

# АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ГЕОТЕРМАЛЬНЫМ ОТОПЛЕНИЕМ С БЕСПРОВОДНЫМ МОНИТОРИНГОМ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ЗОН

## AUTOMATED GEOTHERMAL HEATING CONTROL SYSTEM WITH WIRELESS MONITORING OF TEMPERATURE ZONES

*M. Zubarev*

*Summary.* The purpose of the research is to develop and implement an automated zonal control system for a geothermal heat pump based on a wireless sensor network and intelligent temperature control algorithms. Hypothesis: the introduction of zonal regulation, taking into account the inertia of underfloor heating and ventilation detection, makes it possible to increase energy efficiency by 15-20% compared to traditional control systems. To achieve this goal, the tasks of constructing a mathematical model of the building's thermal balance, designing the architecture of a DIY monitoring system, and developing a two-level control algorithm based on ESP32 and Raspberry Pi were solved. Methods of numerical modeling, statistical processing of temperature data and adaptive control algorithms are applied. The simulation results confirmed the stable maintenance of set temperatures with an accuracy of  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$  and a reduction in energy consumption to 3,200 kWh per year. The practical implementation of the system has shown high reliability and adaptability to various climatic conditions.

*Keywords:* geothermal heating, IoT, wireless sensors, control system, energy efficiency.

**Зубарев Михаил Андреевич**

Ассистент, аспирант,

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный  
университет аэрокосмического приборостроения»  
mishaniya1121@yandex.ru

*Аннотация.* Цель исследования — разработка и практическая реализация автоматизированной системы зонального управления геотермальным тепловым насосом на базе беспроводной сенсорной сети и интеллектуальных алгоритмов регулирования температурного режима. Гипотеза: внедрение зонального регулирования с учетом инерционности теплых полов и детекции проветривания позволяет повысить энергоэффективность на 15–20 % по сравнению с традиционными системами управления. Для достижения цели решались задачи построения математической модели теплового баланса здания, проектирования архитектуры DIY-системы мониторинга и разработки двухуровневого алгоритма управления на базе ESP32 и Raspberry Pi. Применены методы численного моделирования, статистической обработки температурных данных и алгоритмов адаптивного регулирования. Результаты моделирования подтвердили стабильное поддержание заданных температур с точностью  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$  и снижение энергопотребления до 3200 кВт\*ч в год. Практическая реализация системы показала высокую надежность и адаптивность к различным климатическим условиям.

*Ключевые слова:* геотермальное отопление, IoT, беспроводные датчики, система управления, энергоэффективность.

### Введение

Геотермальные системы отопления демонстрируют высокую энергоэффективность в условиях холодного климата, обеспечивая коэффициент преобразования (COP) 2.5-4 даже при низких наружных температурах [1]. Однако эффективность таких систем в значительной степени зависит от качества управления тепловым режимом здания, особенно при использовании низкотемпературных систем отопления типа «теплый пол».

Существующие коммерческие системы управления геотермальными тепловыми насосами имеют ряд ограничений: высокую стоимость (от 150–300 тыс. руб.) [2, 3], привязку к конкретным производителям оборудования, ограниченные возможности настройки алгоритмов управления и слабую интеграцию с современными IoT-платформами [4]. Большинство систем используют простые термостатические алгоритмы, не учитывающие зо-

нальные особенности здания и инерционность системы теплых полов.

Развитие доступных микроконтроллерных платформ и беспроводных технологий создает возможности для разработки гибких и экономически эффективных систем управления. Использование DIY-подхода позволяет создать адаптивную систему управления с возможностью настройки под конкретные архитектурные и климатические особенности объекта при значительно меньших затратах.

Целью данного исследования является разработка и практическая реализация автоматизированной системы зонального управления геотермальным тепловым насосом с использованием беспроводной сенсорной сети и интеллектуальных алгоритмов регулирования температурного режима.

## 1. Архитектура системы и техническое описание объекта

Объектом исследования является частный дом общей площадью 100 м<sup>2</sup> с системой отопления на базе геотермального теплового насоса мощностью 10 кВт. Здание имеет следующее зонирование: отапливаемые помещения площадью 89 м<sup>2</sup> (кухня, спальни, холл, гостиная, душевая и санузел) и неотапливаемые «холодные» помещения площадью 11 м<sup>2</sup> (тамбур, прихожая, застекленная веранда). Система отопления реализована через теплые полы во всех помещениях с возможностью индивидуального регулирования температуры теплоносителя.

Геотермальный тепловой насос обеспечивает три ступени температуры теплоносителя: 35°C, 45°C и 55°C, а также три режима скорости циркуляции. Такая конфигурация позволяет реализовать девять различных режимов работы системы с максимальной тепловой мощностью 10 кВт при ограничении электрического потребления на том же уровне.

Архитектура беспроводной системы управления построена по централизованной схеме с единым управляющим узлом на базе Raspberry Pi Zero 2W. Данный одноплатный компьютер обеспечивает сбор данных от всех датчиков по протоколу Wi-Fi, выполнение алгоритмов управления и формирование команд управления тепловым насосом. Выбор Raspberry Pi Zero 2W обусловлен наличием встроенного Wi-Fi модуля, достаточной вычислительной мощностью для реализации алгоритмов управления и низким энергопотреблением (1.5–2 Вт).

Система мониторинга включает внешний термометр, расположенный на удалении 3–5 метров от дома для исключения влияния тепловых мостов и излучения от ограждающих конструкций. Внешний датчик передает данные о температуре наружного воздуха каждые 20 минут, что обеспечивает своевременную коррекцию алгоритмов управления при изменении погодных условий.

Температурные требования для различных зон установлены в соответствии с санитарными нормами и требованиями комфорта: жилые помещения (спальни, гостиная) поддерживаются в диапазоне 21–24°C, вспомогательные помещения (кухня, холл) — 19–22°C, санитарные помещения (душевая, санузел) — 22–25°C. Для «холодных» помещений контролируется лишь недопущение замерзания (температура выше 5°C), но активное отопление не производится для повышения энергоэффективности системы [5].

## 2. DIY-датчики температуры и влажности для системы мониторинга

Беспроводные датчики температуры и влажности разработаны на базе микроконтроллера ESP32-C3 Mini

и сенсора BME280 [6]. Выбор ESP32-C3 обусловлен наличием встроенного Wi-Fi модуля, низким энергопотреблением в режиме глубокого сна (10–15 мкА) и достаточной вычислительной мощностью для обработки данных сенсора. Сенсор BME280 обеспечивает высокую точность измерений: ±0.5°C для температуры, ±3 % для относительной влажности и ±1 гПа для атмосферного давления.

Конструкция датчика включает аккумулятор 18650 емкостью 3000 мАч, контроллер заряда TP4056 с защитой от переразряда и стабилизатор напряжения TPS63020 для обеспечения стабильного питания 3.3В при разряде аккумулятора. Корпус датчика выполнен с классом защиты IP40, что обеспечивает защиту от пыли.

Энергосберегающий режим работы датчиков реализован через периодическое пробуждение каждые 20 минут для выполнения измерений и передачи данных. Время активной работы составляет 5–8 секунд: 2 секунды на инициализацию сенсора и выполнение измерений, 3–6 секунд на установление Wi-Fi соединения и передачу данных. Остальное время датчик находится в режиме глубокого сна с отключенными Wi-Fi и Bluetooth модулями.

Расчет энергопотребления показывает следующие значения: активный режим с Wi-Fi — 150–170 мА, активный режим измерений — 20–30 мА, режим глубокого сна — 10–15 мкА. При заданном режиме работы суточное потребление составляет 12.4 мАч, что обеспечивает автономную работу около 8 месяцев от одного заряда аккумулятора [7].

Протокол передачи данных основан на HTTP POST запросах к веб-серверу, работающему на Raspberry Pi. Каждый датчик передает JSON-структуру, содержащую уникальный идентификатор датчика, временную метку, температуру, влажность, атмосферное давление и уровень заряда аккумулятора.

Размещение датчиков в помещениях выполняется с учетом особенностей теплообмена: высота установки 1.5 м от пола. В помещениях с теплыми полами датчики размещаются в центральной части комнаты для получения усредненных показаний температуры.

## 3. Алгоритм управления тепловым насосом

Центральный алгоритм управления реализован на Raspberry Pi Zero 2W с использованием языка программирования Python и библиотек NumPy для численных расчетов, Flask для веб-интерфейса и sqlite3 для ведения базы данных температурных измерений. Алгоритм выполняется в виде службы системы с периодичностью анализа данных каждые 5 минут.

Основной цикл управления включает следующие этапы: сбор и валидация данных от всех датчиков, анализ

температурных зон и выявление помещений с температурой ниже установленных порогов, принятие решения о необходимости изменения режима работы теплового насоса, формирование команд управления и их передача на тепловой насос через релейные модули.

Двухуровневая система регулирования обеспечивает оптимальное сочетание скорости реакции и энергоэффективности. Первый уровень регулирования основан на изменении скорости циркуляции теплоносителя в системе отопления. При обнаружении зон с температурой ниже установленного порога (19°C для большинства помещений) система увеличивает скорость циркуляции с минимальной на среднюю, а затем на максимальную. Изменение скорости циркуляции обеспечивает быструю реакцию системы (время отклика около 30 минут) при минимальном увеличении энергопотребления.

Второй уровень регулирования активируется при неэффективности изменения скорости циркуляции в течение 2 часов. В этом случае система повышает температуру теплоносителя с 35°C до 45°C, а при необходимости — до 55°C. Временная задержка в 2 часа учитывает инерционность системы теплых полов и предотвращает излишние переключения температурных режимов.

Алгоритм детекции проветривания основан на анализе скорости изменения температуры в отдельных помещениях. При обнаружении резкого снижения температуры (более 2°C за 20 минут) в одном помещении при стабильной температуре в остальных зонах система классифицирует это как проветривание и временно исключает данное помещение из алгоритма управления на период до 120 минут. Это позволяет избежать излишней реакции системы на кратковременные температурные возмущения.

Ограничение в режиме пиковой производительности (55 градусов температура теплоносителя и третья (максимальная) скорость циркуляции) установлено на значении электропотребления в 10 кВт. Данное ограничение обусловлено предельной мощностью источника электропитания.

ПИД-регулятор используется для точной подстройки параметров управления [8]. Коэффициенты регулятора настраиваются индивидуально для каждого типа помещений:  $K_p=0.8$ ,  $K_i=0.1$ ,  $K_d=0.05$  для жилых комнат;  $K_p=0.6$ ,  $K_i=0.08$ ,  $K_d=0.03$  для вспомогательных помещений. Различие коэффициентов обусловлено разными требованиями к точности поддержания температуры и скорости реакции системы.

### 5. Математическая модель системы управления

Математическая модель системы управления основана на тепловом балансе здания с учетом зонального

распределения температуры и инерционности системы теплых полов. Общее уравнение теплового баланса для  $i$ -й зоны записывается в виде:

$$C_i * dT_i/dt = Q_{heat,i} - Q_{loss,i} + Q_{exchange,i}$$

где:  $C_i$  — теплоемкость  $i$ -й зоны (Дж/К),  $T_i$  — температура воздуха в  $i$ -й зоне (°C),  $Q_{heat,i}$  — тепловая мощность, подводимая системой отопления (Вт),  $Q_{loss,i}$  — теплопотери  $i$ -й зоны (Вт),  $Q_{exchange,i}$  — теплообмен между зонами (Вт) [9].

Теплоемкость каждой зоны определяется как сумма теплоемкостей воздуха, ограждающих конструкций и внутренних предметов. Для жилых помещений площадью 20 м<sup>2</sup> с высотой потолков 2.7 м теплоемкость составляет приблизительно 15–18 МДж/К, для вспомогательных помещений — 8–12 МДж/К.

Модель теплопотерь учитывает передачу тепла через ограждающие конструкции, инфильтрацию и вентиляцию:

$$Q_{loss,i} = k_{walls,i} * (T_i - T_{out}) + k_{infi,i} * (T_i - T_{out}),$$

где:  $k_{walls,i}$  — приведенный коэффициент теплопередачи ограждающих конструкций  $i$ -й зоны (Вт/К),  $k_{infi,i}$  — коэффициент теплопотерь на инфильтрацию (Вт/К),  $T_{out}$  — температура наружного воздуха (°C).

Теплообмен между зонами моделируется через коэффициент теплопередачи внутренних перегородок:

$$Q_{exchange,i} = \sum k_{ij} * (T_j - T_i),$$

где:  $k_{ij}$  — коэффициент теплопередачи между  $i$ -й и  $j$ -й зонами (Вт/К).

Модель системы теплых полов учитывает инерционность нагрева стяжки и распределение температуры по площади помещения. Тепловая мощность теплого пола определяется выражением:

$$Q_{floor,i} = k_{floor,i} * S_i * (T_{coolant} - T_p)^n,$$

где  $k_{floor,i}$  — коэффициент теплопередачи теплого пола (Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>n</sup>)),  $S_i$  — площадь теплого пола в  $i$ -й зоне (м<sup>2</sup>),  $T_{coolant}$  — температура теплоносителя (°C),  $n$  — показатель степени (обычно 1.1–1.3 для систем теплых полов).

Инерционность системы моделируется через дифференциальное уравнение первого порядка с постоянной времени, зависящей от толщины стяжки и теплофизических свойств материала:

$$\tau_{floor} * dQ_{floor,i} / dt + Q_{floor,i} = Q_{floor,target,i}$$

где:  $\tau_{floor}$  — постоянная времени системы теплых полов (обычно 2–4 часа),  $Q_{floor,target,i}$  — целевая тепловая мощность.

Модель энергопотребления теплового насоса связывает электрическую мощность с тепловой через коэффициент преобразования [1]:

$$P_{electric} = Q_{heat} / COP(T_{source}, T_{supply}, Load\_factor),$$

где:  $COP$  — коэффициент преобразования, зависящий от температуры источника  $T_{source}$ , температуры подачи  $T_{supply}$  и коэффициента загрузки  $Load\_factor$ .

Зависимость  $COP$  от температурных условий аппроксимируется полиномом второй степени:

$$COP = COP_{nom} * (1 + 0,08 * (T_{source} - 5) - 0,04 * (T_{supply} - 35) - 0,002 * (T_{source} - 5))$$

где:  $COP_{nom} = 3.5$  — номинальный коэффициент преобразования при  $T_{source} = 5^{\circ}C$  и  $T_{supply} = 35^{\circ}C$ .

Алгоритм прогнозирования потребности в тепле основан на анализе тренда изменения наружной температуры и текущих показаний датчиков в помещениях. Прогнозируемая температура в  $i$ -й зоне через время  $t$  рассчитывается по формуле:

$$T_{i(t)} = T_{i(0)} + (Q_{heat,i} - Q_{loss,i}) * t / C_i,$$

Данная модель позволяет упреждающе корректировать режим работы теплового насоса при прогнозируемом изменении наружной температуры.

Алгоритм детекции проветривания использует производную температуры по времени и статистический анализ отклонений:

$$dT_i/dt = (T_{i(t)} - T_{i(t-\Delta t)})/\Delta t$$

$$\text{Проветривание}_i = (dT_i/dt < -0,2 \text{ К/мин}) \text{AND} (|dT_j/dt| < 0,05 \text{ К/мин для } j \neq i)$$

### 5. Результаты моделирования и экспериментальные данные

Численное моделирование работы системы выполнено для температуры наружного воздуха от  $-5^{\circ}C$  до  $-15^{\circ}C$ . Моделирование проводилось на интервале 72 часа с шагом интегрирования 5 минут (рис. 1).

Результаты моделирования демонстрируют эффективность двухуровневой системы регулирования. При температуре наружного воздуха от  $-5^{\circ}C$  до  $-15^{\circ}C$  система успешно поддерживает заданные температурные режимы во всех зонах с точностью  $\pm 0.5^{\circ}C$ . Время отклика системы при изменении скорости циркуляции составляет 25–35 минут, что обеспечивает быструю реакцию на изменения температурных условий. Переход на более высокую температуру теплоносителя (второй

уровень регулирования) происходит через 2 часа при неэффективности первого уровня, что учитывает инерционность системы теплых полов. Система демонстрирует стабильную работу без колебательных процессов благодаря правильно настроенным ПИД-регуляторам с коэффициентами  $K_p=0.8$ ,  $K_i=0.1$ ,  $K_d=0.05$  для жилых комнат.

На втором графике (рис. 2) представлен алгоритм управления с учётом проветриваний и демонстрации режимов изменения скорости циркуляции жидкости в системе. Алгоритм детекции проветривания показывает высокую эффективность: время детекции проветривания составляет 15–20 минут при резком снижении температуры более  $2^{\circ}C$  за 20 минут. Исключение помещения из алгоритма управления на 120 минут предотвращает излишнее энергопотребление и повышает стабильность работы системы при кратковременных температурных возмущениях.

Анализ энергопотребления показывает значительные различия между режимами работы. Режим  $35^{\circ}C$  с минимальной скоростью циркуляции обеспечивает  $COP = 3.8$  при потреблении 2.6 кВт, режим  $45^{\circ}C$  со средней скоростью дает  $COP = 3.4$  при потреблении 4.1 кВт, а режим  $55^{\circ}C$  с максимальной скоростью характеризуется  $COP = 2.9$  при потреблении 6.9 кВт. Сезонный коэффициент эффективности ( $SCOP$ ) составляет 3.2–3.6 в зависимости от климатических условий. Экономия электроэнергии относительно систем без зонального управления достигает 15–20 %, что составляет экономию 2400–3200 кВт·ч в год для рассматриваемого объекта площадью 100 м<sup>2</sup>.

### Вывод

В результате проведенного исследования разработана и практически реализована интеллектуальная система управления геотермальным тепловым насосом на базе DIY-компонентов и беспроводных технологий. Система демонстрирует высокую эффективность в поддержании температурного комфорта при значительном снижении энергопотребления.

Основными достижениями работы являются создание полнофункциональной системы управления стоимостью в 5–7 раз меньше коммерческих аналогов при сопоставимой функциональности, достижение повышения энергоэффективности на 15–20 % благодаря зональному управлению и интеллектуальным алгоритмам регулирования, разработка двух взаимосвязанных математических моделей теплового баланса здания и динамики системы теплых полов, обеспечивающих точное прогнозирование поведения системы и оптимизацию алгоритмов управления [10].

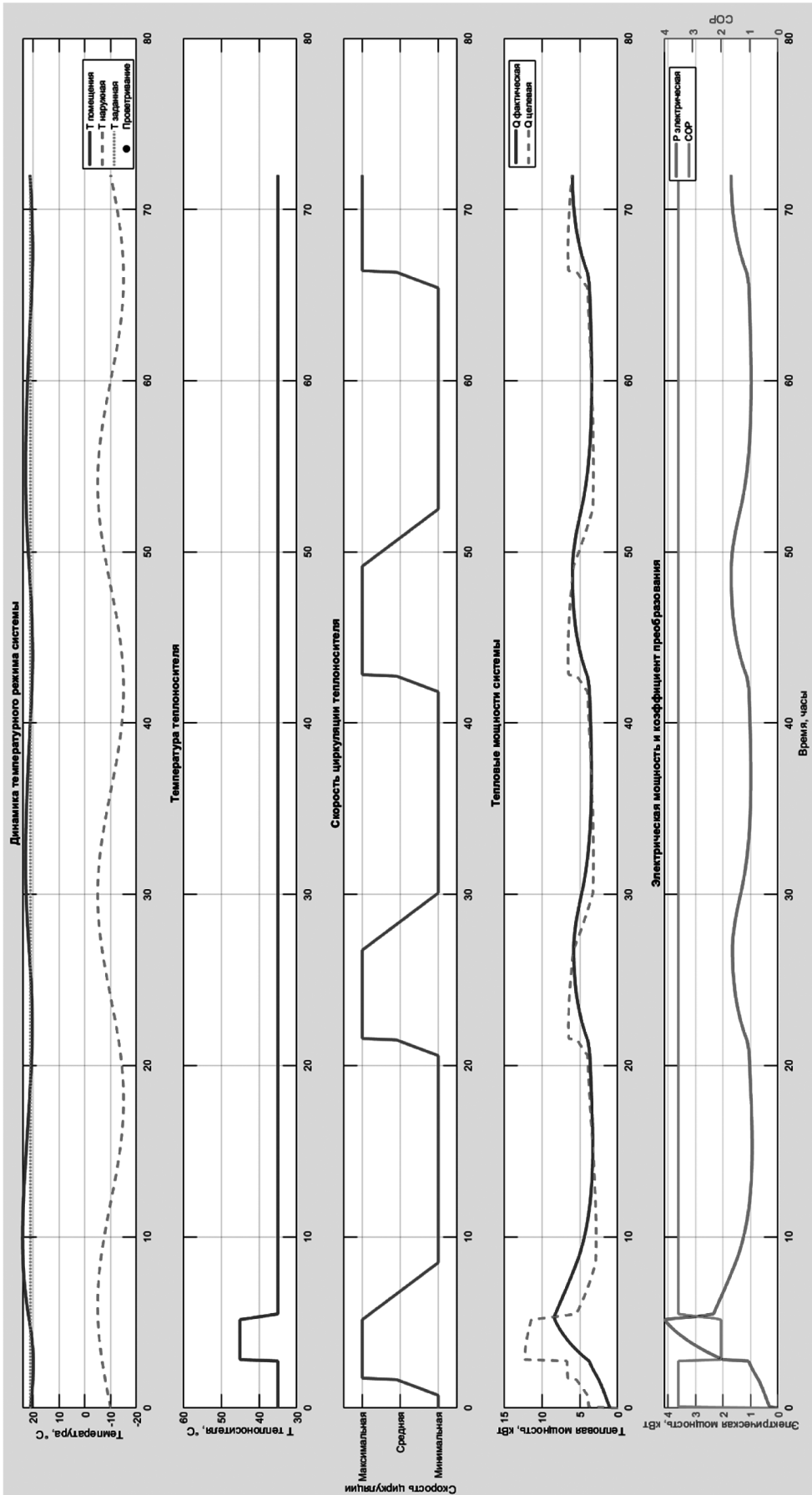


Рис. 1. Динамика температурного режима системы

Моделирование системы управления геотермальным отоплением с алгоритмом проветривания

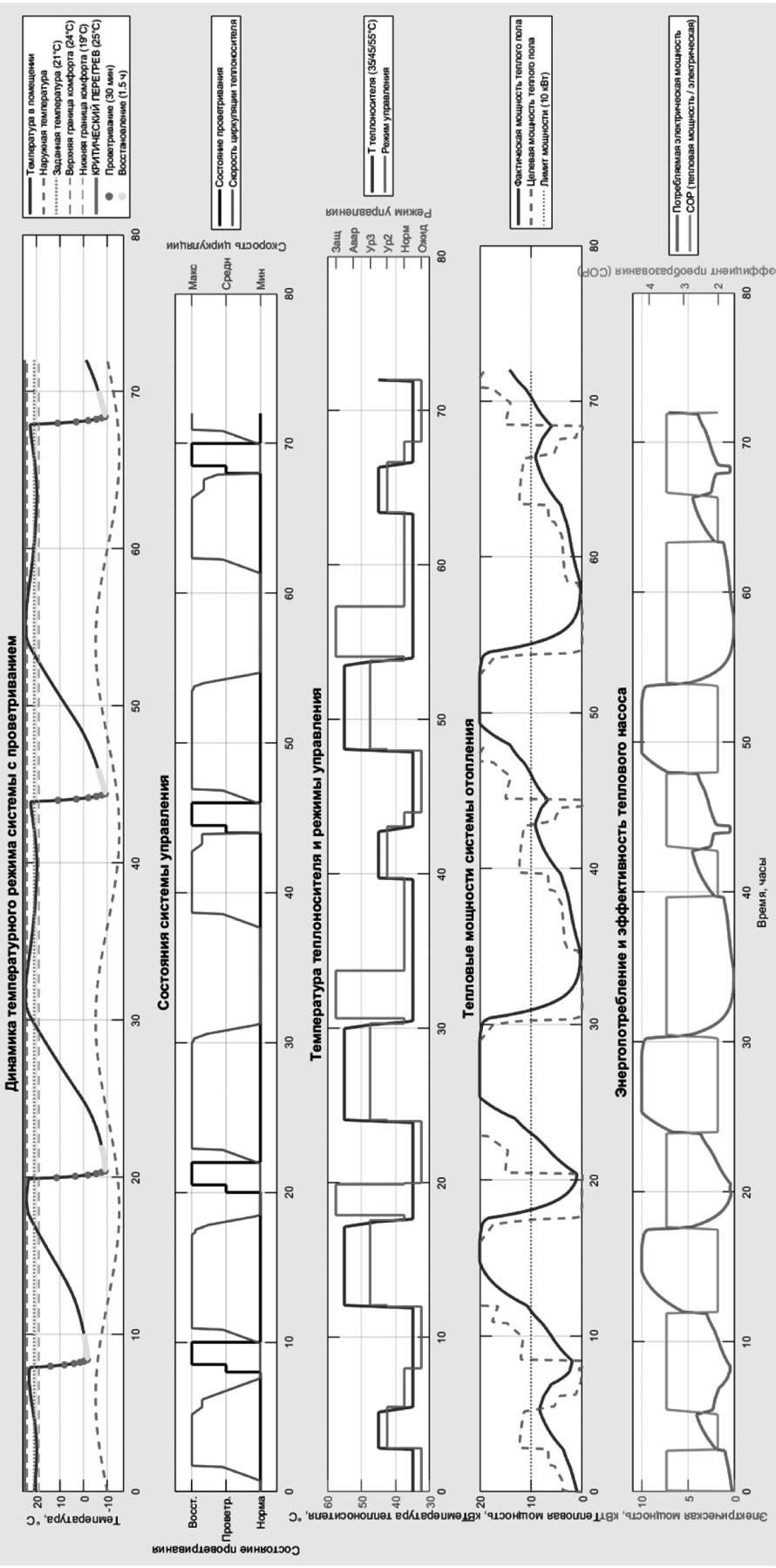


Рис. 2. Система управления с учётом проветриваний

Разработанная математическая модель теплового баланса здания с учетом зонального распределения температуры позволяет прогнозировать температурный режим каждого помещения и оптимизировать работу системы отопления. Модель системы теплых полов с учетом инерционности нагрева стяжки обеспечивает понимание динамических характеристик системы и необходимость упреждающего управления с постоянной времени 2–4 часа.

Реализованный двухуровневый алгоритм управления с детекцией проветривания обеспечивает стабильную работу системы без ложных срабатываний, при этом первый уровень регулирования через изменение скорости циркуляции обеспечивает быстрый отклик си-

стемы за 30 минут, а второй уровень через изменение температуры теплоносителя активируется при неэффективности первого уровня через 2 часа.

Система успешно адаптируется под различные архитектурные решения и климатические условия, поддерживает температурные требования для жилых помещений 21–24°C, вспомогательных помещений 19–22°C и санитарных помещений 22–25°C с точностью  $\pm 0.5^\circ\text{C}$ . Практическая значимость работы подтверждается возможностью тиражирования решения для широкого класса объектов при значительной экономической эффективности и простоте реализации на базе доступных компонентов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Deng J., Su Y., Peng C., Qiang W., Cai S., Qingpeng W., Zhang H. How to improve the energy performance of mid-deep geothermal heat pump systems: Optimization of heat pump, system configuration and control strategy // *Energy*. — 2023. — Vol. 285. — 129537. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.129537>
2. Johnson B., Krishnamoorthy S. Where are Today's Residential Heat Pump Technologies Cost-Effective? // *ASHRAE Transactions*. — 2021. — Vol. 127, № 1. — С. 496. — ISSN 0001-2505.
3. Kijo-Kleczkowska A., Bruś P., Więciorkowski G. Economic analysis of heat pump exploitation — A case study // *Energy*. — 2023. — Vol. 280. — 128184. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128184>
4. Yaici W., Entchev E., Longo M. Internet of Things (IoT)-Based System for Smart Home Heating and Cooling Control // 2022 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2022 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe). — Prague, Czech Republic, 28 июня — 01 июля 2022 г. — IEEE, 2022. <https://doi.org/10.1109/EEEIC/ICPSEurope54979.2022.9854634>
5. СП 60.13330.2020. Свод правил. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха. СНиП 41-01-2003 : утв. и введен в действие Приказом Минстроя России от 30.12.2020 N 921/пр. — М. : Стандартинформ, 2021. — 138 с. — URL: <https://минстрой.рф/upload/%D0%A1%D0%9F%2060.13330.2020.pdf> (дата обращения: 23.05.2025).
6. Gada U., Joshi B., Kadam S., Jain N., Kodeboyina S., Menon R. IoT based Temperature Monitoring System // 2021 4th Biennial International Conference on Nascent Technologies in Engineering (ICNTE). — NaviMumbai, India, 15–16 января 2021 г. — IEEE, 2021. — С. 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICNTE51185.2021.9487691>
7. Md Dzahir M.A.S., Chia K.S. Evaluating the Energy Consumption of ESP32 Microcontroller for Real-Time MQTT IoT-Based Monitoring System // 2023 International Conference on Innovation and Intelligence for Informatics, Computing, and Technologies (3ICT). — Sakheer, Bahrain, 20–21 ноября 2023 г. — IEEE, 2023. <https://doi.org/10.1109/3ICT60104.2023.10391358>
8. Rahmadini V.F., Ma'arif A., Abu N.S. Design of Water Heater Temperature Control System using PID Control // *Control Systems and Optimization Letters*. — 2023. — Vol. 1, № 2. — С. 111–117. — ISSN 2985-6116. <https://doi.org/10.59247/csol.v1i2.41>
9. Узаков Г.Н., Ташмаматов Б.М., Камолов Б.И. Математическое моделирование теплового режима типового сельского дома // *Инновационные технологии*. — 2024. — Т. 55, № 3. — С. 50–57. — ISSN 2181-4732.
10. Современные технологии: актуальные вопросы, достижения и инновации: сборник статей XXXIX Международной научно-практической конференции (Пенза, 25 апреля 2021 г.) / отв. ред. Ф.Ю. Гуляев. — Пенза: Наука и Просвещение, 2021. — 90 с. — ISBN 978-5-00159-822-0.

© Зубарев Михаил Андреевич (mishaniya1121@yandex.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»