

УДК 004.415

И.И. Абдуллаев¹ isa.risa.2005@gmail.com

К.А. Кадырбеков¹ Kadyrbekovaidar19@gmail.com

А.И. Чыныбаев¹ ilgizchynybaev@gmail.com

С.Н. Верзунов² verzunov@hotmail.com

¹Кыргызско-Германский институт прикладной информатики

²Институт машиноведения, автоматизации и геомеханики НАН КР

МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ РАЗРАБОТКИ ИОТ- И СВ-ОРИЕНТИРОВАННОЙ ПЛАТФОРМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ ИНЖЕНЕРНЫМИ СИСТЕМАМИ ЗДАНИЙ

Аннотация. Рассматривается разработка программной платформы контекстно-зависимого управления инженерными системами учебных зданий на основе IoT-телеметрии, данных расписания и оценки фактической занятости помещений методами компьютерного зрения. Предлагаемая система мониторинга вентиляции и электроэнергии в аудиториях (СМВЭА) объединяет сенсорный уровень, CV-модуль, MQTT-брокер, модуль формирования контекста помещения, детерминированное управляющее ядро, исполнительный контур и веб-панель. Формальная модель включает температуру внутри и снаружи помещения, состояние окна и признак качества данных; выходами модели являются режимы вентиляции, освещения и отопления. Задана воспроизводимая базовая конфигурация прототипа: период управления 60 с, гистерезис по CO₂, освещённости и температуре, а также правила PRE_HEAT, ECO, COAST и DAYLIGHT_HARVEST. Значения установок рассматриваются как начальные инженерные настройки и должны калиброваться с учётом местных норм и характеристик конкретного помещения. Текущая версия использует прозрачную rule-based логику; нейросетевое прогнозирование выделено в отдельное направление дальнейшего развития и не представляется как реализованный результат. Работоспособность логики оценивается набором функциональных сценариев. Количественное снижение энергопотребления в статье не заявляется: для его доказательства сформулирована методика последующей полевой оценки по базовой линии, энергопотреблению и показателям качества внутренней среды.

Ключевые слова: автоматизация зданий, BMS, IoT-мониторинг, компьютерное зрение, занятость помещений, MQTT, вентиляция, отопление, освещение, энергоменеджмент, контекстно-зависимое управление

Введение

Учебные здания характеризуются переменной и слабо предсказуемой загрузкой: фактическая посещаемость, продолжительность занятий и использование отдельных аудиторий могут отличаться от расписания. При фиксированном управлении инженерные подсистемы продолжают работать в пустых помещениях или, напротив, не успевают обеспечить требуемые условия к началу занятия. Это создаёт одновременно две задачи: поддержание приемлемого микроклимата и исключение необоснованной работы оборудования. Нормативные подходы к вентиляции задают требования к расходу наружного воздуха и качеству внутренней среды, а система энергоменеджмента требует измеряемой базовой линии и проверяемых показателей эффективности [1, 2].

Для образовательных помещений особенно важен контроль качества воздуха. Концентрация CO₂ используется как практический индикатор эффективности воздухообмена и связанной с присутствием людей нагрузки, однако сама по себе она не описывает весь контекст эксплуатации. Исследования demand-controlled ventilation показывают преимущества адаптации воздухообмена к фактическим условиям, но также указывают на необходимость учитывать устойчивость системы, размещение датчиков и баланс между качеством воздуха и энергопотреблением [3, 5]. Управление по занятости способно дополнительно сократить периоды необоснованной работы HVAC-оборудования [4].

Методы компьютерного зрения позволяют оценивать наличие и число людей по видеопотоку, однако результат CV-модуля должен быть интегрирован с телеметрией,

расписанием и исполнительными устройствами. В противном случае компьютерное зрение остаётся изолированной подсистемой наблюдения. Современные методы обнаружения объектов создают технологическую основу для такой оценки, но качество распознавания, задержки и требования к защите персональных данных должны учитываться отдельно [6].

Цель работы состоит в разработке согласованной архитектуры и воспроизводимой логики прототипа СМВЭА для адаптивного управления вентиляцией, освещением и отоплением учебной аудитории. Внутреннее обозначение программного прототипа и веб-интерфейса - OSV1; термин СМВЭА используется для обозначения всей функциональной платформы.

Для достижения цели решаются следующие задачи:

- формируется единый контекст помещения, включающий телеметрию, занятость, расписание, внешние условия и качество входных данных;
- задаётся формальная модель управляющих воздействий для вентиляции, освещения и отопления;
- определяются численные параметры базовой конфигурации прототипа и правила гистерезиса;
- разделяются реализованная детерминированная логика и перспективный модуль прогнозирования;
- формируется набор функциональных сценариев и методика последующей количественной оценки энергоэффективности.

Формулировка проблемы

В исходном состоянии типовая аудитория рассматривается как объект без единого сенсорного и диспетчерского контура. Отдельные выключатели, термостаты, расписания и действия персонала не образуют общего механизма принятия решений. Из-за этого система не может одновременно ответить на вопросы: используется ли помещение фактически, насколько достоверны текущие измерения, требуется ли усиленный воздухообмен, достаточно ли естественного света и следует ли заранее подготовить температурный режим.

Критическая особенность задачи состоит в конфликте целей. Усиление вентиляции улучшает воздухообмен, но может увеличивать тепловые потери; ранний прогрев повышает комфорт, но при отмене занятия приводит к лишнему расходу энергии; отключение освещения экономит электроэнергию, но недопустимо при ошибке определения занятости. Поэтому управляющее ядро должно использовать не одно пороговое условие, а приоритетную совокупность правил, учитывать качество данных и исключать частые переключения исполнительных устройств.

Предлагаемый подход не заменяет проектирование инженерных систем и обязательные расчёты вентиляции. Он относится к надстройке автоматизированного управления, которая выбирает режимы в пределах допустимых характеристик оборудования и локальных нормативных ограничений.

Анализ существующих подходов

На практике применяются ручное управление, расписание-ориентированные сценарии, пороговое управление по CO₂, occupancy-driven control и коммерческие BMS. Каждый подход решает часть задачи, но отличается составом данных, прозрачностью логики и стоимостью интеграции. Коммерческие BMS поддерживают широкий набор протоколов, контроллеров и функций; их фактические возможности зависят от выбранной конфигурации, лицензий и состава оборудования [12-15]. Поэтому корректное сравнение должно рассматривать не абстрактное превосходство одной системы, а пригодность конкретной архитектуры для переменной загрузки учебных помещений.

Таблица 1 - Сравнение подходов к управлению инженерными системами учебных помещений

Подход	Используемые данные	Тип управления	Сильные стороны	Основные ограничения
Ручное	Наблюдения пользователя	Реактивное, субъективное	Минимальные начальные затраты	Нет воспроизводимости, истории и централизованного контроля
По расписанию	Время и календарь	Предварительно заданные сценарии	Простота и предсказуемость	Не учитывает фактическую занятость и отклонения от расписания
DCV по CO2	Концентрация CO2	Обратная связь по одному параметру	Адаптация воздухообмена к нагрузке	Не управляет полным контекстом освещения и отопления
По занятости	Датчик присутствия или CV	Адаптивное по факту использования	Связывает нагрузки с реальным присутствием	Зависит от достоверности определения занятости
Коммерческая BMS	Датчики, расписания, энергометрики, тревоги	Конфигурируемое централизованное	Широкая интеграция и диспетчеризация	Стоимость, сложность настройки и зависимость от проекта
СМВЭА	CO2, L, T, T_ext, O, S, W, Q	Контекстное rule-based управление	Прозрачные правила, единый контекст, модульность	Требует датчиков, калибровки и полевой проверки эффекта

IoT-архитектуры обеспечивают объединение сенсоров, исполнительных устройств и программных сервисов, а событийная модель позволяет передавать телеметрию асинхронно [7, 8]. Для СМВЭА выбран модульный подход: отдельные компоненты могут заменяться без изменения общей модели контекста и интерфейса управляющего ядра.

Предлагаемая архитектура СМВЭА

Функциональная архитектура платформы включает источники данных, транспорт событий, модуль формирования контекста, управляющее ядро, исполнительный контур, хранилище и веб-интерфейс. На рисунке 1 показаны информационные и управляющие связи между компонентами.

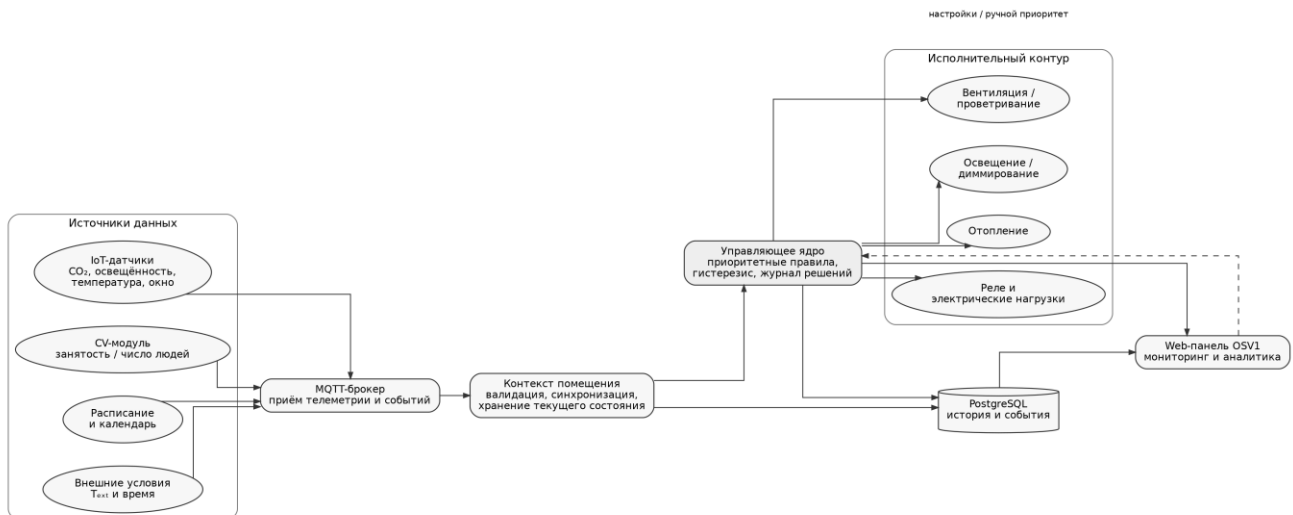


Рисунок 1 - Функциональная архитектура платформы СМВЭА

Сенсорный уровень измеряет концентрацию CO2, освещённость и температуру, а также фиксирует состояние окна. CV-модуль формирует агрегированные признаки занятости: бинарный факт присутствия, оценку числа людей, временную метку и показатель уверенности. Расписание предоставляет текущий и ближайший интервал использования помещения. Внешний источник данных передаёт наружную температуру и временные признаки.

MQTT-брокер используется для асинхронной доставки телеметрии и команд. Выбор MQTT соответствует характеру IoT-систем, где важны малый объём сообщений, схема publish/subscribe и слабая связанность компонентов [16]. Модуль контекста синхронизирует данные по временным меткам, проверяет их актуальность и формирует единый снимок состояния помещения.

Управляющее ядро не обращается напрямую к отдельным датчикам. Оно получает валидированный контекст, применяет приоритеты, рассчитывает режимы и записывает

объяснение каждого решения. Такой подход упрощает тестирование: один и тот же набор входных данных должен приводить к одному и тому же результату.

Общий цикл адаптивного управления

Управление выполняется циклически. До расчёта режимов проверяются актуальность данных и непротиворечивость сигналов. Если обязательный параметр отсутствует или устарел, система не должна выдавать агрессивное управляющее воздействие на основании недостоверного контекста. Вместо этого активируется заранее заданный безопасный режим, формируется тревога и сохраняется причина отказа.

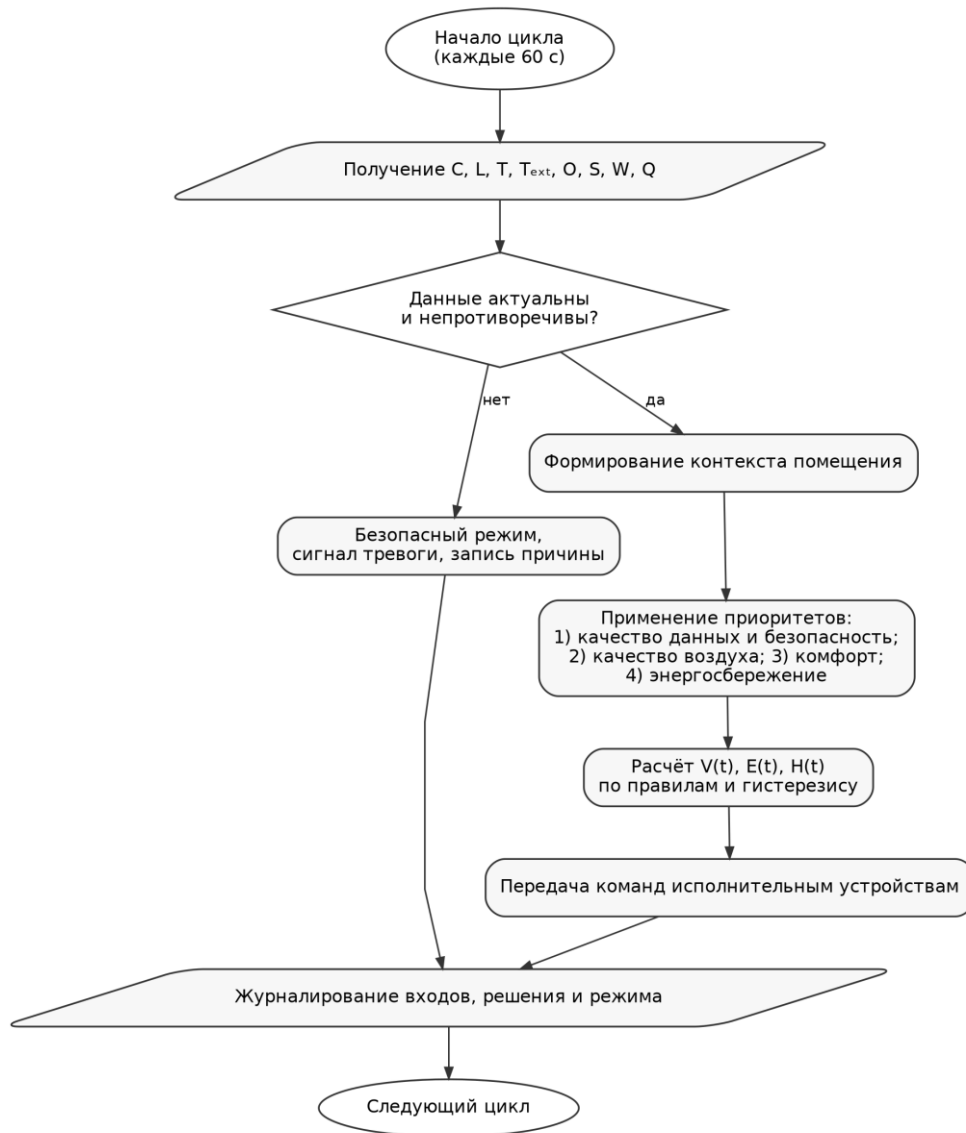


Рисунок 2 - Общий цикл принятия решений в СМВЭА

Приоритеты применяются в следующем порядке: качество данных и безопасность; качество воздуха; температурный и световой комфорт; энергосбережение. Это означает, что экономичный режим не может отменить действие, необходимое для безопасной работы оборудования или восстановления допустимого воздухообмена.

Программная архитектура прототипа

Программная реализация построена как набор взаимодействующих сервисов. Источники телеметрии и CV-модуль публикуют сообщения через MQTT; управляющее ядро формирует контекст и правила; сервисы управления передают команды исполнительным устройствам; PostgreSQL хранит телеметрию, решения и события; веб-интерфейс React обращается к

серверной части через API. Серверная логика может быть реализована на базе Spring Boot. Такая декомпозиция позволяет независимо масштабировать сбор данных, аналитику и интерфейс.

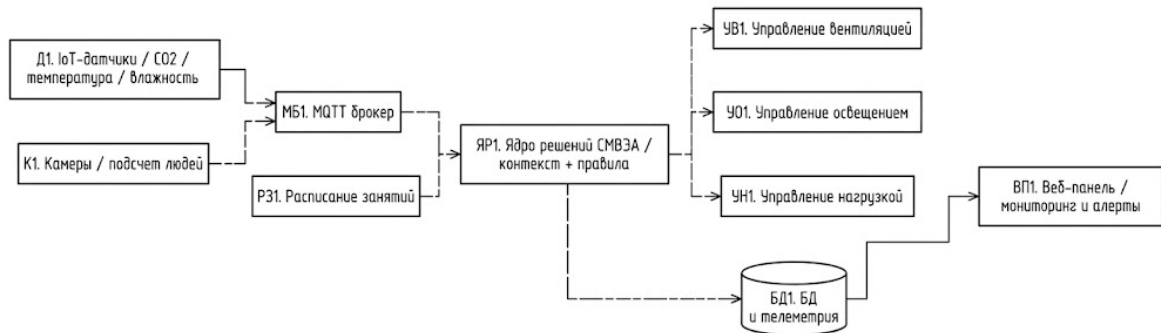


Рисунок 3 - Компонентная архитектура программного прототипа СМВЭА

Текущая версия управляющего ядра является детерминированной и основана на правилах. Это принципиально важно для воспроизводимости: нейросетевая модель не включается в описание реализованного контура до появления обучающего набора данных, процедуры валидации и количественных результатов.

Формальная модель контекста и управляющих воздействий

Состояние помещения в момент времени t описывается набором измеряемых и дискретных признаков. Управляющий вектор включает три независимых воздействия: режим вентиляции $V(t)$, уровень освещения $E(t)$ и режим отопления $H(t)$.

$$U(t) = [V(t), E(t), H(t)] = F(C(t), L(t), T(t), T_{ext}(t), O(t), S(t), W(t), Q(t)). \quad (1)$$

Функция F является набором приоритетных правил с гистерезисом. Она не рассматривается как обученная модель. Состав переменных приведён в таблице 2.

Таблица 2 - Переменные модели контекста помещения

Обозначение	Содержание	Тип / единица	Назначение
$C(t)$	Концентрация CO2	ppm	Оценка нагрузки на вентиляцию
$L(t)$	Освещённость в рабочей зоне	лк	Управление искусственным освещением
$T(t)$	Температура внутри помещения	°C	Управление отоплением
$T_{ext}(t)$	Наружная температура	°C	Контекст прогрева и теплопотерь
$O(t)$	Фактическая занятость	0/1 или число людей	Связь режимов с реальным использованием
$S(t)$	Состояние расписания	0/1 + время до занятия	Предварительная подготовка помещения
$W(t)$	Состояние окна	0 - закрыто; 1 - открыто	Выявление конфликта с отоплением
$Q(t)$	Качество и актуальность данных	valid / stale / invalid	Запрет решений по недостоверным данным
$V(t)$	Режим вентиляции	ECO / NORMAL / BOOST	Команда исполнительному контуру
$E(t)$	Режим освещения	OFF / DIM / NORMAL / HIGH	Команда диммерам и реле
$H(t)$	Режим отопления	ECO / COAST / NORMAL / PRE_HEAT	Команда отопительному контуру

Базовая конфигурация и воспроизводимость алгоритма

Чтобы алгоритм можно было повторить и проверить, в прототипе задаётся базовая конфигурация параметров. Она не заменяет санитарные, строительные и эксплуатационные нормы. Перед пилотным внедрением значения должны быть согласованы с проектом вентиляции, характеристиками оборудования и требованиями конкретного учреждения.

Таблица 3 - Начальные параметры демонстрационной конфигурации прототипа

Параметр	Значение	Использование в алгоритме
Период получения и обработки данных	60 с	Один цикл формирования контекста и выдачи решения
CO2: включение BOOST	1000 ppm	Переход в усиленный режим при валидном измерении
CO2: возврат из BOOST	800 ppm	Гистерезис, исключающий частые переключения
Целевая освещённость	500 лк	Базовая уставка для учебного помещения
Гистерезис освещённости	± 50 лк	HIGH при $L < 450$ лк; DAYLIGHT_HARVEST при $L > 550$ лк
Комфортная температура	21 °C	Центр рабочего диапазона отопления
Температурный гистерезис	± 1 °C	NORMAL ниже 20 °C; COAST выше 22 °C
Температура режима ECO	16 °C	Поддержание минимального уровня в длительно пустом помещении
Горизонт PRE HEAT	30 мин	Предварительный прогрев перед запланированным занятием
Тайм-аут телеметрии	5 мин	Перевод параметра в состояние stale и формирование тревоги
Подтверждение занятости	2 цикла	Фильтрация кратковременных ошибок CV-модуля

Гистерезис является обязательной частью алгоритма. Без него измерительный шум около порога вызывает частое включение и отключение оборудования. В зоне между порогами сохраняется предыдущий допустимый режим, если не возникло более приоритетного условия.

Алгоритм управления вентиляцией

Режим вентиляции выбирается после проверки качества данных. Если помещение пусто и расписание не предусматривает его использование, устанавливается режим ECO. При наличии людей или запланированного занятия концентрация CO2 сравнивается с двумя пороговыми значениями. При концентрации 1000 ppm и выше вентиляция переключается в режим BOOST, а при снижении концентрации до 800 ppm и ниже возвращается в режим NORMAL. В диапазоне от 800 до 1000 ppm сохраняется предыдущий режим, что предотвращает частые переключения оборудования. Порог 1000 ppm является настраиваемым инженерным параметром прототипа, а не универсальной нормативной границей; требуемый расход наружного воздуха должен определяться проектным расчётом [1].

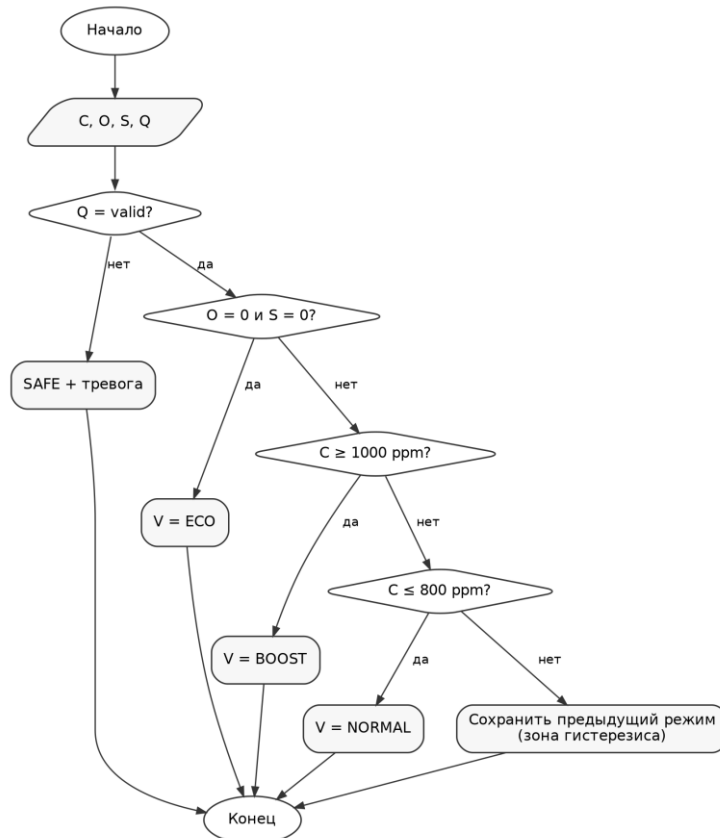


Рисунок 4 - Упрощённый алгоритм выбора режима вентиляции

Если данные CO2 устарели, автоматическое усиление или ослабление вентиляции по этому сигналу блокируется. Система переходит к безопасной конфигурации, определённой проектом, и уведомляет оператора. Такой порядок предотвращает ложное энергосбережение за счёт игнорирования неисправного датчика.

Алгоритм управления освещением

При отсутствии людей и занятия освещение отключается. В занятом помещении используется целевая освещённость 500 лк с гистерезисом ± 50 лк. При $L < 450$ лк устанавливается HIGH; при $L > 550$ лк активируется DAYLIGHT_HARVEST или диммирование; в промежуточной зоне сохраняется NORMAL. Конкретная зависимость мощности светильников от ошибки освещённости определяется характеристиками диммера и должна калиброваться на объекте.

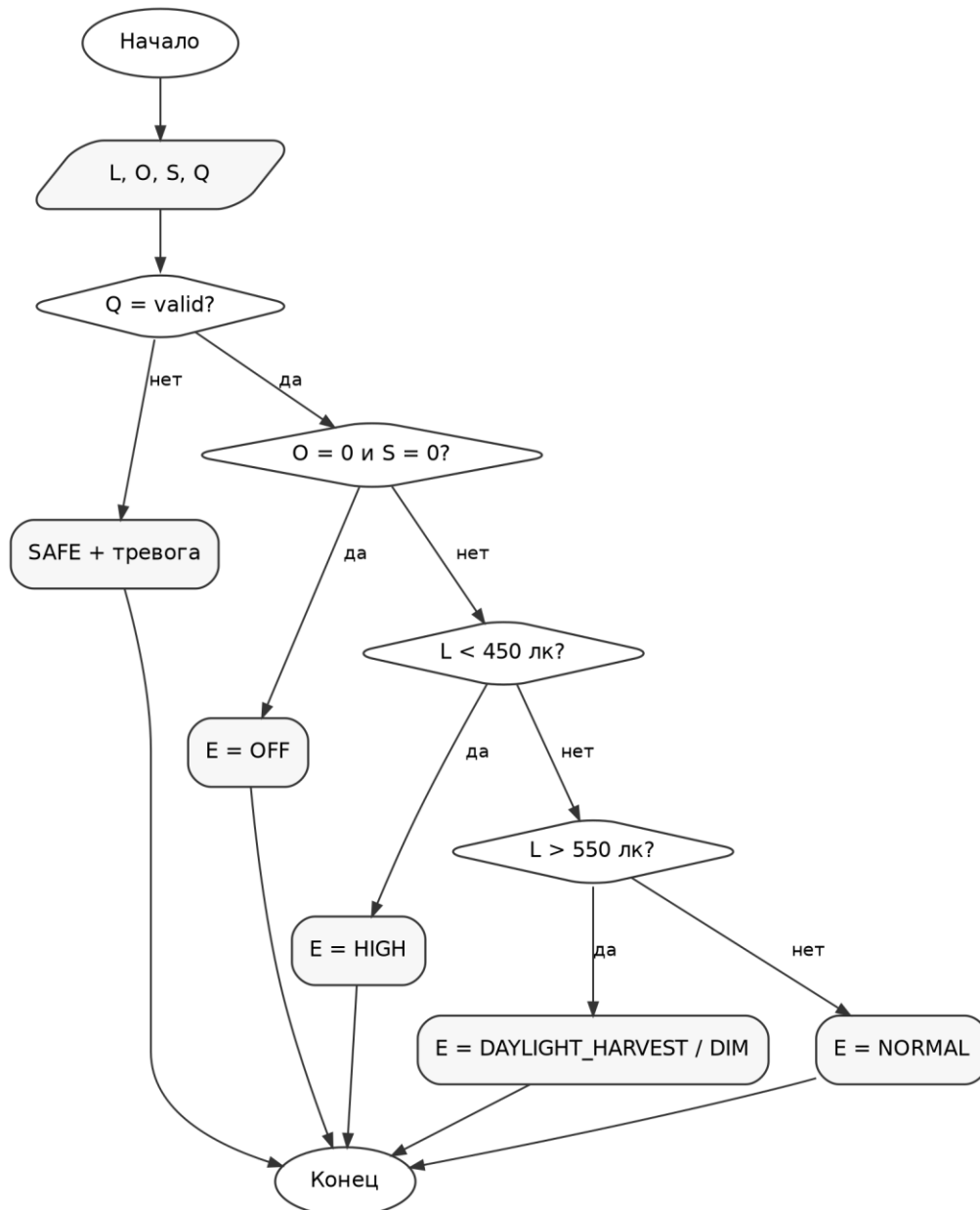


Рисунок 5 - Алгоритм выбора режима освещения

Для исключения ошибочного отключения света единственный отрицательный результат CV-модуля не считается достаточным. Признак отсутствия должен подтвердиться в двух последовательных циклах или альтернативным датчиком присутствия. При конфликте расписания и CV приоритет определяется эксплуатационной политикой: во время

запланированного занятия система может сохранять минимальное освещение до подтверждения пустого помещения.

Алгоритм управления отоплением

Управление отоплением использует температуру помещения, наружную температуру, расписание, занятость и состояние окна. PRE_HEAT включается, если до занятия остаётся не более 30 минут и температура ниже 20 °С. ECO применяется при длительном отсутствии людей и ближайших занятий. NORMAL активируется при $T < 20$ °С в используемом помещении, а COAST - при $T > 22$ °С или после достижения комфортной зоны. В диапазоне 20-22 °С сохраняется предыдущий допустимый режим.

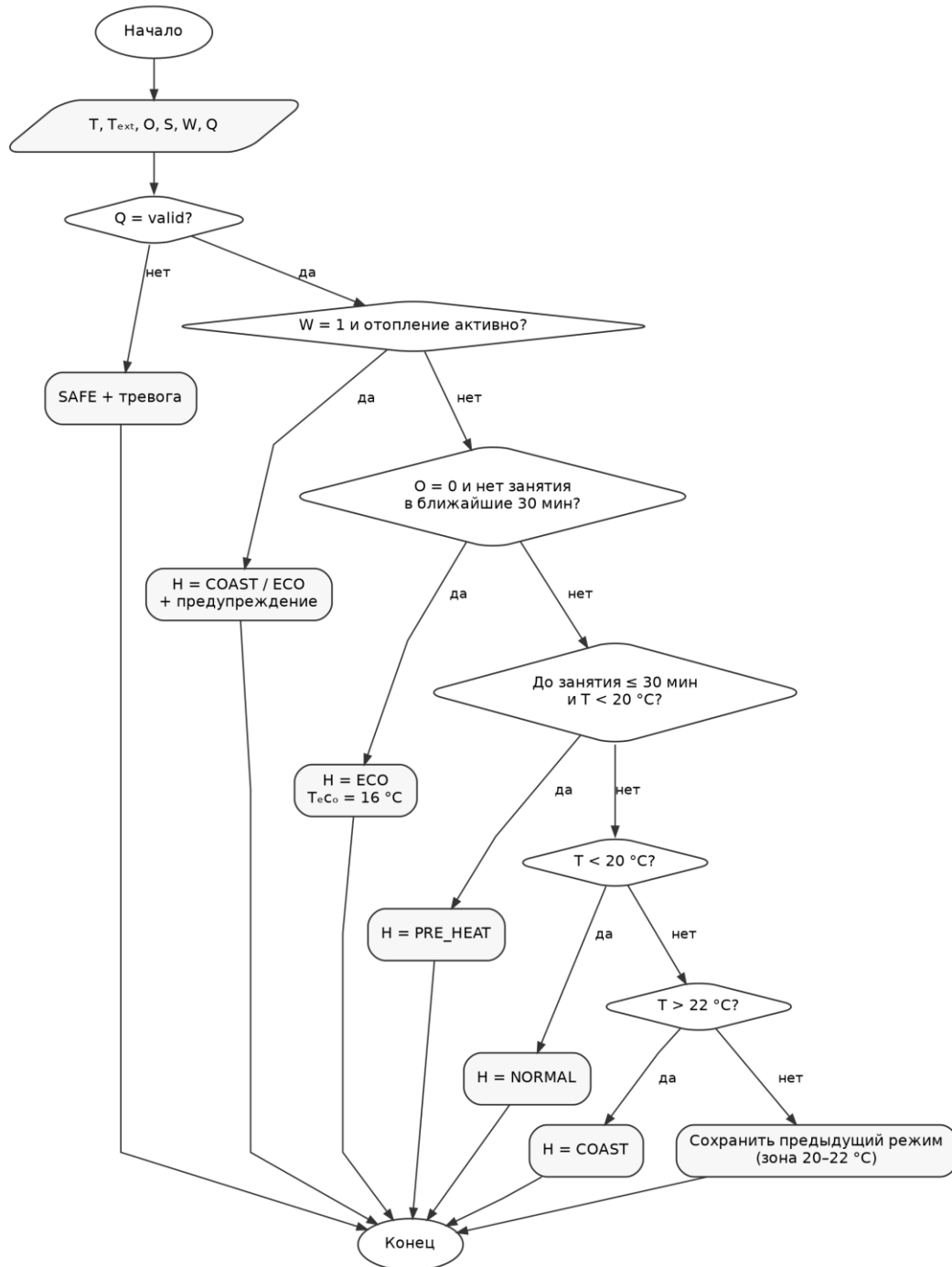


Рисунок 6 - Логика выбора режимов отопления PRE_HEAT, ECO, NORMAL и COAST

Открытое окно при активном отоплении рассматривается как аномальная комбинация. В этом случае управляющее ядро уменьшает тепловую нагрузку до COAST или ECO,

формирует предупреждение и сохраняет событие. При этом алгоритм не должен препятствовать проветриванию, если оно требуется для качества воздуха; конфликт разрешается по приоритету безопасности и воздухообмена.

Выявление аномалий и объяснимость решений

Контрольная система должна фиксировать не только итоговый режим, но и основание его выбора. Для каждого цикла сохраняются временная метка, входной контекст, активное правило, предыдущее и новое состояние, а также признак ручного вмешательства. Такой журнал позволяет разбирать спорные переключения и формировать проверяемую базовую линию энергоменеджмента [2].

В базовой версии учитываются следующие аномалии: превышение порога CO₂; открытое окно при активном отоплении; отсутствие или устаревание обязательного измерения; резкое физически неправдоподобное изменение параметра; расхождение между CV-модулем и датчиком присутствия; отсутствие подтверждения исполнения команды. Для каждой аномалии задаются уровень важности, безопасный режим и правило уведомления.

Сравнение с коммерческими BMS

Siemens Desigo CC, Schneider Electric EcoStruxure Building Operation, Honeywell BMS и Johnson Controls Metasys являются промышленными платформами для интеграции инженерных систем, диспетчеризации, тревог и аналитики [12-15]. Их нельзя корректно характеризовать как исключительно статические: современные конфигурации поддерживают расписания, правила, тренды, оптимизацию и интеграцию широкого набора контроллеров. Основное отличие СМВЭА состоит не в заявлении абсолютного функционального превосходства, а в узкой ориентации прототипа на учебные аудитории, открытом технологическом стеке и явной модели контекста помещения.

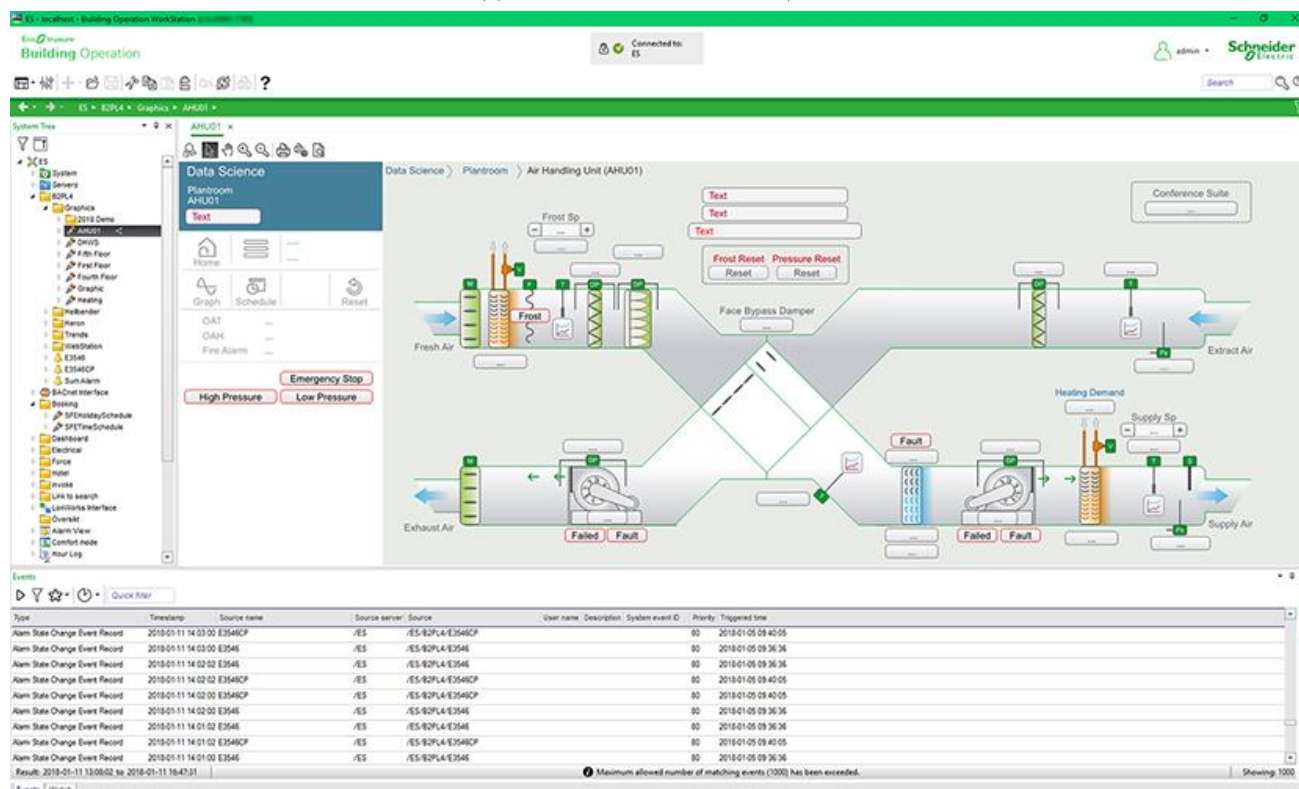


Рисунок 7 - Пример интерфейса Schneider Electric EcoStruxure Building Operation [13]



Рисунок 8 - Пример интерфейса Siemens Desigo CC [12]

Для пилотного объекта СМБЭА может быть самостоятельным прототипом или надстройкой над существующей BMS. В последнем случае MQTT/API-шлюз передаёт контекст и рекомендации, а окончательное управление остаётся в сертифицированном контуре автоматики. Такой вариант снижает риск подмены критических функций исследовательским программным обеспечением.

Веб-интерфейс и программный прототип OSV1

Веб-панель отображает текущие значения датчиков, занятость, состояние исполнительных устройств, активный режим, историю событий и графики параметров. Название OSV1 на интерфейсе является внутренним обозначением программной реализации, а не отдельной системой. Это устраняет несогласованность между названием СМБЭА в тексте и маркировкой интерфейса.

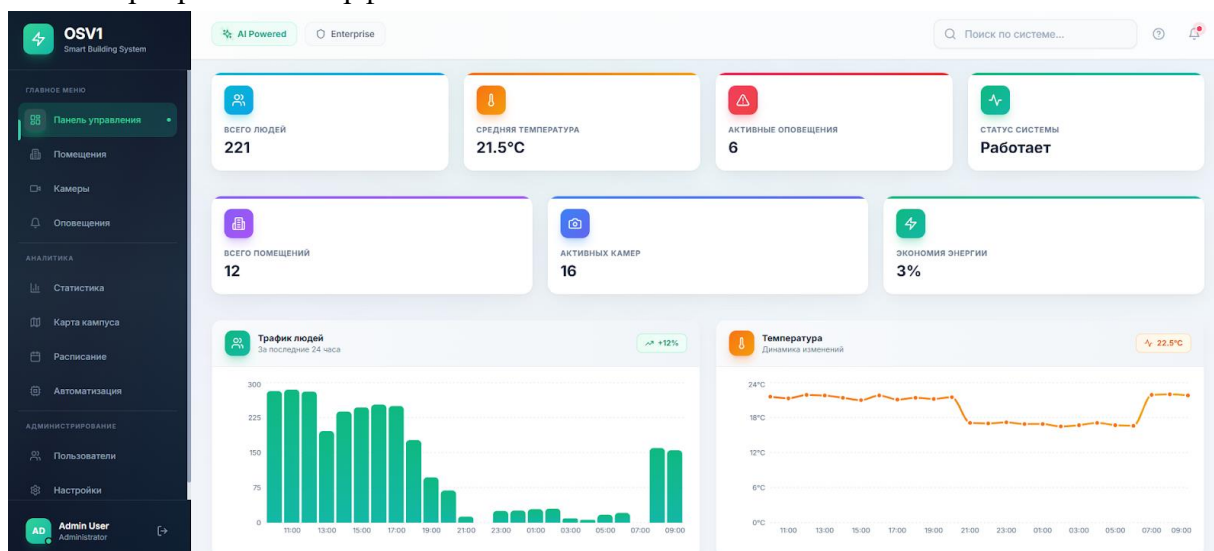


Рисунок 9 - Веб-интерфейс программного прототипа OSV1, реализующего функции СМБЭА

Интерфейс должен отделять измеренный факт от расчётного решения. Например, карточка «занятость» показывает значение и уверенность CV-модуля, а карточка «режим» - результат управляющего правила и его основание. Это предотвращает смешение телеметрии, прогноза и команды.

Функциональная проверка алгоритмов

В работе не заявляются результаты длительного натурного эксперимента и количественный процент экономии энергии. Вместо этого приводится воспроизводимый набор сценариев, предназначенный для проверки непротиворечивости логики управляющего ядра. В каждом сценарии фиксируются входной контекст и ожидаемые режимы.

Таблица 4 - Контрольные сценарии функциональной проверки

№	Контекст	Ожидаемая вентиляция	Ожидаемое освещение	Ожидаемое отопление / событие
1	O=0, S=0, данные valid	ECO	OFF	ECO
2	O=1, C=1200 ppm, L=600 лк, T=21 °C	BOOST	DAYLIGHT_HARVEST / DIM	Сохранение допустимого режима
3	O=1, C=750 ppm, L=350 лк, T=19 °C	NORMAL	HIGH	NORMAL
4	До занятия 20 мин, O=0, T=18 °C	По текущему CO2 и расписанию	OFF до подтверждённого использования	PRE_HEAT
5	W=1 при активном отоплении	По качеству воздуха	По занятости и L	COAST / ECO + предупреждение
6	Телеметрия старше 5 мин	Безопасный проектный режим	Безопасный проектный режим	Тревога; запрет решения по stale-данным
7	Однократное O=0 во время занятия	Без немедленного отключения	Сохранение до подтверждения	Сохранение до подтверждения

Положительное прохождение сценариев подтверждает только корректность логических переходов и журналирования. Оно не доказывает снижение энергопотребления, качество CV-модуля в реальной аудитории или соответствие санитарным требованиям. Эти свойства должны оцениваться отдельными измерениями.

Методика последующей экспериментальной оценки

Для доказательства практического эффекта необходимо заранее зафиксировать базовый и оптимизированный режимы. Базовая линия должна описывать исходное управление по расписанию или вручную, а оптимизированный режим - работу СМВЭА с тем же помещением и сопоставимыми условиями. Периоды сравнения следует нормировать по наружной температуре, продолжительности занятий и фактической занятости.

Минимальный набор метрик включает:

- электрическую и тепловую энергию по отдельным подсистемам, кВт·ч;
- долю и продолжительность времени выше выбранной контрольной концентрации CO2;
- среднее и максимальное отклонение температуры от рабочего диапазона;
- долю времени с достаточной освещённостью при наличии людей;
- точность определения занятости, включая ложные включения и ложные отключения;
- число переключений исполнительных устройств и продолжительность аварийных режимов;
- доступность системы, потери сообщений и долю stale-данных.

Вывод об экономии допускается только после представления исходных данных, длительности наблюдения, методики нормирования, абсолютных значений и неопределённости результата. До выполнения такой процедуры корректной формулировкой является «архитектура создаёт механизм для исключения необоснованной работы нагрузок», а не «доказано снижение энергопотребления».

Перспективный модуль прогнозирования

Нейросетевое прогнозирование не входит в подтверждённую функциональность текущего прототипа. Его целесообразно рассматривать после накопления репрезентативной истории телеметрии и событий. Возможными задачами являются прогноз CO2 и температуры на следующий интервал, оценка вероятности занятости и расчёт времени, необходимого для PRE_HEAT.

Для временных рядов могут быть исследованы LSTM, GRU, градиентный бустинг и более простые регрессионные модели. Выбор метода должен выполняться по результатам хронологического разделения данных на обучающую, валидационную и тестовую части. Для непрерывных прогнозов применимы MAE и RMSE; для занятости - precision, recall, F1 и PR-

AUC. До независимой проверки прогноз должен иметь рекомендательный статус, а безопасные ограничения остаются в детерминированном контуре.

Таким образом, подтверждённым результатом является rule-based платформа, а машинное обучение рассматривается как отдельный этап развития после накопления и валидации данных.

Отличительные особенности, практическая значимость и ограничения

Практический вклад работы состоит в согласованном описании контекста помещения и прозрачной последовательности принятия решений. Отличительными особенностями являются единая временная привязка данных, обязательный признак качества $Q(t)$, три независимых управляющих выхода, приоритетная обработка конфликтов и явный гистерезис. Это инженерно-технический результат, который не требует утверждения о создании принципиально нового класса BMS.

Открытый технологический стек упрощает адаптацию прототипа и интеграцию с существующей инфраструктурой. Вместе с тем СМВЭА не следует рассматривать как готовую сертифицированную систему управления зданием. Ограничениями являются отсутствие длительной полевой выборки, необходимость калибровки уставок, зависимость от качества CV и датчиков, вопросы защиты персональных данных и необходимость безопасного сопряжения с исполнительным оборудованием.

Масштабирование на несколько аудиторий или кампус возможно архитектурно за счёт идентификаторов помещений, независимых контекстов и централизованного хранения, однако такая возможность должна подтверждаться нагрузочным тестированием, политиками доступа и эксплуатационной апробацией. Поэтому в работе она формулируется как направление применения, а не как уже доказанный результат.

Заключение

Разработана концепция IoT- и CV-ориентированной платформы СМВЭА для управления инженерными системами учебных помещений. Формальная модель учитывает температуру, внешние условия, состояние окна и качество данных; управляющий вектор включает вентиляцию, освещение и отопление. Определены базовые численные параметры, гистерезис и приоритеты, описаны режимы PRE_HEAT, ECO, COAST, NORMAL, BOOST и DAYLIGHT_HARVEST.

Текущая реализация представляет собой детерминированный rule-based прототип OSV1. Нейросетевое прогнозирование выделено в перспективный этап и не представляется как выполненный эксперимент. Единая терминология и последовательная нумерация обеспечивают однозначное описание архитектуры и алгоритмов.

Функциональные сценарии позволяют проверить корректность переключения режимов, однако количественный эффект по энергопотреблению и качеству внутренней среды должен подтверждаться отдельным полевым исследованием с зарегистрированной базовой линией. Такой подход обеспечивает научную добросовестность, воспроизводимость алгоритма и ясное разделение между разработанной архитектурой и будущими результатами эксплуатации.

Литература

1. ANSI/ASHRAE Standard 62.1-2025. Ventilation and Acceptable Indoor Air Quality. Atlanta: ASHRAE, 2025. URL: <https://www.ashrae.org/technical-resources/bookstore/standards-62-1-62-2>.
2. ISO 50001:2018. Energy management systems - Requirements with guidance for use. Geneva: International Organization for Standardization, 2018. URL: <https://www.iso.org/standard/69426.html>.
3. Al Assaad D., Sengupta A., Breesch H. Demand-controlled ventilation in educational buildings: Energy efficient but is it resilient? Building and Environment. 2022. Vol. 226. Art. 109778. DOI: 10.1016/j.buildenv.2022.109778.

4. Erickson V. L., Cerpa A. E. Occupancy based demand response HVAC control strategy. Proceedings of BuildSys 2010. 2010. P. 7-12. DOI: 10.1145/1878431.1878434.
5. Rosbach J., Krop E., Vonk M., van Ginkel J., Meliefste C., de Wind S., Gehring U., Brunekreef B. Classroom ventilation and indoor air quality - results from the FRESH intervention study. Indoor Air. 2016. Vol. 26, no. 4. P. 538-545. DOI: 10.1111/ina.12231.
6. Zhao Z.-Q., Zheng P., Xu S.-T., Wu X. Object Detection With Deep Learning: A Review. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems. 2019. Vol. 30, no. 11. P. 3212-3232. DOI: 10.1109/TNNLS.2018.2876865.
7. Atzori L., Iera A., Morabito G. The Internet of Things: A survey. Computer Networks. 2010. Vol. 54, no. 15. P. 2787-2805. DOI: 10.1016/j.comnet.2010.05.010.
8. Gubbi J., Buyya R., Marusic S., Palaniswami M. Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions. Future Generation Computer Systems. 2013. Vol. 29, no. 7. P. 1645-1660. DOI: 10.1016/j.future.2013.01.010.
9. Zhang Y., Bai X., Mills F. P., Pezzey J. C. V. Rethinking the role of occupant behavior in building energy performance: A review. Energy and Buildings. 2018. Vol. 172. P. 279-294. DOI: 10.1016/j.enbuild.2018.05.017.
10. International Energy Agency. Energy Efficiency 2022. Paris: IEA, 2022. URL: <https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-2022>.
11. United Nations Environment Programme. 2022 Global Status Report for Buildings and Construction. Nairobi: UNEP, 2022. URL: <https://www.unep.org/resources/report/global-status-report-buildings-and-construction-2022>.
12. Siemens. Desigo CC Building Management Platform: official product documentation. URL: <https://www.siemens.com/desigocc>.
13. Schneider Electric. EcoStruxure Building Operation: official product documentation. URL: <https://www.se.com/ww/en/work/solutions/for-business/buildings/>.
14. Honeywell. Building Management Systems: official product documentation. URL: <https://buildings.honeywell.com>.
15. Johnson Controls. Metasys Building Automation System: official product documentation. URL: <https://www.johnsoncontrols.com/buildings>.
16. OASIS. MQTT Version 3.1.1. OASIS Standard. 29 October 2014. URL: <https://docs.oasis-open.org/mqtt/mqtt/v3.1.1/mqtt-v3.1.1.html>.