поддержки принятия решений (СППР), позволяющей автоматически производить анализ информации от датчиков, обрабатывать статистический материал и сигнализировать оператору о необходимости программирования PLC с предоставлением результатов расчётов о прогнозируемом техническом и экономическом эффекте на основе применения искусственной нейронной сети. **Метод.** Исследование основано на методах построения интеллектуальных систем управления технологическими процессами и производствами. **Результат.** Выполнено исследование возможностей повышения эффективности АСУ ТП за счет повышения точности настроек регуляторов ИТП. Рассмотрен метод повышения точности АСУ ТП посредством применения ИНС. Предложено выполнять прогнозный расчёт из прогнозов гидрометцентра с периодом прогнозирования на 4-6 часов вперёд. Предложен набор дополнительных датчиков, необходимых для повышения точности прогноза. Дополнительные капитальные затраты окупятся за 2 отопительных периода. **Вывод.** Рассмотрены существующие подходы к цифровизации методов управления теплоэнергетическим оборудованием. Применение искусственной нейронной сети позволяет повысить точность настроек регуляторов ИТП.

**Ключевые слова:** автоматизированная система регулирования, приточно-вытяжная вентиляционная установка, индивидуальный тепловой пункт, увлажнитель, датчик

**Для цитирования:** С.В. Гужов, А.А. Арбатский, Е.В. Крылова, Д.З. Дзахмишева. Применение искусственной нейронной сети для повышения точности настроек регуляторов ИТП на примере зданий высшей школы. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2026;53(1):49-55. DOI:10.21822/2073-6185-2026-53-1-49-55

## **Using an artificial neural network to improve the accuracy of IHP controller settings using the example of higher education buildings**

**S.V. Guzhov<sup>1</sup>, A. A. Arbatsky<sup>1</sup>, E.V. Krylova<sup>1</sup>, D.Z. Dzakhmisheva<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>National Research University "Moscow Power Engineering Institute",

<sup>1</sup>14 Krasnokazarmennaya St., Bldg. 1, Moscow 11250, Russia,

<sup>2</sup> Research Institute of Energy-Efficient Microclimate Technologies,

<sup>2</sup> 68V Chkalova St., Room N3, Office 213, Ryazan 390029, Russia,

<sup>3</sup>АО Atomenergoproekt,

<sup>3</sup>7 Bakuninskaya St., Moscow 1107996, Russia

**Abstract. Objective.** The objective of the study is to create a decision support system (DSS) that automatically analyzes sensor data, processes statistical data, and alerts the operator to the need for PLC programming, providing calculation results on the predicted technical

and economic effect using an artificial neural network. **Method.** The study is based on methods for constructing intelligent control systems for technological processes and production. **Result.** The study examined the possibilities of increasing the efficiency of the automated process control system by improving the accuracy of the IHP controller settings. A method for improving the accuracy of the automated process control system by using an artificial neural network is considered. It is proposed to perform forecast calculations based on hydrometeorological center forecasts with a forecast period of 4-6 hours ahead. A set of additional sensors necessary for improving the forecast accuracy is proposed. The additional capital expenditures will pay for themselves within 2 heating periods. **Conclusion.** Existing approaches to the digitalization of heat power equipment control methods are considered. The use of an artificial neural network allows for increasing the accuracy of the IHP controller settings.

**Keywords:** automated control system, supply and exhaust ventilation unit, individual heating substation, humidifier, sensor

**For citation:** S.V. Guzhov, A.A. Arbatsky, E.V. Krylova, D.Z. Dzakhmisheva. Using an artificial neural network to improve the accuracy of IHP controller settings using the example of higher education buildings. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2026;53(1):49-55. (In Russ) DOI:10.21822/2073-6185-2026-53-1-49-55.

**Введение.** В условиях стремительного развития современных технологий и роста требований к качеству управления инженерными системами, автоматизация становится неотъемлемой частью обеспечения эффективной работы объектов инфраструктуры.

Одним из ключевых направлений автоматизации является создание автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП), которые позволяют оптимизировать работу инженерных систем и повысить их надежность. Проблема является актуальной, например, для зданий крупных высших образовательных учреждений, где энергопотребление и эксплуатационные расходы играют важную роль в обеспечении учебного процесса и комфорта студентов и преподавателей.

Автоматизированная система управления технологическими процессами представляет собой комплекс программно-технических средств, необходимых для управления различными технологическими процессами.

В контексте теплоснабжения АСУ ТП включает сбор данных о состоянии оборудования, контроль параметров процесса, а также выполнение управляющих воздействий для поддержания оптимального режима работы системы.

В компоненты АСУ ТП входят датчики и измерительные приборы, исполнительные механизмы, контроллеры и программируемые логические контроллеры (PLC), сбор и анализ данных в центральной системе управления информацией позволяет оператору получать необходимую информацию о состоянии системы и принимать обоснованные решения по управлению.

Автоматизация центральных тепловых пунктов схожа с автоматизацией других климатических систем, таких как отопление или вентиляция. Контроллеры управляют всей системой и настраиваются на выполнение алгоритмов, запрограммированных во время пусконаладочных работ.

Контроллеры могут иметь жесткое предустановленное программное обеспечение (ПО) для стандартных решений или быть свободно программируемыми для реализации уникальных проектов. Большинство контроллеров предлагают разнообразные опции регулировки параметров, включая ПИД-управление, а ПО содержит встроенные функции для адаптации и оптимизации алгоритмов под различное оборудование. Схема автоматизации тепловых пунктов должна позволять выявлять потенциальные проблемы и неисправности, а также предлагать эффективные способы их устранения.

**Постановка задачи.** Необходимо создание системы поддержки принятия решений (СППР), позволяющей автоматически производить анализ информации от датчиков, обрабатывать статистический материал и сигнализировать оператору о необходимости

программирования PLC с предоставлением результатов расчётов о прогнозируемом техническом и экономическом эффекте.

Необходимым представляется формирование надстройки СППР, который может производить анализ и расчёт технико-экономической целесообразности проведения модернизации системы электро- или теплопотребления объекта посредством применения различных энергосберегающих мероприятий, содержащихся в продукционном наборе в базе данных СППР. ИТП реализован по независимой схеме с применением одного пластинчатого теплообменника, рассчитанного на полную нагрузку. В контуре отопления система измеряет параметры: температуру и расход теплоносителя; давление в трубопроводах; включение/выключение насосов циркуляционного контура и пр.

Одной из причин снижения эффективности АСУ и необходимости внедрения умных систем с расширенным функционалом является изменение во времени точности работы датчиков, которая может снижаться по различным причинам: некорректная калибровка; физический износ; нестабильное соединение и ошибка передачи данных; неоптимальные параметры и несоответствие настроек реальным условиям эксплуатации; баги или ошибки в программном обеспечении; изменения внешних условий; накопление грязи, пыли или коррозии на датчиках; коррозионные процессы в трубопроводах; использование устаревшего оборудования.

При добавлении контура горячего водоснабжения становится необходимым одновременно управлять двумя системами: обеспечивать требуемую температуру в батареях отопления; поддерживать горячую воду нужной температуры в водораздаточных кранах потребителей. Управление двухконтурной системой усложняется.

Логика работы включает: автоматическое переключение приоритетов (отопление или горячее водоснабжение); оптимизацию расходов теплоносителя при одновременной работе обеих систем; возможность временного ограничения подачи теплоты в радиаторы при большом разборе горячей воды; расширяется количество входов и выходов АСУ, появляются дополнительные контуры регулирования, расширяются функциональные возможности и повышаются требования к качеству обслуживания и скорости реакции на возникающие проблемы.

Включение контура вентиляции добавляет третий элемент, нуждающийся в самостоятельном контроле и управлении. Для управления приточно-вытяжной установкой (ПВУ) в составе: фильтр, вентилятор, электронагреватель; рекуператор, шумоглушитель, – требуются дополнительные датчики: CO<sub>2</sub>, влажности, температуры и скорости воздушного потока; датчик температуры наружного воздуха; а также исполнительные механизмы для открытия и закрытия воздушных каналов. Расширение числа датчиков и точек управления приводит к повышению нагрузки на вычислительные ресурсы и программное обеспечение. Три независимых контура автоматизации (отопления, ГВС и вентиляции) должны действовать синхронно, учитывая ограниченность мощности тепловой сети. Координация действий отдельных контуров становится критически важной.

**Методы исследования.** Обработка больших объемов данных потребует внедрения современных методов аналитики и машинного обучения для выявления закономерностей и принятия оптимальных решений. Появится необходимость интеграции данных централизация сбора данных, разделения полномочий и ответственности операторов, улучшения визуализации процесса управления и оперативной реакции на события.

Всё это приводит к необходимости создания многослойной архитектуры с несколькими уровнями обработки и анализа информации. Применение предиктивной аналитики при анализе накопленного в ИТП архива измерений от АСУ ТП позволит повысить эффективность настроек АСУ. С учётом необходимой скорости регулирования теплового потока в контурах ИТП, наиболее распространён пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор (ПИД-регулятор). При наличии индивидуальных особенностей тепловых потерь здания регулирования с применением ПИД-регулятора становится недостаточно. В таких случаях целесообразно применять предиктивную аналитику с применением

искусственных нейронных сетей (ИНС), что в контексте автоматизации работы ИТП позволяет снизить число ошибок при разработке прогнозных моделей, а также повысить качество регулирования.

ИНС способны сценарно учитывать и моделировать, например, изменение температуры наружного воздуха с горизонтом прогнозирования 4-6 часов, что важно для рассматриваемых процессов управления теплотреблением с учётом тепловой инерции здания. ИНС могут учитывать изменения условий эксплуатации, что повышает устойчивость системы к внешним возмущениям.

Анализ выборки за несколько лет позволит оценить состояние и дать рекомендации по замене тех датчиков, чьи диапазоны измерения приближаются к граничным значениям по точности. АСУ с нейросетевым оптимизатором (рис. 1) позволяет использовать возможности искусственного интеллекта для управления объектом без существенной модернизации системы [1-4].



Рис. 1 – Схема управления с нейросетевым оптимизатором параметров регулятора  
Fig. 1 – Control circuit with a neural network optimizer of controller parameters

Технология не всегда дает значимые результаты, так как ИНС не обладает информацией об особенностях управляемого объекта. Эти особенности могут быть добавлены путем создания правил, которые будут определять условия, при которых обучение ИНС будет наиболее эффективно.

**Обсуждение результатов.** В данной работе предлагается объединить подходы использования ИНС для корректировки коэффициентов с учетом конкретных сценариев, требующих адаптации системы. Расчёт значений прогнозируемых параметров используется для предупреждения аварий посредством выдачи сигнала о прогнозном превышении уставки параметров оператору.

Современные PLC среднего класса могут содержать от 100 до 300 линий ввода и вывода параметров. Данные с датчиков поступают не только на регулятор, но и формируют архив базы данных, период накопления – раз в 1 секунду. Целесообразно расширить базу данных, на основе которой будет обучаться ИНС и включить в неё дополнительные параметры (табл. 1).

Объектом теплоснабжения является учебно-лабораторный корпус здания высшей школы общей площадью 15,196 тыс. кв. м. Система теплоснабжения закрытого типа с тепловым носителем – водой. Схема АСУ рассчитана на подачу тепловой энергии на ГВС и отопление, в систему приточно-вытяжной вентиляции.

В качестве исходных данных используются фактические данные о теплотреблении здания: обучающая выборка – данные за 2018-2019 гг., 2019-2020 гг., 2020-2021 гг., 2021-2022 гг., тестовая выборка – данные за отопительный период 2022-2023 гг.

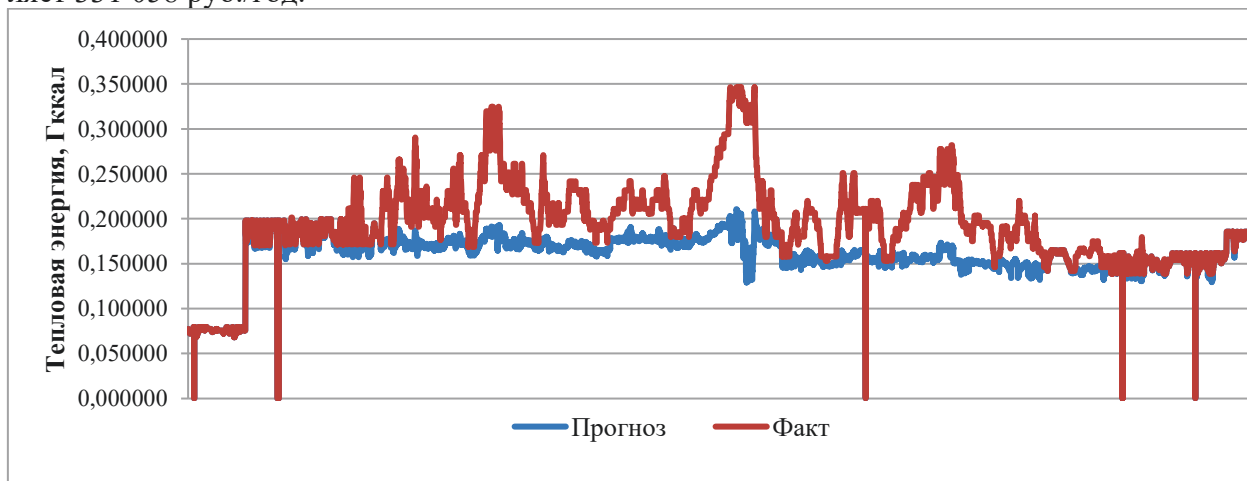
Для обработки данных методом подбора принята нейронная сеть типа многослойный персептрон, которая показала величину средней абсолютной ошибки (MAE) 0,6% при конфигурации: три слоя, 128 нейронов в каждой, 50 эпох обучения, погрешность – функция активации – сигмоидная.

**Таблица 1. Параметры для СУБД, загружаемые в ИНС**  
**Table 1. Parameters for the DBMS loaded into the ANN**

№	Параметр / Parameter	Обозначение Designation
1	Расчитанное потребленное количество энергии, Гкал/Calculated amount of energy consumed	Q расч
2	Температура теплоносителя на входе/ Coolant inlet temperature	T <sub>1</sub>
3	Температура теплоносителя на выходе/ Coolant outlet temperature	T <sub>2</sub>
4	Температура наружного воздуха (°C) на высоте 2 метра над поверхностью земли/ Outdoor air temperature (°C) at 2 meters above ground	T <sub>нв</sub>
5	Температура воздуха (°C) внутри помещения вдали от источников отопления и прямых солнечных лучей/ Indoor air temperature (°C) away from heat sources and direct sunlight	T <sub>в</sub>
6	Атмосферное давление, приведённое к среднему уровню моря, мм. рт. столба/ Atmospheric pressure, normalized to mean sea level, mmHg	P
7	Относительная влажность наружного воздуха (%) на высоте 2 метра над поверхностью земли/ Relative humidity of outdoor air (%) at 2 meters above ground	U
8	Направление ветра (угол) на высоте 10-12 метров над земной поверхностью, осредненное за 10-минутный период. непосредственно предшествовавший сроку наблюдения/ Wind direction (angle) at 10-12 m above ground, averaged over a 10-min. period immediately preceding the observation.	DD
9	Скорость ветра на высоте 10-12 метров над земной поверхностью. осредненная за 10-минутный период, непосредственно предшествовавший сроку наблюдения (м/с)/ Wind speed at 10-12 meters above ground, averaged over a 10-minute period immediately preceding the observation (m/s).	Ff
10	Процент заоблачности небосвода/ Cloud cover percentage	c
11	Отопление в Москве включено / выключено/ Heating on/off in Moscow	0/1
12	График пребывания людей в корпусе/ Building occupancy schedule	%
13	Местное время / Local time	Дд.мм.гггг чч:мм
14	Вибрация электрического привода и его насоса / вентилятора/ Vibration of electric drive and its pump/fan	fв
15	Электропроводимость теплоносителя сразу после магнитного фильтра / Coolant conductivity immediately after the magnetic filter	σ
16	Наличие протечки теплоносителя/ Presence of coolant leaks	Пр
17	Количество наработанных часов оборудованием, электрическим приводом, механизмами/ Number of operating hours of equipment, electric drives, and mechanisms	тчас
18	Разница температур на входе первого контура и выходе второго контура теплообменного аппарата - мониторинг эффективности теплообменника (чистоты пластин теплообменника)/ Temperature difference between the primary circuit inlet and secondary circuit outlet of the heat exchanger - monitoring heat exchanger efficiency (heat exchanger plate cleanliness)	ΔT

По итогам обработки фактических данных теплотребления: Q<sub>исх</sub>=1003,97 Гкал. Исходя из норматива удельного теплотребления для учебных зданий: ~0.025–0.028 Гкал/м<sup>2</sup>·°C·сут, прогнозное теплотребление составляет 867,57 Гкал. Предложено выполнять прогнозный расчёт из прогнозов гидрометцентра с периодом прогнозирования на 4-6 часов вперёд.

Расчётный перетоп за 2023-2024 отопительный период составляет 136,4 Гкал/год (рис. 2), что составляет 13,58% от теплотребления, в финансовом эквиваленте перерасход составляет 331 058 руб./год.



**Рис. 2 – График потребление тепловой энергии: фактический и прогнозируемый**  
**Fig. 2 – Thermal energy consumption graph: actual and predicted**

Такая большая разница может свидетельствовать как о неточной настройке регулятора ИТП, так и о необходимости учета дополнительных параметров, влияющих на теплотребление объекта. Для наполнения базы и обучения ИНС предлагается установить дополнительные датчики.

Для измерения температуры наружного воздуха – термосопротивление ОВЕН ДТС125Л-50М.В2.60 [5]. Датчик вибрации VTV121 [6] с диапазоном частот от 1 Гц до 1000 Гц и чувствительностью не менее 10 мВ/(мм/с) производителя IFM Electronic устанавливается на подшипниках насосов и теплообменных аппаратов.

Для рассматриваемого объекта необходимо 7 датчиков: по одному на каждый насос. Датчик Condumax CLS12 [7] электропроводимости прямого измерения устанавливается сразу после установленного магнитного фильтра, с диапазоном 0–200 мкСм/см.

Датчик протечки GIDROLOCK WSP [8] проволочного типа диапазоном чувствительности до 1 сантиметра в среднем – около насосов, теплообменников, коллекторов, трубопроводов и арматуры. Общая стоимость дополнительных датчиков составит 329,3 тыс. руб. в ценах 2026г. Для экономии капитальных затрат предлагается использовать открытое ПО.

Стоимость интеграции ИНС с АСУ ТП оценивается в 300 тыс. руб. Таким образом, простой срок окупаемости СППР для повышения эффективности АСУ ИТП составит 1,9 отопительных периода.

**Вывод.** Выполнено исследование возможностей повышения эффективности АСУ ТП за счет повышения точности настроек регуляторов ИТП.

Рассмотрен метод повышения точности АСУ ТП посредством применения ИНС. Предложено выполнять прогнозный расчёт из прогнозов гидрометцентра с периодом прогнозирования на 4-6 часов вперёд.

Предложен набор дополнительных датчиков, необходимых для повышения точности прогноза. Дополнительные капитальные затраты окупятся за 2 отопительных периода.

#### **Библиографический список:**

1. Варшавский, П.Р. Архитектура распределенной системы для интеллектуального анализа данных на основе прецедентов / П.Р. Варшавский, С.А. Поляков // Вестник Московского энергетического института. Вестник МЭИ. – 2023. – № 4. – С. 155-161. – DOI 10.24160/1993-6982-2023-4-155-161. – EDN LUTBAJ.
2. Аракелян, Э.К. Выбор и оценка приоритетных направлений повышения интеллектуальности АСУТП ТЭС / Э.К. Аракелян, А.А. Косой // Вести в электроэнергетике. – 2022. – № 5(121). – С. 52-57. – EDN KTVNSG.
3. Мезин, С.В. Сравнительный анализ работы классических многомерных систем управления и систем с нейрорегулятором на примере реального объекта / С.В. Мезин, Д.А. Дементьев // Вестник Московского энергетического института. Вестник МЭИ. – 2024. – № 2. – С. 117-125. – DOI 10.24160/1993-6982-2024-2-117-125. – EDN CNBLGF.
4. Мезин, С.В. Сравнительный анализ работы классических многомерных систем управления и систем с нейрорегулятором на примере реального объекта / С. В. Мезин, Д. А. Дементьев // Вестник Московского энергетического института. Вестник МЭИ. – 2024. – № 2. – С. 117-125. – DOI 10.24160/1993-6982-2024-2-117-125. – EDN CNBLGF.
5. ДТСхх5.И термосопротивления с выходным сигналом 4...20 мА ОВЕН [Электронный ресурс]. <https://owen-ufa.ru/shop/proizvoditeli/owen/dtshh5-termsoprotivleniya-s-vyhodnym-signalom-4-20-ma-oven/?ybaip=1&yclid=4928094631278673919> (дата обращения 14.01.2026).
6. VTV121 Датчик вибрации IFM [Электронный ресурс]. <https://ifm-russia.ru/product/vtv121/> (дата обращения 14.01.2025).
7. Датчик измерения удельной электрической проводимости Condumax CLS12 [Электронный ресурс]. <https://rizur.ru/catalog/analiz-EH/analogovyy-datchik-provodimosti-condumax-cls12/?ysclid=mh35apbhs23875283> / (дата обращения 14.01.2026).
8. Датчик контроля протечки воды Neptun SW005-10,0 [Электронный ресурс]. [https://lunda.ru/catalog/category/c13207/product/datchik-wsp-gidrolock\\_102349.html?utm\\_referrer=https%3A%2F%2Fyandex.ru%2F](https://lunda.ru/catalog/category/c13207/product/datchik-wsp-gidrolock_102349.html?utm_referrer=https%3A%2F%2Fyandex.ru%2F) (дата обращения 14.01.2025).

**References:**

1. Varshavsky, P.R. Architecture of a distributed system for intellectual data analysis based on precedents / P.R. Varshavsky, S.A. Polyakov. *Bulletin of the Moscow Power Engineering Institute. Bulletin of MPEI.* – 2023; 4:155-161. - DOI 10.24160/1993-6982-2023-4-155-161. - EDN LUTBAJ.
2. Arakelyan, E.K. Selection and assessment of priority areas for improving the intelligence of automated process control systems of thermal power plants / E.K. Arakelyan, A.A. Kosoy. *Vesti v elektroenergetike.* 2022;5 (121):52-57. - EDN KTVNSG.
3. Mezin, S.V. Comparative analysis of the operation of classical multivariate control systems and systems with a neurocontroller using the example of a real object / S.V. Mezin, D.A. Dementyev. *Bulletin of the Moscow Power Engineering Institute. MPEI Bulletin.* 2024;2:117-125. - DOI 10.24160/1993-6982-2024-2-117-125. - EDN CNBLGF.
4. Mezin, S.V. Comparative analysis of the operation of classical multivariate control systems and systems with a neurocontroller using the example of a real object / S.V. Mezin, D.A. Dementyev. *Bulletin of the Moscow Power Engineering Institute. MPEI Bulletin.* 2024; 2: 117-125. – DOI 10.24160/1993-6982-2024-2-117-125. – EDN CNBLGF.
5. DTSxx5.И thermistors with an output signal of 4...20 mA OWEN [Electronic resource]. <https://owen-ufa.ru/shop/proizvoditeli/owen/dtshh5-termosoprotivleniya-s-vyhodnym-signalom-4-20-ma-oven/?ybaip=1&yclid=4928094631278673919> (date of access 01/14/2026).
6. VTV121 IFM vibration sensor [Electronic resource]. <https://ifm-russia.ru/product/vtv121/> (date of access 01/14/2025).
7. Condumax CLS12 Specific Conductivity Sensor [Electronic resource]. <https://rizur.ru/catalog/analiz-EH/analogovyy-datchik-provodimosti-condumax-cls12/?ysclid=mh35apbhs23875283> / (accessed on January 14, 2026).
8. Neptun SW005-10.0 Water Leak Monitoring Sensor [Electronic resource]. [https://lunda.ru/catalog/category/c13207/product/datchik-wsp-gidrolock\\_102349.html?utm\\_referrer=https%3A%2F%2Fyandex.ru%2F](https://lunda.ru/catalog/category/c13207/product/datchik-wsp-gidrolock_102349.html?utm_referrer=https%3A%2F%2Fyandex.ru%2F) (accessed on January 14, 2025).

**Сведения об авторах:**

Гужов Сергей Вадимович, кандидат технических наук, доцент; директор Центра подготовки и профессиональной переподготовки «Автоматизированные системы управления тепловыми процессами в энергетике и промышленности»; [GuzhovSV@yandex.ru](mailto:GuzhovSV@yandex.ru); ORCID 0000-0002-3722-7669

Арбатский Андрей Андреевич, кандидат технических наук, генеральный директор; [arbatsky1985@mail.ru](mailto:arbatsky1985@mail.ru)

Крылова Елена Владимировна, кандидат педагогических наук, доцент; заместитель директора по учебной работе Института тепловой и атомной энергетики; [KrylovaYeIV@mpei.ru](mailto:KrylovaYeIV@mpei.ru)

Дзахмишева Диана Зауровна, инженер-проектировщик; [DzakhmishevaDZ@mpei.ru](mailto:DzakhmishevaDZ@mpei.ru)

**Information about authors:**

Sergey V. Guzhov, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Director of the Center for Training and Professional Retraining "Automated Thermal Process Control Systems in Energy and Industry"; [GuzhovSV@yandex.ru](mailto:GuzhovSV@yandex.ru); ORCID 0000-0002-3722-7669

Andrey A. Arbatsky, Cand. Sci. (Eng.), General Director; [arbatsky1985@mail.ru](mailto:arbatsky1985@mail.ru)

Elena V. Krylova, Cand. Sci. (Pedag.), Assoc. Prof.; Deputy Director for Academic Affairs, Institute of Thermal and Nuclear Energy; [KrylovaYeIV@mpei.ru](mailto:KrylovaYeIV@mpei.ru)

Diana Z. Dzakhmisheva, Design Engineer; [DzakhmishevaDZ@mpei.ru](mailto:DzakhmishevaDZ@mpei.ru)

**Конфликт интересов/Conflict of interest.**

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов/The authors declare no conflict of interest.**

**Поступила в редакцию/Received 23.10.2025.**

**Одобрена после рецензирования/Revised 29.11.2025.**

**Принята в печать /Accepted for publication 15.01.2026.**