

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ (ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ) (2.3.3)

УДК 681.3.06

DOI: 10.24160/1993-6982-2026-2-156-163

Синтез алгоритмов автоматического управления системами теплоснабжения с использованием модели теплового баланса

С.В. Гужов, А.А. Арбатский, Е.В. Крылова, Д.В. Тороп, А.О. Сорокина

Цель настоящего исследования – изучение возможности применения дополнительных стохастических методов и прогнозирования спроса в автоматизированных системах управления с целью повышения их эффективности

В качестве стохастического метода использован анализ статистических архивных данных по теплотреблению исследуемого объекта и климатических данных в месте расположения данного объекта с применением упрощенной искусственной нейронной сети. Проведенные численные эксперименты на основании 675-ти уникальных типов конфигураций искусственной нейронной сети позволяют сделать вывод об оптимальных параметрах по критерию наименьшей среднеквадратичной ошибки для применения на данном исследуемом объекте.

По итогам тестирования и обработки результатов получены зависимости спрогнозированного количества теплоты, которое может потреблять исследуемый объект. Проведено сравнение вычисленных данных с результатами прогнозирования, полученными детерминированным методом анализа и реальными данными о теплотреблении объекта за рассматриваемый период. Выполнено формирование «идеализированной» кривой разгона, описывающей объект, и графика переходного процесса. Применение разработанной методологии на примере уточнения настройки теплового пункта здания высшего учебного заведения в г. Москве позволяет достичь рассчитанного эффекта в 11,60% относительно теплотребления объекта без изменения настроек ПИД-регулятора. Также можно применять данную методику на различных объектах инфраструктуры и жилого фонда г. Москвы с целью повышения эффективности автоматизированных систем управления системами теплоснабжения

Ключевые слова: искусственная нейронная сеть, прогнозирование, предиктивное управление, стохастические методы, энергетическая эффективность, тепловой баланс, вентиляция, теплоснабжение.

Для цитирования: Гужов С.В., Арбатский А.А., Крылова Е.В., Тороп Д.В., Сорокина А.О. Синтез алгоритмов автоматического управления системами теплоснабжения с использованием модели теплового баланса // Вестник МЭИ. 2026. № 2. С. 156—163. DOI: 10.24160/1993-6982-2026-2-156-163.

Synthesis of Heat Supply System Automatic Control Algorithms Using a Heat Balance Model

S.V. Guzhov, A.A. Arbatsky, E.V. Krylova, D.V. Torop, A.O. Sorokina

The article addresses matters concerned with studying the possibility of applying additional stochastic methods and forecasting the demand in automated control systems to improve their efficiency. An analysis of statistical archive data on heat consumption of the studied object and climatic data at the object location place carried out by applying a simplified artificial neural network was used as the stochastic method. In carrying out the study, numerical experiments were performed on the basis of 675 unique types of artificial neural network configurations. Based on the obtained results, a conclusion can be drawn about the optimal parameters according to the least RMS error criterion for application at the object studied. Dependencies of the predicted amount of heat that the studied object can consume have been derived proceeding from testing and processing the results obtained. The calculated data are compared with the forecasting results obtained by the deterministic analysis method and real data on the heat consumption of the object for the period under consideration. An "idealized" step function response curve describing the object and a transient process graph have been drawn. By applying the developed methodology on the example of refining the setting of the heating point for a higher educational institution building in the city of Moscow, it becomes

possible to achieve the calculated effect of 11.60% relative to the heat consumption of the object without changing the PID controller settings. The developed methodology can also be applied to various infrastructure facilities and housing stock in the city of Moscow to increase the efficiency of heat supply system automated control systems.

Key words: artificial neural network, forecasting, predictive control, stochastic methods, energy efficiency, heat balance, ventilation, heat supply.

For citation: Guzhov S.V., Arbatsky A.A., Krylova E.V., Torop D.V., Sorokina A.O. Synthesis of Heat Supply System Automatic Control Algorithms Using a Heat Balance Model. Bulletin of MPEI. 2026;2:156—163. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2026-2-156-163.

Введение

Улучшение прогнозных методов моделирования и управления процессами является важным направлением развития автоматизированных систем управления в централизованных тепловых системах. Система теплоснабжения здания имеет основной функцией непрерывную подачу тепловой энергии заданных параметров. Теплота, поступающая из внешнего источника, подается в здание через индивидуальный тепловой пункт (ИТП). Для повышения эффективности система автоматизации подсистем вентиляции, ГВС и отопления должна опираться не только на температуру теплоносителя в прямом и обратном трубопроводе, но и выполнять расчёты спроса в зависимости от условий функционирования объекта. Особенно востребована данная функция для системы общеобменной вентиляции с предварительной подготовкой воздуха.

Разрабатываемые и используемые модели наиболее часто опираются на линейный многофакторный регрессионный анализ, само применение которого требует принятия множества допущений. Вторым распространённым подходом является применение искусственных нейронных сетей (ИНС), разработанных применительно к конкретному объекту. Решение задачи повышения точности АСУ ТП в системах теплоснабжения целесообразно выполнять посредством разработки методологии применения прогнозных функций энергопотребления на основании статистических данных, учитывающей как преимущества разработанных и проверенных практикой детерминированных математических моделей, так и возможности статистических способов.

Существующие подходы многорежимного математического моделирования подсистем системы теплоснабжения

Тепловая нагрузка потребителей значительно изменяется в зависимости от времени суток, погодных условий, тепловлажностных режимов отапливаемых помещений, режима работы оборудования и других факторов. Для обеспечения эффективной работы системы необходимо осуществлять ее регулирование на основе принципа связности. При несвязном варианте регулируется каждая нагрузка в отдельности с учетом неравномерности потребления, на абонентские вводы подается требуемое в данный момент количество теплоты. Наиболее распространенный вариант систем

отопления и вентиляции в зданиях школ Москвы представляет собой систему воздушного отопления, выполняющую также функции вентиляции. К преимуществам данного типа отопления относятся: большая гибкость в управлении при изменении нагрузки, относительно невысокие капитальные затраты на устройство системы. Недостатками являются: пониженная (в сравнении с водяной системой) надежность системы отопления здания.

Применение системы автоматического управления центральной приточной системы вентиляции с воздушонагревателями позволяет соблюсти уровень подачи тепловой энергии в объект на основе несвязного качественно-количественного регулирования. Детерминированные методы, применяемые к АСУ теплотехническим хозяйством системы теплоснабжения, обладают рядом недостатков. К числу недостатков можно невозможность получить на практике полную информацию о статических теплотехнических характеристиках всех физических составляющих реального объекта. Так, например, удельная теплозащитная характеристика здания определяется непосредственно через пять характеристик каждого элемента оболочки здания [1]. Очевидно, что получение точных значений каждого из составляющих формулы невозможно для каждой стены реального здания в силу чрезвычайной трудоёмкости и стоимости процесса исследования.

Необходимо отметить, что процесс составления теплового баланса требует детального поэлементного расчёта следующих потерь: трансмиссионных потерь через оконные конструкции; инфильтрационных потерь через оконные конструкции; трансмиссионных потерь через входную группу; инфильтрационных потерь через входную группу; через стеновые ограждающие конструкции посредством теплопроводности; через кровлю посредством теплопроводности; через пол посредством теплопроводности; теплопотерь, связанных с вентиляцией. Теплопритоки различают: от людей /персонала/ жильцов; от неизолированных трубопроводов системы ГВС; от неизолированных трубопроводов системы отопления; от электроприборов систем электроосвещения и силового электроснабжения и т.д.

Дополнительное применение стохастических алгоритмов прогнозирования позволяют повысить энергетическую эффективность объекта за счёт повышения точности регулирования, а также оптимизировать затраты на теплоснабжение по критерию минимума затрат. Для достижения поставленной цели систему теплоснабжения целесообразно представить, как си-

стему, описывающуюся одним из трёх классов математических моделей.

I. Агрегативно, основываясь на причинности во времени, считая систему неупреждающей:

$$(\forall t)(\forall j) : \left\{ \forall f_0(x_{j,t}) \right\} : \\ : \left[\overline{f_{t+\Delta t}} = \overline{f_0(x_{j,t})} + \overline{\Delta f_i(x_{j(t+\Delta t)}, t+\Delta t)} \right],$$

где t_i — ордината в i -й момент времени; f_0 — функция, описывающая состояние объекта в начальный момент времени; j — число факторов, оказывающих влияние на функционирование АСУ ТП.

II. Экономико-математическими моделями:

$$\left\{ \left(\overline{A(u)} + \overline{B(u)} \right) \rightarrow \min \right\} \Rightarrow \\ \left[\left(\forall i \in (0; m) \right) : \sum_{i=1}^m (a_{j,i}; a_{j,i}) + \sum_{i=2}^{m-1} (a_{j(t+\Delta t)}; a_{j(t+\Delta t)}) \right] \rightarrow \min,$$

где A — матрица затрат; B — матрица выполнения множества технологически допустимых управляющих воздействий.

III. Как сообщество технических изделий $\sum w_{j,i}$, на множестве W которых осуществлено разбиение на семейства W_k :

$$(\forall t) (\forall k \in [0, K])(\forall f, h \in [0, K] : f \neq h) : \\ : \{ W_1 U W_2 U \dots U W_k; W_f \cap W_h = 0 \}. \quad (1)$$

Единичный элемент $u_i \in W$, $u_i \in S_k$ и существуют классы эквивалентности $u_f \in S_k$, что $u_f \in S_k \equiv u_h \in S_k$, при условии $(S_f \cap S_h = 0, f \neq h)$.

Для решения поставленной цели выбрана модель III, как наиболее удобная для моделирования и анализа влияния на результат множества технических факторов. Современный уровень физико-математического описания процессов позволяет создавать математические модели для всех видов и типов оборудования, которые досконально и без применения способов декомпозиции позволяют спрогнозировать как квазиустойчившиеся, так и переходные процессы.

Допущения и метод решения

Процесс функционирования АСУ ТП объекта связан с функционированием в непрерывном переходном теплотехническом процессе с достаточно большой величиной времени отклика, возникающей по причине существенной тепловой инерции [2, 3] ограждающих конструкций объекта капитального строительства (рис. 1).

Описание процесса функционирования системы теплоснабжения в таком случае может рассматриваться на основании модели (1) как «чёрный ящик» и настраиваться как она на основании существующего множества формульных моделей, так и уточняться на основе статистических моделей, опирающихся на статистические данные о пассивном эксперименте на действующем объекте. Применение упрощённых ИНС в данном случае имеет несколько преимуществ:

- позволяет выполнять расчёты без применения сложных моделей, а значит более доступен на практике;
- относительно простые модели требуют менее мощных аппаратных мощностей и позволяют производить обучение ИНС в более короткие сроки;

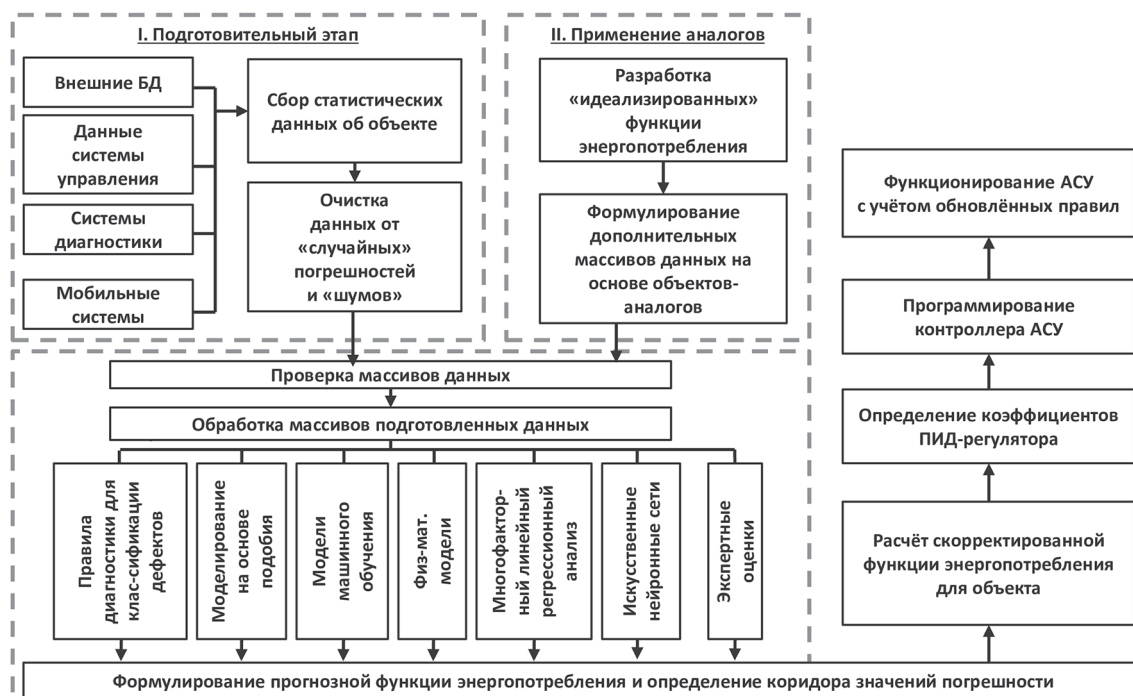


Рис. 1. Схема определения уточнённых настроек коэффициентов ПИД-регулятора

• применение простых конфигураций позволяет отказаться от применения специализированного дорогостоящего ПО в пользу открытых пакетов, использующих наиболее распространённые структуры и функции активации ИНС.

На основе накопленных статистических данных об объекте формулируются зависимости с использованием стохастических методов обработки информации. Используя сложившиеся методы описания технических систем и функциональное описание системы зададимся формальным пространством с входными факторами:

$$F(x_{j,t}) = \{K, T, B, \Xi, H, \Pi\},$$

где K — множество определённых влияющих векторов, учитывающих климатические факторы; T — множество определённых влияющих векторов, учитывающих технические и технологические влияющие на АСУ ТП факторы, в т.ч. составляющие теплового баланса объекта; B — множество определённых влияющих векторов, учитывающих график рабочих и праздничных дней; числа часов функционирования объекта ежесуточно; Ξ — множество определённых влияющих векторов, учитывающих факторы эффективности эксплуатации инженерных систем; H — множество определённых влияющих векторов, учитывающих факторы надёжности: эффект отскока, число поломок и степень их критичности, показатель дрейфа точности датчиков относительно паспортных характеристик оборудования (физический износ), зависимость функционирования АСУ от интенсивности эксплуатации других инженерных систем и пр.; Π — множество определённых влияющих векторов, учитывающих экономические факторы: тарифы на энергоресурсы, объём выпуска продукции, факторы формирования спроса на продукцию, ограниченность бюджета на ремонтно-восстановительные мероприятия и пр.

Функция $F(x_{j,t})$ оказывает влияние на управляемую величину — $y(t)$ (температуру воздуха в здании, поддерживаемую на уровне 20 ± 2 °C, но с разным временем отклика) [4]. В качестве основного возмущающего воздействия $\lambda(t)$ в системе принимается изменение температуры наружного воздуха; в качестве дополнительных возмущающих воздействий — $F(x_{j,t})$, которые часто не рассматриваются ввиду меньшего влияния по сравнению с температурой наружного воздуха, отсутствия информации и трудоёмкости вычислений.

Отличительной особенностью статистических данных является необходимость предварительной их очистки от «случайных» явлений, погрешностей, «шумов». Подготовка данных выполняется доказавшими свою эффективность способами. Для нахождения тесноты линейной связи между отдельными элементами матрицы $F(x_{j,t})$ достаточно определить линейные коэффициенты корреляции, проверить наличие мультиколлинеарности. При необходимости рекомендуется использовать метод наибольшего правдоподобия, оценки

по Фишеру и Стьюденту, линейный коэффициент корреляции Пирсона для определения связи между двумя факторами, описываемой линейной или нелинейной зависимостью; коэффициенты корреляции рангов Спирмэна [5] (ρ) и Кендэла (τ) [6], основанные на корреляции рангов значений факторов ряда; коэффициента корреляции знаков Фехнера [7]. График идеализированного переходного процесса при необходимости позволяет определить новые настройки ПИД регулятора, например, посредством применения метода Циглера–Николса. Для компенсации ограниченности его эффективности в процессах с запаздыванием применяется подход, предложенный методом Козна–Куна [8].

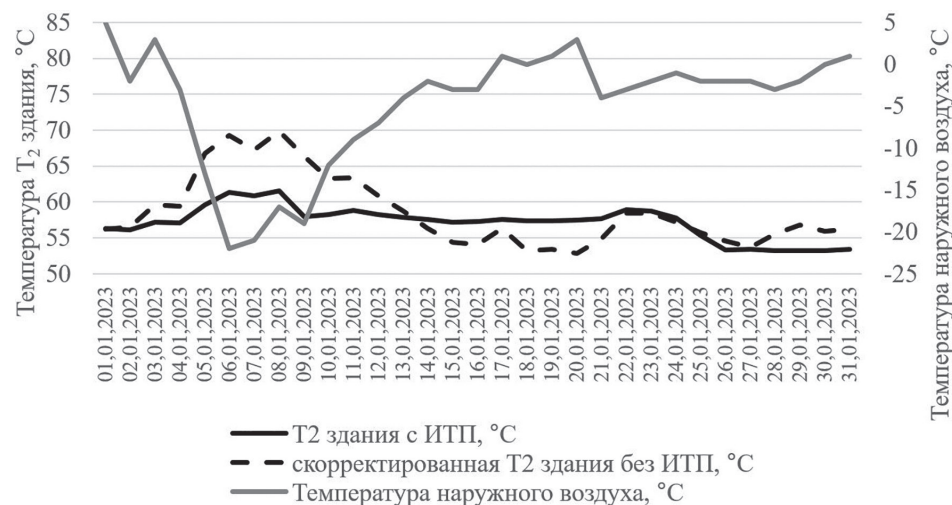
Аппробация

Исследуемым объектом является школа в г. Москва, построенная по типовому проекту 65-426/1. Данная серия была выбрана как самый популярный типовой проект для средних образовательных учреждений на постсоветском пространстве. В зданиях, построенных по этому типовому проекту, предусмотрена одна приточная система для всех помещений здания школы: классов, столовой, спортивного и актового залов, рекреаций и т.п. При проведении капитального ремонта ограждающие конструкции наружных стен существующих корпусов и перехода между ними запроектированы из условий энергосбережения в соответствии с [8] и изолированы утеплителем из минеральной ваты достаточной толщины для обеспечения и сохранения внутренней температуры в помещениях равной $+21$ °C.

Расчёт производится для 2021/22 отопительного сезона. Тестовое здание обладает установленным ИТП (рис. 3), полная модернизация с повышением класса энергоэффективности до В проводилась в 2018 г. Температура в обратном трубопроводе после теплообменника T_2 меняется за счет изменения расхода теплосети. Расход теплосети изменяется регулятором перепада давления ТС-У и тремя параллельно работающими регуляторами на поддержание температуры ЦО Т-У.

Контрольным зданием является аналогичный корпус без ИТП. Поскольку потери температуры в трубе с прямой водой на длине магистрали между зданиями составляет более 5 °C, необходимо выполнить предварительную синхронизацию температур в прямом трубопроводе (рис. 2).

В качестве дополнительных возмущающих воздействий принята функция $F(x_{j,t}) = \{K, B\}$, где K — база данных, включающая полчасовые значения климатических показателей [10]. На вход ИНС подаётся столбец данных по теплотреблению и 10 дополнительных столбцов данных: K_1 — температура наружного воздуха на высоте 2 м над поверхностью земли, °C; K_2 — атмосферное давление, приведённое к среднему уровню моря, мм рт. ст.; K_3 — относительная влажность наружного воздуха на высоте 2 м над поверхностью земли, %; K_4 — направление ветра на высоте

Рис. 2. Сравнение T_2 для корп. с ИТП и скорректированной T_2 в корпусе без ИТП

10...12 м над земной поверхностью, осредненное за 10-минутный период, непосредственно предшествовавший сроку наблюдения; K_5 — скорость ветра на высоте 10...12 м над земной поверхностью, осредненная за 10-минутный период, непосредственно предшествовавший сроку наблюдения, м/с; K_6 — процент заоблаченности небосвода, %. Также в число анализируемых данных включено: V_1 — значение дня (рабочий/выходной день); V_2, V_3, V_4 — посуточная длительность пребывания соответственно мужчин, женщин и детей.

Массив после проведения пассивного эксперимента и предварительной выверки исходных данных содержит 1663 строки с данными, из которых 1103 приняты как обучающая, а 560 — как тестовая выборка.

Произведённые численные эксперименты на основании 675-ти уникальных типов конфигураций ИНС различались по признакам:

- число эпох обучения: 50, 100, 250, 350, 500 и 750 ед.;
- число слоев — 2 или 3 ед., количество нейронов в каждом слое — в диапазоне от 2 до 256;
- применяемая функция активации: линейная (linear); сигмоидальная (sigmoid) функции; гиперболический тангенс (tanh);

• функция потерь MAE (Mean Absolute Error); MSE (Mean Squared Error); RMSE (Root Mean Squared Error).

Для любого заданного критерия ошибки (функции потерь) наименьший разброс погрешностей показывают линейная функция активации (linear) и сигмоидная

функция активации в форме гиперболического тангенса (tanh). Однако tanh даёт больший разброс относительно linear. Наилучшие результаты прогнозирования (таблица) показывают конфигурации с небольшим количеством эпох, тремя скрытыми слоями и самым высоким числом нейронов (из рассматриваемого множества) в последнем скрытом слое и с сигмоидной функцией активации в форме гиперболического тангенса (tanh). Анализ полносвязных моделей показывает, что оптимальной являются конфигурации моделей с тремя скрытыми слоями: они достигают лучших результатов, при этом не проигрывая во времени более простым моделям с меньшим числом скрытых слоёв [11, 12].

На основании полученной прогнозной функции и сформулированных ранее «идеализированных» функций, сформулированных для исследуемого объекта, выполняется формирование кривой разгона, описывающего объект. Протяжённость трубопроводов системы отопления здания составляет 400 м, что означает, что теплоноситель после начала изменения T_1, T_2 изменится не ранее, чем через 6,5 мин. По кривой разгона с учётом функции управляющего воздействия определяются параметры объекта: постоянная времени $T = 1800$ с, время запаздывания $t = 400$ с, коэффициент передачи объекта $k = 68,52$. На основании передаточной функции объекта типа «А-звено с запаздыванием» и полученных параметров в программе Simulink выполняется модель регулятора и расчётное построение графика переходного процесса.

Наименьшая величина ошибок для различных заданных функций потерь

Функции потерь	Конфигурация	Значение RMSE (среднеквадратичная ошибка), %
MAPE	50 эпох, tanh, 3 слоя 256-256-256	24,1812
MSE	100 эпох, tanh, 3 слоя 64-128-256	20,5072
MSE	100 эпох, tanh, 3 слоя 256-64-256	19,2840

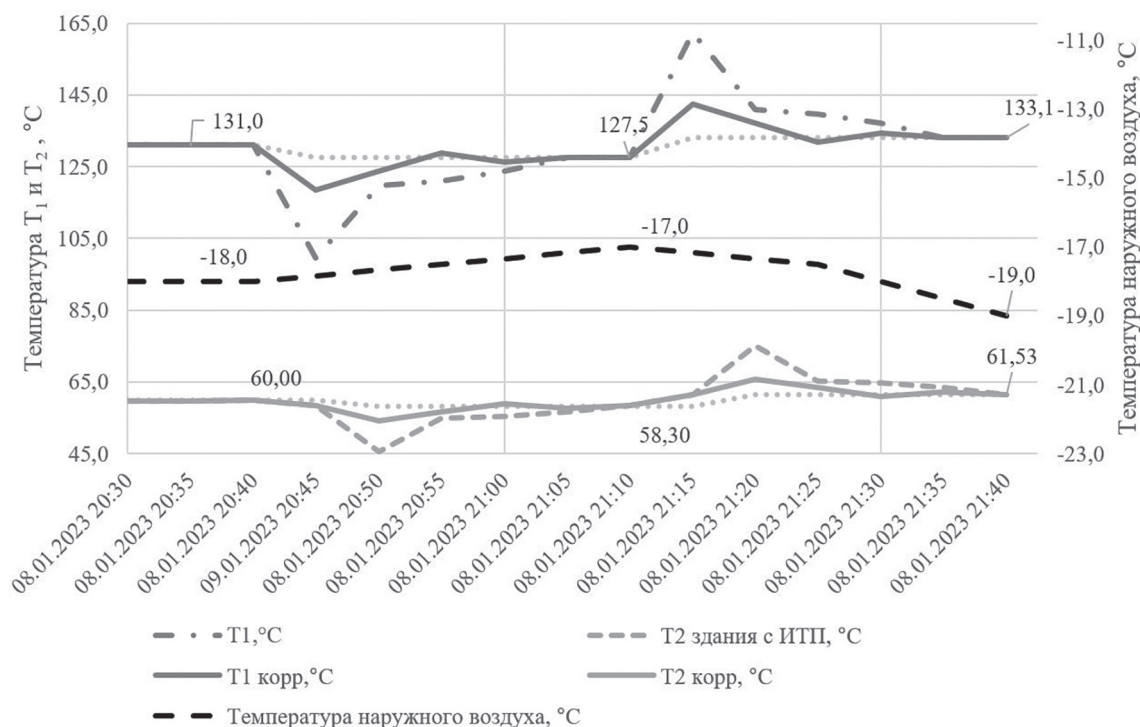


Рис. 3. Теплопотребление до и после оптимизации настроек ПИ-регулятора:

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

В качестве наиболее показательного режима системы отопления объекта при достаточно резком изменении температуры наружного воздуха примем 3 дня в период с 8 по 11 января 2023 г. На основании обученных моделей ИНС произведен детализированный расчёт и построены кривые T_1 и T_2 (рис. 3). Использование «идеализированных» функций позволяет определить наиболее эффективный график переходного процесса, доступный для здания с анализируемыми характеристиками (рис. 3, кривые $T_{1\text{корр}}$ и $T_{2\text{корр}}$).

Эффект от уточнения функции регулирования в период с 21.00 по 22.00 анализируемых суток 0,0579 Гкал, что составляет 11,60% от теплопотребления без изменения настроек регулятора в ИТП.

Показанный подход повышения точности АСУ ТП в централизованных теплоэнергетических системах посредством применения прогнозных функций энергопотребления во многом опирается на существующие методы предварительной обработки данных. Существующие системы в основном настраиваются на основе упрощённых

структурных расчётов и посредством проведения активного эксперимента на действующем объекте.

Заключение

Рассмотрен пример расчёта теплового баланса на имеющихся реальных данных по зданию школы типового проекта 65-426/1 в г. Москве. Показано, что в качестве статистических моделей наиболее целесообразно с точки зрения точности использовать упрощённые модели нейронных сетей. Отсутствие необходимости разрабатывать новые нейросетевые конфигурации является преимуществом в силу их простоты и доступности, нетребовательности к вычислительным мощностям компьютера; могут быть реализованы на основе множества программных приложений.

Применение разработанного метода на примере уточнения настройки ИТП здания высшего учебного заведения позволяет достичь расчётный эффект 11,60% относительно теплопотребления объекта без изменения настроек ПИД регулятора.

Литература

1. Данилов. О.Л. и др. Энергосбережение в теплоэнергетике и теплотехнологиях. М.: Издат. дом МЭИ, 2011.
2. Яковлев И.В., Авдокунин Н.В., Горелов М.В. Экономия и затраты энергии при обеспечении тепловых режимов центров обработки данных, охлаждае-

References

1. Danilov. O.L. i dr. Energoseberezhenie v Teploenergetike i Teplotekhnologiyakh. M.: Izdat. Dom MEI, 2011. (in Russian).
2. Yakovlev I.V., Avdokunin N.V., Gorelov M.V. Ekonomiya i Zatratty Energii pri Obespechenii Teplovykh Rezhimov Tsentrov Obrabotki Dannykh, Okhlazhdaemykh

мых наружным воздухом // Промышленная энергетика. 2025. № 1. С. 41—49.

3. **Горелов М.В.** Какой отопительный прибор лучше? // Сантехника. Отопление. Кондиционирование. 2024. № 5(269). С. 40—44.

4. **Мезин С.В. и др.** Разработка нового подхода к оценке технического состояния оборудования для целей создания экспертных систем // Вестник МЭИ. 2023. № 4. С. 146—154.

5. **Heinen A., Valdesogo A.** The Kendall and Spearman Rank Correlations of the Bivariate Skew Normal Distribution // Scandinavian J. Statistics. 2022. V. 49(4). Pp. 1669—1698.

6. **Huang Zh., Qin G.** Influence Function-based Confidence Intervals for the Kendall Rank Correlation Coefficient // Computational Statistics. 2022. V. 38(2). Pp. 1041—1055.

7. **Розанов Ю.А.** Теория вероятностей, случайные процессы и математическая статистика. М.: Наука, 1985.

8. **Cohen Coon** Tuning Method [Электрон. ресурс] <https://www.dataforth.com/tuning-control-loops-for-fast-response.aspx> (дата обращения 27.04.2024).

9. **СП 50.13330.2012.** Тепловая защита зданий.

10. **Архив** погоды в Шереметьево [Электрон. ресурс] [https://rp5.ru/Архив_погоды_в_Шереметьево,_им._А._С._Пушкина_\(аэропорт\),_METAR](https://rp5.ru/Архив_погоды_в_Шереметьево,_им._А._С._Пушкина_(аэропорт),_METAR) (дата обращения 27.04.2024).

11. **Мектепкалиева А.К., Ханова А.А., Проталинский О.М.** Система программной поддержки краткосрочного прогнозирования электропотребления // Математические методы в технологиях и технике. 2022. № 6. С. 113—116.

12. **Осиповский Р.В., Проталинский О.М.** Имитационное моделирование в задаче функциональной диагностики энергетического оборудования // Математические методы в технологиях и технике. 2022. № 9. С. 106—109.

Naruzhnym Vozdukhom. Promyshlennaya Energetika. 2025;1:41—49. (in Russian).

3. **Gorelov M.V.** Kakoy Otopitel'nyy Pribor Luchshe? Santekhnika. Otoplenie. Konditsionirovanie. 2024;5(269): 40—44. (in Russian).

4. **Mezin S.V. i dr.** Razrabotka Novogo Podkhoda k Otsenke Tekhnicheskogo Sostoyaniya Oborudovaniya dlya Tseley Sozdaniya Ekspertnykh Sistem. Vestnik MEI. 2023;4:146—154. (in Russian).

5. **Heinen A., Valdesogo A.** The Kendall and Spearman Rank Correlations of the Bivariate Skew Normal Distribution. Scandinavian J. Statistics. 2022;49(4): 1669—1698.

6. **Huang Zh., Qin G.** Influence Function-based Confidence Intervals for the Kendall Rank Correlation Coefficient. Computational Statistics. 2022;38(2): 1041—1055.

7. **Rozanov Yu.A.** Teoriya Veroyatnostey, Sluchaynye Protsessy i Matematicheskaya Statistika. M.: Nauka, 1985. (in Russian).

8. **Cohen Coon** Tuning Method [Elektron. Resurs] <https://www.dataforth.com/tuning-control-loops-for-fast-response.aspx> (Data Obrashcheniya 27.04.2024).

9. **SP 50.13330.2012.** Teplovaya Zashchita Zdaniy. (in Russian).

10. **Arkhib** Pogody v Sheremet'evu [Elektron. Re-surs] [https://rp5.ru/Arkhib_pogody_v_SHeremet'evu,_im._A._S._Pushkina_\(aeroport\),_METAR](https://rp5.ru/Arkhib_pogody_v_SHeremet'evu,_im._A._S._Pushkina_(aeroport),_METAR) (Data Obrashcheniya 27.04.2024). (in Russian).

11. **Mektepkalieva A.K., Khanova A.A., Protalinskiy O.M.** Sistema Programmnoy Podderzhki Kratkosrochnogo Prognozirovaniya Elektropotrebleniya. Matematicheskie Metody v Tekhnologiyakh i Tekhnike. 2022; 6:113—116. (in Russian).

12. **Osipovskiy R.V., Protalinskiy O.M.** Imitatsionnoe Modelirovanie v Zadache Funktsional'noy Diagnostiki Energeticheskogo Oborudovaniya. Matematicheskie Metody v Tekhnologiyakh i Tekhnike. 2022;9:106—109. (in Russian).

Сведения об авторах:

Гужов Сергей Вадимович — кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизированных систем управления тепловыми процессами НИУ «МЭИ», e-mail: GuzhovSV@mpei.ru

Арбатский Андрей Андреевич — кандидат технических наук, генеральный директор ООО «НИИ «Энергоэффективных технологий микроклимата», e-mail: arbatsky1985@mail.ru

Крылова Елена Владимировна — кандидат педагогических наук, доцент кафедры атомных электрических станций, заместитель директора по учебной работе Института тепловой и атомной энергетики НИУ «МЭИ», e-mail: KrylovaYelV@mpei.ru

Тороп Дарья Владимировна — аспирант, ассистент кафедры автоматизированных систем управления тепловыми процессами НИУ «МЭИ», e-mail: ToropDV@mpei.ru

Сорокина Анна Олеговна — студент НИУ «МЭИ», e-mail: SorokinaAO@mpei.ru

Information about authors:

Guzhov Sergey V. — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor of Automated Control Systems for Thermal Processes Dept., NRU MPEI, e-mail: GuzhovSV@mpei.ru

Arbatsky Andrey A. — Ph.D. (Techn.), General Director of the LLC «Research Institute «Energy Efficient Microclimate Technologies», e-mail: arbatsky1985@mail.ru

Krylova Elena V. — Ph.D. (Pedagogical), Assistant Professor of Nuclear Power Plants Dept., Deputy Director for Academic Affairs of Institute of Thermal and Nuclear Power Engineering, NRU MPEI, e-mail: KrylovaYelV@mpei.ru

Torop Darya V. — Ph.D.-student, Assistant of Automated Control Systems for Thermal Processes Dept., NRU MPEI, e-mail: ToropDV@mpei.ru

Sorokina Anna O. — Student, NRU MPEI, e-mail: SorokinaAO@mpei.ru

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interests: the authors declare no conflict of interest

Статья поступила в редакцию: 02.07.2025

The article received to the editor: 02.07.2025

Статья принята к публикации: 16.12.2025

The article has been accepted for publication: 16.12.2025