

УДК 004.4:[681.586+628.9]

РАЗРАБОТКА АВТОНОМНОЙ EDGE-СИСТЕМЫ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ОСВЕЩЕНИЕМ НА БАЗЕ ММ-ВОЛНОВОГО РАДАРА В СРЕДЕ HAOS

А. Ю. ВОЛКОВ, Э.Н. ОМОРОВ

*Кыргызско-Российский Славянский университет
(г. Бишкек, Кыргызская Республика)*

E-mail: _IVT@mail.ru

Аннотация. В данной работе представлен архитектурный подход к построению интеллектуальной системы управления домашним освещением на базе граничных вычислений (Edge Computing¹) [1]. В отличие от традиционных решений, полагающихся на PIR-датчики и облачные платформы, предложенная система выполняет всю обработку сенсорных данных локально на сервере с операционной системой Home Assistant OS² (HAOS) [2], запущенной на мини-ПК с архитектурой Intel x64, без отправки данных во внешние сети. Присутствие человека обнаруживается с помощью радар-детектора миллиметрового диапазона (24 ГГц FMCW, модель Hi-Link LD2410/LD2410B), способного фиксировать как макро, так и микроперемещения, что предотвращает ложные выключения света, когда человек неподвижен. Радар подключен к контроллеру через интерфейс USB, а исполнительное устройство (умная лампа Xiaomi Mi) интегрировано в локальную сеть Wi-Fi. Логика управления реализована в виде конечного автомата с фильтрацией граничных условий и таймером задержки выключения для обеспечения устойчивости к краткосрочным замираниям сигнала.

Abstract. This paper presents an architectural approach to building an intelligent home lighting control system based on Edge Computing. Unlike conventional solutions that rely on PIR sensors and cloud platforms, the proposed system performs all sensor data processing locally on a Home Assistant OS (HAOS) server running on an Intel x64 mini PC, without sending data to external networks. Human presence is detected using a 24 GHz FMCW mm wave radar (Hi Link LD2410/LD2410B) capable of capturing both macro movements and micro movements, which prevents false light off events when a person remains still. The radar is connected to the controller via USB, while the actuator (Xiaomi Mi smart lamp) is integrated into the local Wi Fi network. The control logic is implemented as a finite state machine with filtering of boundary conditions and an off delay timer to ensure robustness against short term signal fading.

Введение

В эпоху стремительного развития концепции «Интернета вещей» (IoT³) и систем «умного дома» ключевым вектором автоматизации становится создание адаптивной и энергоэффективной жилой среды [3]. Традиционные сценарии управления освещением [4], основанные на фиксированных таймерах или классических пирозлектрических (PIR⁴) датчиках движения, демонстрируют ряд критических недостатков. В частности, PIR-сенсоры не способны фиксировать присутствие неподвижного или малоподвижного человека, что приводит к ложным выключениям света и снижает общий уровень комфорта пользователя.

Для решения этой проблемы перспективным представляется переход к микроволновым датчикам присутствия [5], работающим на принципах радиолокации непрерывного излучения с частотной модуляцией (FMCW⁵).

В данной работе рассматривается проектирование и развертывание локальной программно-аппаратной экосистемы автоматизации освещения в частном доме. В качестве программного ядра авторами была выбрана отказоустойчивая операционная система HAOS, развернутая на базе мини-ПК с архитектурой Intel x64, что обеспечивает высокую производительность и независимость от облачных сервисов. Информационной основой контура управления стал высокоточный датчик присутствия человека Hi-Link LD24106 (24 ГГц) [6], подключенный напрямую к серверу через интерфейс USB, а исполнительным механизмом — смарт-лампа Xiaomi Mi, интегрированная в локальную сеть по протоколу Wi-Fi.

Постановка задачи

На основе проведенного анализа существующих решений в области домашней автоматизации была поставлена задача разработки и тестирования программно-аппаратной локальной системы автоматизации освещения на базе микроволнового датчика присутствия. Для достижения поставленной цели необходимо разделить задачу на два взаимосвязанных этапа.

¹ Edge Computing (периферийные вычисления) — это архитектура облачной обработки данных.

² Home Assistant OS- стек технологий, оптимизированный под одну задачу.

³ IoT (Internet of Things) - Интернет вещей.

⁴ PIR (Passive Infrared) - Пассивный инфракрасный (датчик).

⁵ FMCW (Frequency Modulated Continuous Wave) - Непрерывное излучение с частотной модуляцией (радар).

⁶ HLK-LD2410 Human Presence Radar Sensor Module

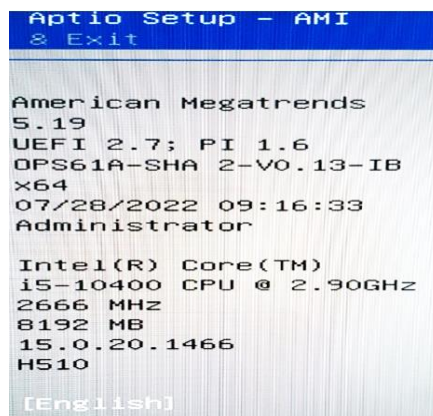


Рис.1. Экран настроек BIOS (UEFI) для сервера с процессором Intel Core i5-10400 примененный в проекте

Аппаратный синтез — физическое сопряжение вычислительного ядра (сервера) – центрального вычислительного узла мини-ПК с архитектурой Intel x64 (см. рисунок 1).

Данное решение обеспечивает достаточную производительность для параллельной обработки потоков данных и высокую отказоустойчивость при ведении локальных баз данных сенсорной подсистемы на базе микроволнового датчика присутствия Hi-Link LD2410, функционирующего по принципу частотно-модулированного непрерывного излучения (FMCW-радар) и интеллектуального источника света Xiaomi Mi в единый локальный комплекс.

Программная интеграция — развертывание операционной среды (см. рисунок 2), конфигурирование низкоуровневых интерфейсов обмена данными и непосредственная алгоритмизация логики управления.

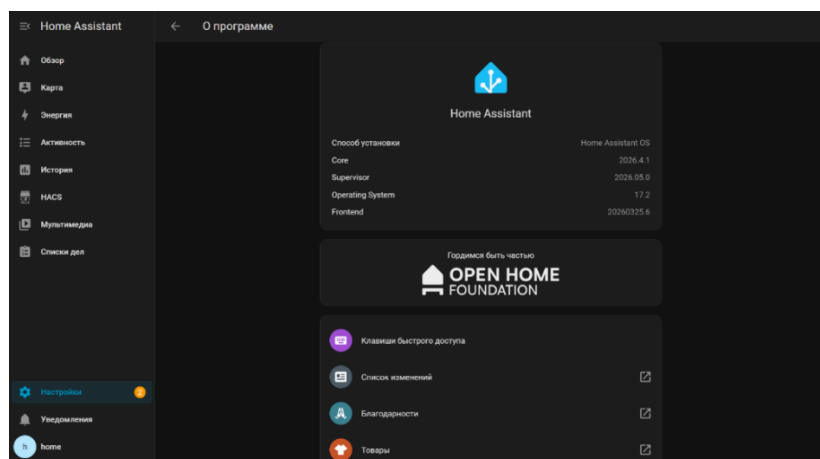


Рис.2. Графический экран системы Home Assistant, которая используется для управления проектом

Функционально-структурная модель системы

В разработанном комплексе объектом управления является световая среда (уровень освещенности) целевой зоны помещения, изменяемая в зависимости от присутствия и характера поведения антропогенного объекта (человека).

Основная задача системы — поддержание требуемого состояния освещенности $Y(t)$ в зависимости от входного возмущающего воздействия $X(t)$ (появление или уход человека) при минимизации энергопотребления.

Переменные и параметры модели

Для формализации процессов управления выделим следующие категории.

Входное управляющее воздействие $U(t)$: дискретный сигнал, подаваемый с контроллера (мини-ПК) на исполнительное устройство (смарт-лампу Xiaomi).

$$U(t) \in \{0; 1\},$$

где 0 — команда «выключить», 1 — команда «включить».

Выходная регулируемая величина $Y(t)$: Состояние освещенности зоны. В упрощенном (бинарном) виде:

$$Y(t) \in \{0; 1\},$$

где 0 — освещение отсутствует, 1 — зона освещена.

Возмущающее воздействие $X(t)$: Наличие человека в зоне действия датчика. Благодаря специфике FMCW-радара LD2410, это воздействие описывается вектором:

$$X(t) = \{D_{\text{mov}}, D_{\text{stat}}, L\},$$

где $D_{\text{mov}} \in \{0; 1\}$ — фиксация макроперемещений (ходьба, бег), $D_{\text{stat}} \in \{0; 1\}$ — фиксация микроперемещений (дыхание, мелкая моторика сидящего человека), L — расстояние до объекта в метрах ($0.2 \leq L \leq 8$).

Динамические характеристики

Объект управления обладает выраженным транспортным запаздыванием (задержкой), которое складывается из аппаратных и сетевых издержек. В общем виде реакция системы на изменение состояния объекта описывается звеном чистого запаздывания.

Полное время задержки включения системы τ_{Σ} выражается формулой:

$$\tau_{\Sigma} = \tau_{\text{sensor}} + \tau_{\text{usb}} + \tau_{\text{logic}} + \tau_{\text{wi-fi}} + \tau_{\text{lamp}},$$

где τ_{sensor} — время анализа подстилающей поверхности радаром LD2410 (около 10-50мс); τ_{usb} — время передачи кадра данных по шине UART-USB в HAOS (≤ 1 мс); τ_{logic} — время обработки триггера ядром Home Assistant (≤ 5 мс); $\tau_{\text{wi-fi}}$ — время доставки TCP/IP пакета по локальной Wi-Fi сети ($\leq 2-20$ мс); τ_{lamp} — время срабатывания реле/драйвера лампы Xiaomi Mi (около 20-50мс).

Суммарное запаздывание τ_{Σ} экспериментально не превышает 100-150мс, что удовлетворяет критериям физиологического комфорта человека (включение света воспринимается как «мгновенное»).

Функциональная структура модели

Так как управление носит релейный (дискретный) характер, модель объекта удобно представить в виде конечного автомата с тремя основными состояниями (см. рисунок 3).

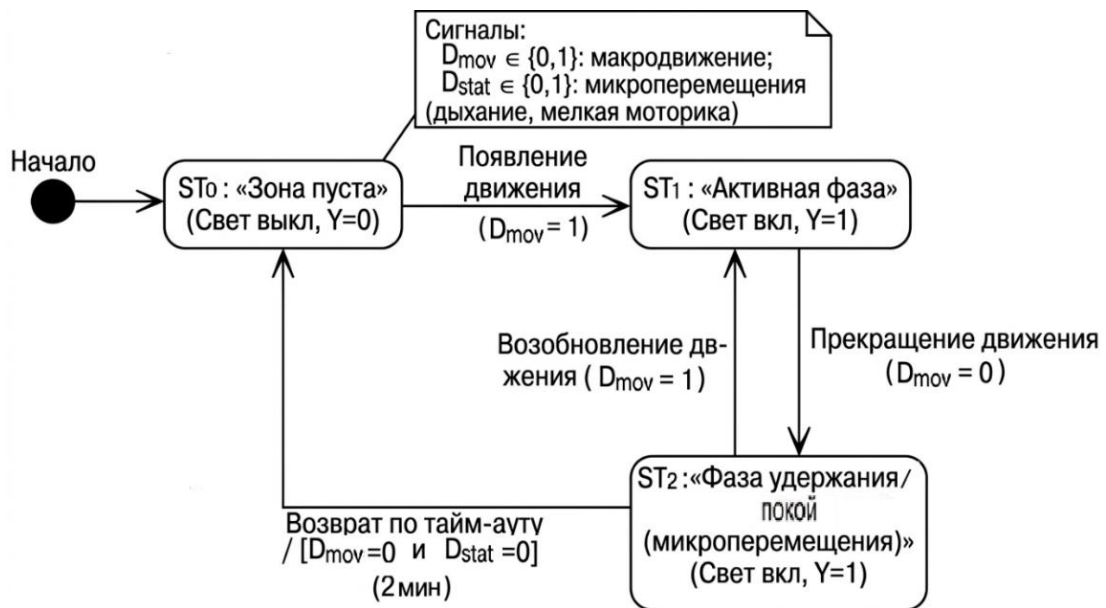


Рис.3. Функциональная схема автоматизации освещения по детекции движения

- ST_0 (Ожидание): Человек в помещении отсутствует ($X = \{0, 0, 0\}$), лампа выключена ($Y = 0$).
- ST_1 (Вход в зону / Движение): Датчик фиксирует макроперемещения ($D_{\text{mov}} = 1$), система мгновенно переводит лампу в режим ($Y = 1$).
- ST_2 (Присутствие без движения): Человек перестал ходить и сел (например, за рабочий стол). Переменная D_{mov} переходит в 0, но радар за счет FMCW-технологии продолжает фиксировать $D_{\text{stat}} = 1$. Система удерживает ($Y = 1$). Переход обратно в состояние ST_0 происходит только тогда, когда оба показателя (D_{mov} и D_{stat}) равны 0 в течение заданного программного тайм-аута (например, 30 секунд), что страхует от случайных пропаданий сигнала.

Для понимания принципов работы разработанного комплекса автоматизации необходимо рассмотреть функционально-структурную диаграмму состояний системы управления освещением. Система построена по классической трехранговой архитектуре (сенсоры, контроллер, исполнительные механизмы), однако обладает ключевой особенностью — полной локальностью, то есть контур управления замкнут внутри частного дома и не зависит от внешних облачных платформ.

Программная и аппаратная реализация локальной системы автоматизации освещения

В рамках предыдущего раздела была разработана общая функциональная схема автоматизации, вместе с тем эта диаграмма состояний не акцентирует структурные связи между сущностями модели (состояния, входные сигналы, выходы) и их семантические роли в функциональной схеме управления. Для полноты и однозначности представления разработанного алгоритма целесообразно использовать две взаимодополняющие диаграммы, поэтому вводится вторая диаграмма (см. рисунок 4) (структурно-функциональная/обобщающая), которая систематизирует элементы модели по смысловым группам (состояния, переходы и условия, сигналы и выходы) и явно показывает соответствие входных воздействий и формируемого управляющего сигнала (Y).

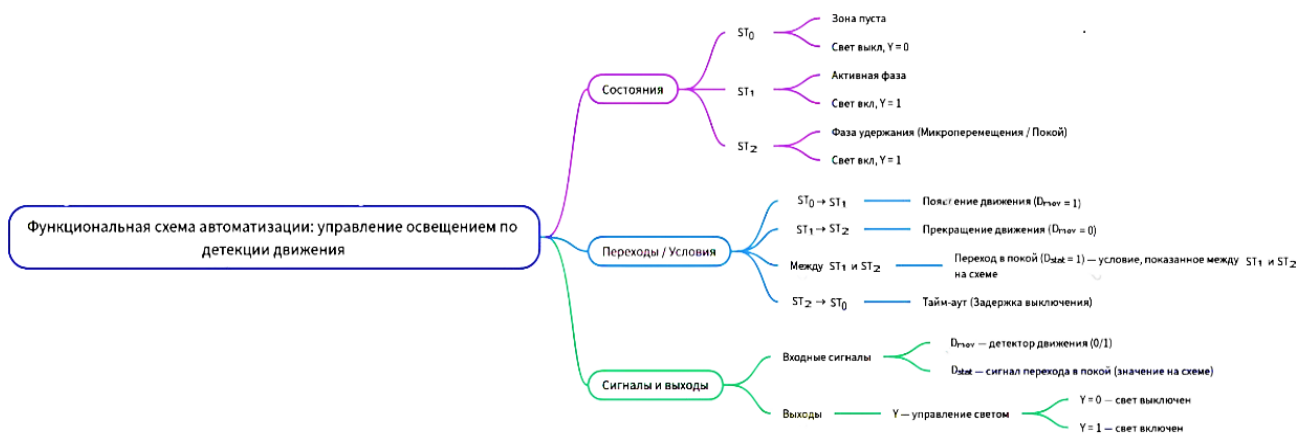


Рис.4. Логика работы схемы автоматического управления освещением на основе датчика присутствия

Данная схема позволяет перейти от абстрактного математического описания логики управления к физическому и программному воплощению системы.

Перенос разработанной ранее функциональной схемы в программную среду HAOS требует создания жесткого детерминированного алгоритма автоматизации. Специфика работы FMCW-радар накладывает особые требования к программной логике: алгоритм должен обеспечивать мгновенное срабатывание при появлении объекта, но при этом быть инвариантным к краткосрочным затуханиям сигнала или пограничным состояниям датчика на границе зоны чувствительности.

Для детального анализа, верификации и последующего программирования данного процесса в среде HAOS (посредством встроенного движка автоматизаций YAML или программных скриптов) необходимо осуществить графическое моделирование логических переходов.

Разработка блок-схемы и программная реализация скетча автоматизации в среде HAOS

Для обеспечения инвариантности системы к кратковременным стохастическим затуханиям сигнала и исключения ложноположительных отключений исполнительного устройства была спроектирована структура переходов состояний. Логика алгоритма разделена на три вычислительных контура: контур инициализации (триггер), контур валидации присутствия (условие) и контур фильтрации пограничных состояний (задержка выключения).

Ниже приведена блок-схема (см. рисунок 5), описывающая граф состояний разработанного алгоритма автоматизации.

Описание работы алгоритма:

1.Этап триггера (Перехват событий): Система находится в режиме постоянного ожидания изменения векторов телеметрии от датчика Hi-Link LD2410 по шине USB. Изменение любого из бинарных сенсоров инициирует исполнение автоматизации.

2.Этап ветвления (Валидация): Если хотя бы один из датчиков переходит в состояние on (обнаружено макро- или микроперемещение), алгоритм мгновенно посылает команду на включение интеллектуального источника света Xiaomi Mi, предварительно проверяя его текущий статус для минимизации избыточного сетевого трафика в локальной сети Wi-Fi. При этом текущие активные таймеры выключения принудительно сбрасываются.

3.Этап фильтрации (Время выбега): Если оба сенсора переходят в состояние off (целевой объект покинул зону чувствительности или вошел в «мертвую зону» затухания сигнала FMCW-радар), система не отключает освещение мгновенно. Запускается программный таймер удержания (аппаратно-программный фильтр delay). Повторная детекция активности в этот период сбрасывает таймер. Если по истечении заданного интервала (например, 60 секунд) сигналов присутствия не обнаружено, генерируется локальная команда на деактивацию реле лампы.

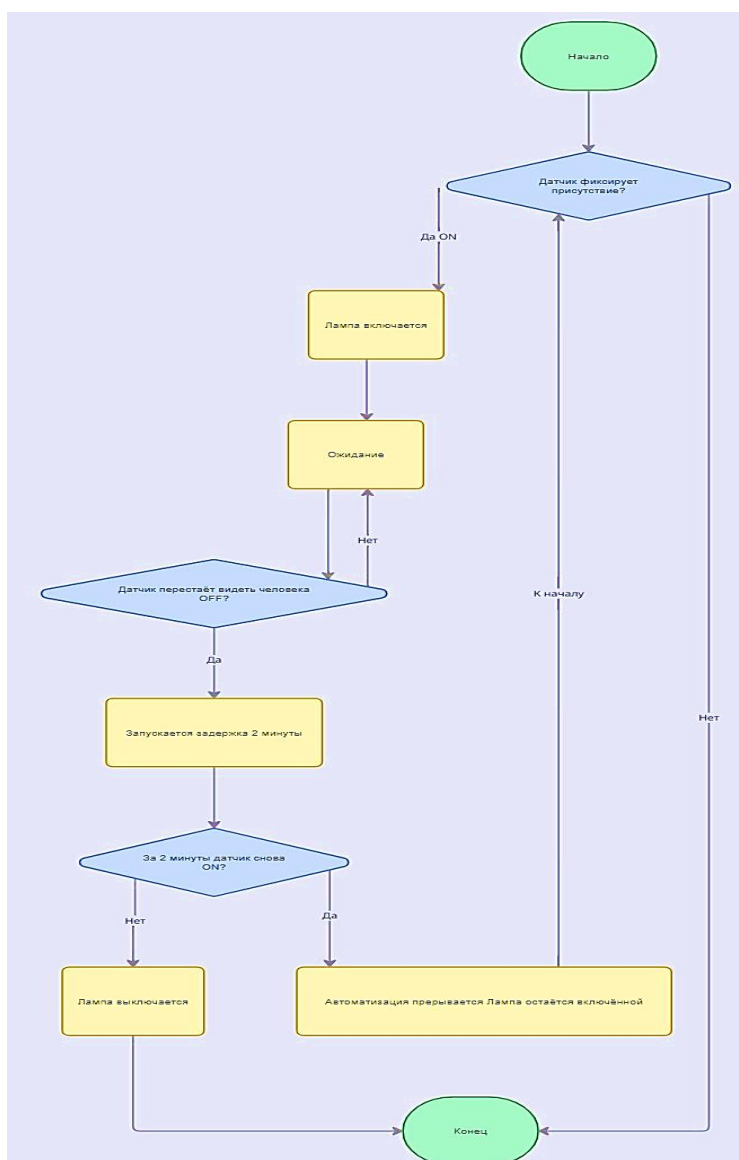


Рис.5. Блок-схема, описывающая алгоритм автоматизации управления освещением на основе датчика присутствия

Программная реализация скетча автоматизации (YAML)

На основе разработанной блок-схемы был синтезирован программный код автоматизации для HAOS. Локализация управления достигается за счет прямого обращения к внутренним сущностям (entities⁷)[7], платформы без использования внешних облачных шлюзов (Cloud API⁸)[8].

На основе особенности блок-схемы и сценария алгоритма был составлен скетч автоматизации (см. рисунок 6).
Функционал: лампа автоматически включается при обнаружении присутствия (ld2410b_presence переходит в состояние "on") и выключается, когда движение прекращается.

Параметры: при включении лампы задается яркость 200 и цветовая температура 350.

Режим: автоматизация работает в режиме single, что означает, что новый триггер не запустит сценарий заново, пока выполняется текущее действие.

Триггеры: два триггера отслеживают переход датчика binary_sensor.ld2410b_presence в состояния on и off. Это можно объединить в один триггер, не указывая параметр to, тогда он будет срабатывать на любые изменения состояния.

⁷ Entity (сущность) — Представляющая конкретную функцию устройства сущность.

⁸ Cloud API (Application Programming Interface в облаке) - Интерфейс программирования, который работает через интернет (в облаке производителя)

```
alias: LD2410B управляет Xiaomi Mi Smart лампой с задержкой
description: Включение лампы при обнаружении присутствия и выключение чер
trigger:
  - platform: state
    entity_id: binary_sensor.ld2410b_presence
    to: "on"
  - platform: state
    entity_id: binary_sensor.ld2410b_presence
    to: "off"
condition: []
action:
  - choose:
    - conditions:
      - condition: state
        entity_id: binary_sensor.ld2410b_presence
        state: "on"
      sequence:
        - service: light.turn_on
          target:
            entity_id: light.xiaomi_mi_smart_lamp
          data:
            brightness: 200
            color_temp: 350
    - conditions:
      - condition: state
        entity_id: binary_sensor.ld2410b_presence
        state: "off"
      sequence:
        - delay: "00:02:00" # задержка 2 минуты
        - service: light.turn_off
          target:
            entity_id: light.xiaomi_mi_smart_lamp
mode: single
```

Рис.6. YAML-код автоматизации Home Assistant для включения и выключения лампы по датчику присутствия

Аппаратное обеспечение

Аппаратное обеспечение разрабатываемой системы ориентировано на реализацию алгоритма управления освещением по данным детекции движения и микроперемещений. Комплекс (см. рисунок 7) включает вычислительный модуль (Мини-ПК/OPS модуль), средства регистрации входных воздействий (датчика присутствия Hi-Link LD2410 (24 ГГц), подключенный напрямую к серверу через интерфейс USB) и исполнительную часть - смарт-лампа Xiaomi Mi, обеспечивающую коммутацию нагрузки.

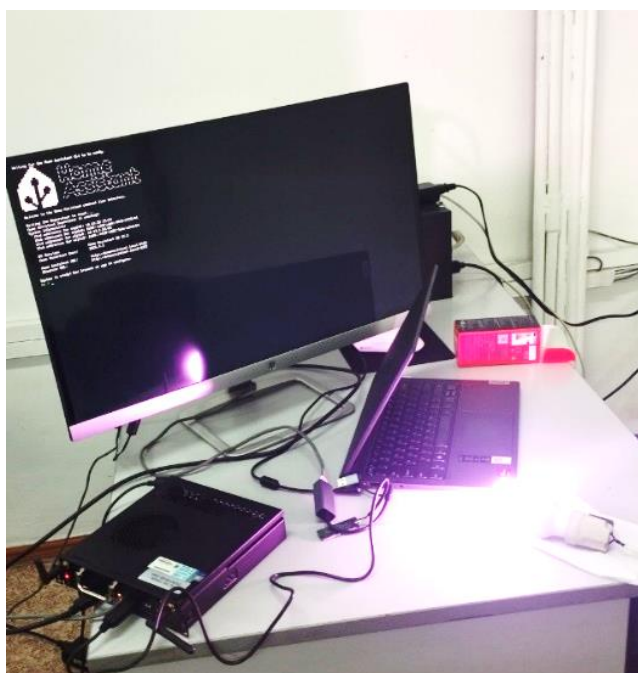


Рис.7. Настройка системы автоматизации управления освещением для Home Assistant OS

Перспектива взаимодействия с локальными большими языковыми моделями (LLM)⁹

Разработанная автономная Edge-система адаптивного управления освещением представляет собой не только самостоятельное решение, но и готовую аппаратно-программную платформу для интеграции с локальными большими языковыми моделями (LLM). Поскольку вычислительное ядро системы функционирует на базе мини-ПК с архитектурой Intel x64 под управлением HAOS в изолированной локальной сети, данная инфраструктура органично расширяется до уровня интеллектуального агента без привлечения внешних облачных сервисов.

Практическая реализация подобной интеграции может быть применена к работе [9], где на сервер лаборатории с аналогичной архитектурой была локально развернута языковая модель DeepSeek-R1 посредством платформы Ollama [10]. Применительно к системе управления освещением локальная LLM может выполнять функцию адаптивного контроллера второго уровня: анализировать накопленную телеметрию датчика Hi-Link LD2410, выявлять поведенческие паттерны пользователя и автоматически корректировать параметры алгоритма — в частности, величину тайм-аута выключения, пороговые значения детекции и расписание активности. Взаимодействие между HAOS и локальной LLM осуществляется через внутренний API без передачи данных во внешние сети, что полностью сохраняет принцип локальной автономии системы.

Таким образом, предложенная Edge-архитектура является фундаментом для построения полностью автономного интеллектуального пространства, в котором физический уровень управления (датчики и исполнительные механизмы) дополняется аналитическим слоем на базе локальной LLM, обеспечивая адаптивность системы без ущерба для безопасности и конфиденциальности данных пользователя.

Заключение

Построена физическая классическая трехранговая модель с учетом сформулированных требований. Разработанная автономная Edge-система адаптивного управления освещением на базе FMCW-радара и среды HAOS демонстрирует перспективный подход к созданию энергоэффективной и комфортной жилой среды. Локальная архитектура, исключая зависимость от облачных сервисов, обеспечивает высокую отказоустойчивость и безопасность данных, а использование мм-волнового датчика позволяет фиксировать даже микродвижения человека, устраняя ключевые недостатки традиционных PIR-сенсоров.

Список использованных источников

1. Смелянец А. В., Глушенко Д. В. Архитектура и принципы построения периферийных вычислений (Edge Computing) в современных распределенных системах // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2022. Т. 19. № 4. С. 15–22.
2. Home Assistant Operating System (HAOS) // GitHub Repository. 2026. URL: <https://github.com/home-assistant/operating-system> (дата обращения: 22.05.2026).
3. Кучерявый А. Е. Интернет вещей // Электросвязь. 2013. № 1. С. 21–24.
4. Фрайден Д. Современные датчики. Справочник. М.: Техносфера, 2005. 588 с. (Глава 15. Датчики присутствия человека).
5. FMCW (Частотно-модулированное непрерывное излучение / Радары) // Электронный ресурс. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Непрерывное_излучение_с_частотной_модуляцией (дата обращения: 25.05.2026).
6. HLK-LD2410. 24GHz Human Presence Radar Sensor Module. User Manual. Version 1.03 : datasheet / Shenzhen Hi-Link Electronic Co., Ltd. – Shenzhen, 2022. – 23 p. – URL: [https://seengreat.com/upload/file/86/HLK+LD2410+Life+Presence+Sensor+Module+Manual+V1.03\(220629\).pdf](https://seengreat.com/upload/file/86/HLK+LD2410+Life+Presence+Sensor+Module+Manual+V1.03(220629).pdf)
7. Моррис К. Исполняемая инфраструктура. Управление серверами в облаке. 2-е изд. СПб.:БХВ-Петербург, 2021. 576 с.
8. Newman S. Building Microservices: Designing Fine-Grained Systems. 2nd ed. O'Reilly Media, 2021. 624 p. (рус. изд.: Ньюмен С. Создание микросервисов. 2-е изд. СПб.: Питер, 2023. 624 с.).
9. DeepSeek-R1 : большая языковая модель / DeepSeek-AI. – Ханчжоу, 2025. – URL: <https://ollama.com/library/deepseek-r1> (дата обращения: 28.05.2026). – Режим доступа: платформа Ollama. – Текст : электронный.
10. Волков А.Ю. Пример создания закрытой системы для работы большими языковыми моделями / А.Ю. Волков // Информатика, управляющие системы, математическое компьютерное моделирование (ИУСМКМ-2025): сб. материалов XVI Междунар. науч.-техн. конф. в рамках XI Междунар. науч. форума ДНР, г. Донецк, 28 мая 2025 г. – Донецк: ДонНТУ, 2025. – С. 89–92.

⁹ LLM языковая модель DeepSeek-R1 посредством платформы Ollama