

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

Институт машиностроения

(наименование института полностью)

Кафедра «Промышленная электроника»

(наименование)

11.03.04 Электроника и нанoeлектроника

(код и наименование направления подготовки)

Электроника и робототехника

(направленность (профиль)/специализация)

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)

на тему: «Построение распределенной системы сбора технологических
данных на основе ZigBee»

Обучающийся

И. В. Шабалин

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

к.т.н., доцент, А.А. Шевцов

(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

Тольятти 2025

Аннотация

Ключевые слова: распределенная система, сбор данных, IoT (интернет вещей), IEEE 802.15.4, Home assistant, распределенные сети.

Объем: 47 страниц, 18 рисунков, 0 таблиц, 25 источников, 1 приложение и чертежи на 6 листах формата A1.

Название бакалаврской работы – Построение распределенной системы сбора технологических данных на основе ZigBee.

В данной бакалаврской работе рассматривается разработка распределенной системы сбора технологических данных на основе ZigBee. Исследование направлено на создание решения для мониторинга температуры стояков отопления в многоквартирном доме и визуализацию данных в реальном времени для удобства настройки вентиля.

Основные аспекты исследования

Проблема регулировки отопления: настройка температуры стояков затруднена из-за необходимости контроля нескольких точек одновременно, особенно если они расположены в разных частях здания и разделены стенами. Выбор технологии ZigBee: обусловлен низким энергопотреблением, возможностью создания Mesh-сети и стабильной передачей данных через физические преграды. Архитектура системы: включает датчики температуры, ZigBee-координатор, маршрутизаторы и конечные устройства. Алгоритмы работы: сбор данных, передача через беспроводную сеть, визуализация изменений в реальном времени.

Тестирование системы: проверка надежности связи, точности измерений и удобства взаимодействия оператора с графическим интерфейсом.

Содержание

Введение	4
1 Состояние вопроса.....	5
1.1 Актуальность проблемы мониторинга отопительных систем.....	5
1.2 Особенности ZigBee для распределенных систем	7
1.3 Вывод по состоянию вопроса.....	11
2 Проектно-расчетный раздел	12
2.1 Разработка системы.....	13
2.2 Выбор оборудования и расчет параметров системы	14
2.3 Расчет параметров ZigBee-сети	19
2.4 Алгоритм работы системы	21
2.5 Вывод по проектно-расчетному разделу	23
3 Конструкторско-технологический раздел.....	24
3.1 Разработка архитектуры системы сбора данных	24
3.2 Подключение компонентов схемы	25
3.3 Программная реализация и алгоритмы работы системы	29
3.4 Технологическая реализация и интеграция готового прототипа ...	33
3.5 Вывод о конструкторско-технологическом разделе.....	39
Заключение	40
Список использованных источников.....	43
Приложение А Фрагмент исходного кода программы для микроконтроллера ESP 32.....	46

Введение

Современное регулирование отопления в многоквартирных домах требует достоверного и оперативного контроля температуры стояков. Традиционный подход — ручное снятие показаний — неэффективен: он трудозатратен, требует физического доступа и не отражает динамику изменений. Прокладка проводных датчиков осложняется архитектурой зданий. Следовательно, необходима беспроводная автоматизированная система мониторинга, способная надёжно работать в условиях ограниченной доступности.

В рамках настоящей работы предлагается разработка распределённой системы мониторинга температуры стояков отопления, реализованной на базе технологии ZigBee. В качестве чувствительных элементов используются контактные цифровые датчики температуры DS18B20 в герметичной гильзе, надёжно фиксируемые к поверхности трубы с применением теплопроводной пасты. Такая конфигурация обеспечивает точность измерений, стойкость к внешним условиям и длительное энергосберегающее функционирование.

Целью бакалаврской работы является проектирование, сборка и тестирование прототипа системы, включающего беспроводные сенсорные узлы, ZigBee-сеть с Mesh-топологией, координатор и сервер визуализации данных на базе Home Assistant.

Задачи работы: обосновать выбор технологии ZigBee для мониторинга; разработать архитектуру системы и структурную схему; подобрать подходящие датчики и модули; описать алгоритм работы и построить блок-схему; реализовать электрическую принципиальную схему; провести сборку, тестирование и настройку визуализации.

1. Состояние вопроса

1.1 Актуальность проблемы мониторинга отопительных систем

Обеспечение комфортной температуры в многоквартирных домах представляет собой задачу, выходящую за рамки простого технического регулирования. Это важный фактор, напрямую влияющий на качество жизни жильцов, эксплуатационные расходы зданий и эффективность использования энергетических ресурсов. Несбалансированное распределение тепла может приводить как к избыточному потреблению энергии — при перегреве отдельных помещений, так и к снижению комфорта — при недостаточном обогреве других участков здания. Подобные отклонения возникают, как правило, из-за отсутствия своевременного и точного контроля температурного режима в местах, где традиционный ручной подход к управлению неэффективен.

Особенно остро проблема проявляется в системах с вертикальной разводкой стояков, где каждый подъезд или секция здания имеет собственную гидравлическую характеристику. Даже небольшие перепады давления или неравномерность теплоносителя способны вызвать значительные различия температур между этажами и квартирами. Принудительная балансировка вентилей без учёта фактической температуры может только усугубить ситуацию. Для грамотной настройки системы требуется информация о температуре в каждой ключевой точке, причём в реальном времени, а не по итогам эпизодического обхода с термометром.

Проводные системы мониторинга, несмотря на техническую надёжность, сталкиваются с рядом ограничений: сложность прокладки кабельных трасс в уже эксплуатируемых зданиях, нарушение отделки помещений, необходимость сверления стен и перегородок, что делает их

малопригодными для масштабного внедрения. Кроме того, такие системы, как правило, не обладают гибкостью в изменении конфигурации и требуют значительных затрат на обслуживание и расширение.

В этих условиях наиболее логичным становится переход к беспроводному решению, способному обеспечить сбор температурных данных без вмешательства в существующую архитектуру здания. Такая система должна работать автономно, обладать низким энергопотреблением и быть устойчивой к архитектурным преградам — как горизонтальным, так и вертикальным. Технология ZigBee отвечает этим требованиям, позволяя организовать распределённую сеть, где каждый датчик взаимодействует с другими узлами и автоматически передаёт информацию к центральному координатору, минуя препятствия с помощью ретрансляции через соседние устройства.

Внедрение подобной системы даёт возможность: — осуществлять непрерывный контроль температуры во всех стояках и помещениях; — мгновенно реагировать на отклонения от заданного диапазона; — проводить регулировку вентилей на основе актуальных данных, а не наугад; — снижать потери тепла и расход энергии, обеспечивая при этом комфорт жильцов; — создавать основу для дальнейшей автоматизации, в том числе управления сервоприводами или клапанами.

Таким образом, необходимость в создании беспроводной системы мониторинга становится очевидной не только с точки зрения инженерной рациональности, но и с позиции устойчивого, энергоэффективного и комфортного жилищного управления.

1.2 Особенности ZigBee для распределенных систем

Дополнительным преимуществом ZigBee является высокая устойчивость к внешним помехам, благодаря использованию механизмов коррекции ошибок и подтверждения доставки сообщений. Протокол работает на свободной частоте 2,4 ГГц, но может использовать до 16 различных каналов, что позволяет минимизировать перекрёстные помехи с другими беспроводными сетями (например, Wi-Fi или Bluetooth) и выбрать наиболее свободный участок спектра при построении сети.

Кроме того, ZigBee поддерживает три основных типа устройств: координаторы, маршрутизаторы и конечные устройства. Это даёт разработчику гибкость в построении топологии сети с учётом особенностей объекта. Например, конечные устройства (сенсоры) могут большую часть времени находиться в спящем режиме и активироваться только для передачи данных, что обеспечивает их работу от батареи в течение нескольких лет.

Mesh-топология позволяет достраивать сеть без переконфигурации — новые узлы автоматически обнаруживаются и включаются в маршрут передачи, а при потере связи ZigBee-сеть перестраивается самостоятельно. Это особенно важно в условиях сложной архитектуры зданий, где стабильное соединение должно быть обеспечено даже при временной недоступности части маршрутов.

Таким образом, ZigBee сочетает в себе надёжность, энергоэффективность, автоматическое масштабирование и совместимость с различными платформами, что делает его одним из лучших решений для построения распределённых систем мониторинга технологических параметров в жилых и промышленных условиях.

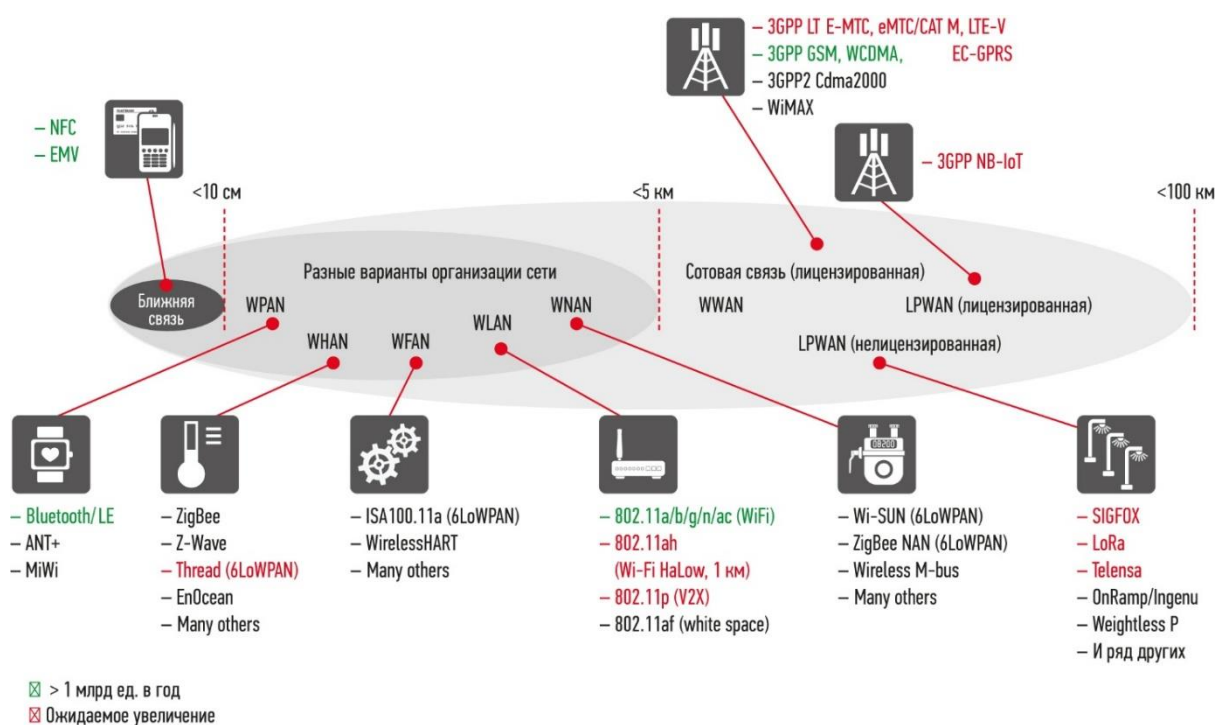


Рисунок 1 – Технологии IoT, сгруппированные по рабочему диапазону покрытия, включая ZigBee

Контроль температуры трубопроводов является неотъемлемой частью систем мониторинга и регулирования тепловых процессов в жилых, коммерческих и промышленных зданиях. От точности и надёжности измерений зависит эффективность распределения тепловой энергии, своевременность регулировки вентилей и общее энергопотребление всей системы отопления.

В условиях ограниченного доступа к трубопроводам, а также в многоуровневых зданиях с большим количеством стояков, использование проводных измерительных систем затруднено. В таких ситуациях применяются контактные датчики температуры, которые устанавливаются непосредственно на поверхность труб и обеспечивают постоянный тепловой контакт.

Наиболее распространёнными решениями в данной области являются:

- DS18B20 в герметичной металлической гильзе — представляет собой цифровой термометр, идеально подходящий для задач удалённого мониторинга. Его преимуществами являются простота интеграции, интерфейс 1-Wire (позволяющий подключать несколько датчиков по одной линии), низкое энергопотребление и хорошая точность. За счёт компактных размеров и герметичности может устанавливаться в местах с повышенной влажностью и перепадом температур.

- PT100/1000 (RTD-датчики) — платиновые термосопротивления, обладающие высокой точностью и линейной характеристикой. Они широко используются в промышленности, но требуют подключения через прецизионные измерительные преобразователи и подходят в первую очередь для точных систем контроля с выделенной аналоговой обработкой.



Рисунок 2 – Промышленный термодатчик PT100/1000

– Термопары типа К (и других типов) — применяются в условиях высоких температур и требуют использования усилителей или специализированных преобразователей с компенсацией «холодного спая». Несмотря на широкую область применения, термопары менее предпочтительны для задач отопления в жилых зданиях из-за сложности обработки сигнала и необходимости периодической калибровки.



Рисунок 3 – Термопара типа К (K-type)

В рамках данной работы целесообразно использовать DS18B20 в металлогильзе, так как он сочетает в себе низкую стоимость, надёжность, устойчивость к внешним воздействиям и простоту подключения. Монтаж датчика осуществляется с использованием термопроводной пасты КПТД-3, которая обеспечивает минимальное тепловое сопротивление между датчиком и трубой. Для фиксации применяется металлический хомут с винтовым зажимом или пластиковое крепление с термоусадкой — в зависимости от условий монтажа.

Дополнительно рекомендуется изолировать датчик от внешней среды с помощью вспененного изоляционного материала (например,

пенополиэтилена или термофлекс-оболочки), чтобы снизить влияние температуры окружающего воздуха на измерения. Такой метод позволяет добиться более стабильных и воспроизводимых результатов, особенно при длительной эксплуатации в нишах, шахтах и на чердаках.

Выбор DS18B20 обоснован не только техническими характеристиками, но и наличием широкой программной поддержки, включая библиотеки для Arduino, ESP-IDF и других платформ. Это облегчает реализацию протокола 1-Wire и упрощает последующую обработку данных.

1.3 Вывод по состоянию вопроса

Мониторинг температурных стояков в жилых зданиях представляет собой важную задачу, напрямую связанную с эффективностью отопления и уровнем комфорта жильцов. Традиционные методы контроля не позволяют реагировать на отклонения температуры оперативно и равномерно. Создание автоматизированной системы с беспроводными сенсорами обеспечивает более точный и своевременный сбор данных, что позволяет оптимизировать работу системы отопления и сократить энергозатраты.

Технология ZigBee представляет собой надёжное решение для создания распределённой сети датчиков: поддержка Mesh-топологии обеспечивает устойчивую связь даже в условиях сложной планировки, а низкое энергопотребление позволяет использовать автономные узлы. Выбор контактных датчиков, предназначенных для установки на трубопровод (например, DS18B20 в гильзе), обеспечивает необходимую точность измерений и надёжность в реальных условиях эксплуатации.

2 Проектно-расчетный раздел

2.1 Разработка системы

Разрабатываемая система предназначена для дистанционного мониторинга температуры стояков отопления в многоквартирном доме. Основные технические требования к системе включают:

- сбор температурных данных в реальном времени – автономную работу конечных устройств с минимальным энергопотреблением – беспроводную передачу данных с высокой устойчивостью к помехам – визуализацию температуры для удобства регулировки вентилей.

В качестве технологии беспроводной передачи данных выбран стандарт ZigBee, работающий по протоколу IEEE 802.15.4. Для обеспечения надёжной связи между узлами используется Mesh-топология, допускающая ретрансляцию сигналов через промежуточные маршрутизаторы, что особенно актуально при наличии физических преград (стены, перекрытия, шахты).

Основные компоненты системы:

- датчики температуры DS18B20 в металлогильзе, установленные на поверхности труб с применением теплопроводной пасты – ZigBee-модули с поддержкой Mesh-сети (EFR32MG21A) – координатор сети ZigBee (Sonoff Zigbee Bridge) – микроконтроллер ESP32, управляющий датчиком и модулем связи – локальный сервер визуализации на базе Home Assistant, работающий через MQTT-шлюз. Функциональная архитектура взаимодействия компонентов представлена на рисунке 4.

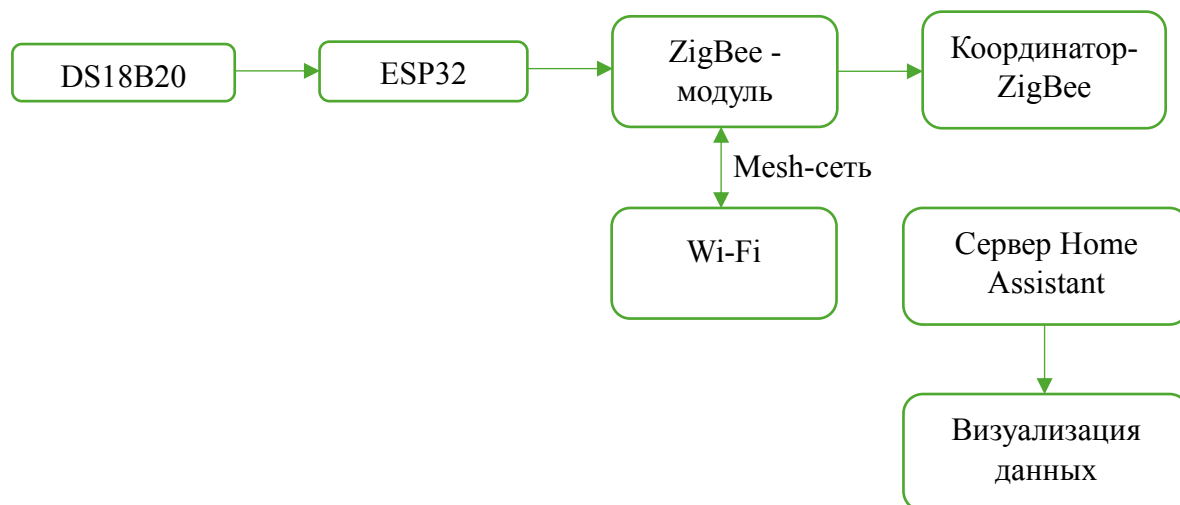


Рисунок 4 – Структурная схема системы мониторинга

Сбор данных осуществляется следующим образом. Температурные значения фиксируются цифровым датчиком, подключённым к ESP32 по протоколу 1-Wire. Контроллер формирует сообщение, содержащее текущие показания и идентификатор датчика, и передаёт его в ZigBee-модуль. При невозможности прямой связи данные ретранслируются через другие узлы по Mesh-сети и доставляются на координатор. Координатор передаёт информацию на сервер через Wi-Fi, где она визуализируется в интерфейсе Home Assistant.

В структуре Home Assistant применяется привязка показаний к соответствующим переменным и токенам, получающим данные по протоколу MQTT. Каждое устройство идентифицируется по уникальному адресу, что позволяет связать параметры с конкретной точкой измерения на схеме отопления.

Такой подход обеспечивает масштабируемость, устойчивость и оперативность системы сбора технологических параметров в жилом здании.

2.2 Выбор оборудования и расчет параметров системы

Для измерения температуры трубопроводов используется цифровой датчик DS18B20 (показан на рисунке 5) в герметичной металлической гильзе. Он закрепляется непосредственно на внешней поверхности трубы с применением теплопроводной пасты и прижимного хомута. Такое решение позволяет минимизировать тепловое сопротивление на контакте и обеспечивать более точную передачу температуры теплоносителя к измерительному элементу. Дополнительно при необходимости могут использоваться термоусадочные втулки или изоляционный кожух для защиты от внешних колебаний температуры воздуха.

DS18B20 представляет собой цифровой термосенсор с интерфейсом 1-Wire, работающий по запросу ведущего устройства. Основным преимуществом является возможность использования нескольких датчиков на одной линии связи — благодаря наличию уникального 64-битного адреса каждый датчик может быть индивидуально опрошен микроконтроллером. Такой подход позволяет объединить несколько точек измерения с минимальным количеством проводов.

Преимущества DS18B20:

- диапазон измеряемых температур от -55 до $+125$ °C – цифровой интерфейс 1-Wire с низкой чувствительностью к помехам – программно задаваемое разрешение от 9 до 12 бит – стабильная точность $\pm 0,5$ °C в диапазоне $-10...+85$ °C – возможность работы в режиме паразитного питания – поддержка протокола CRC для контроля целостности передаваемых данных – небольшой габарит и возможность герметичного исполнения.



Рисунок 5 – Датчик температуры DS18B20 в металлогильзе

Передача данных осуществляется в виде цифрового сигнала, не требующего дополнительного преобразователя. Обновление температуры возможно с периодичностью от 0,5 до 1 секунды в зависимости от разрешения. Датчик легко интегрируется с микроконтроллером ESP32 или аналогичными платформами без необходимости использования внешнего АЦП.

Выбор в пользу DS18B20 обоснован простотой монтажа, низким энергопотреблением, надёжностью конструкции и хорошей поддержкой на уровне программных библиотек. Использование гильзы и термопасты обеспечивает стабильную тепловую связь с трубопроводом, что особенно актуально при поверхностном контакте на металлических участках стояка.

Выбор ZigBee-модуля

В качестве модуля беспроводной передачи данных применяется чип EFR32MG21A (показан на рисунке 6), предназначенный для построения сетей ZigBee и Bluetooth Mesh. Его характеристики:

– микроконтроллер ARM Cortex-M33 с частотой до 80 МГц – выходная мощность до +20 dBm – чувствительность до –104 dBm – интеграция с интерфейсами UART, SPI, I2C – поддержка IEEE 802.15.4 и Mesh-топологии – низкое энергопотребление и спящий режим.

Модуль подключается к микроконтроллеру ESP32 по интерфейсу UART, обеспечивая передачу данных по протоколу ZigBee в координатор.

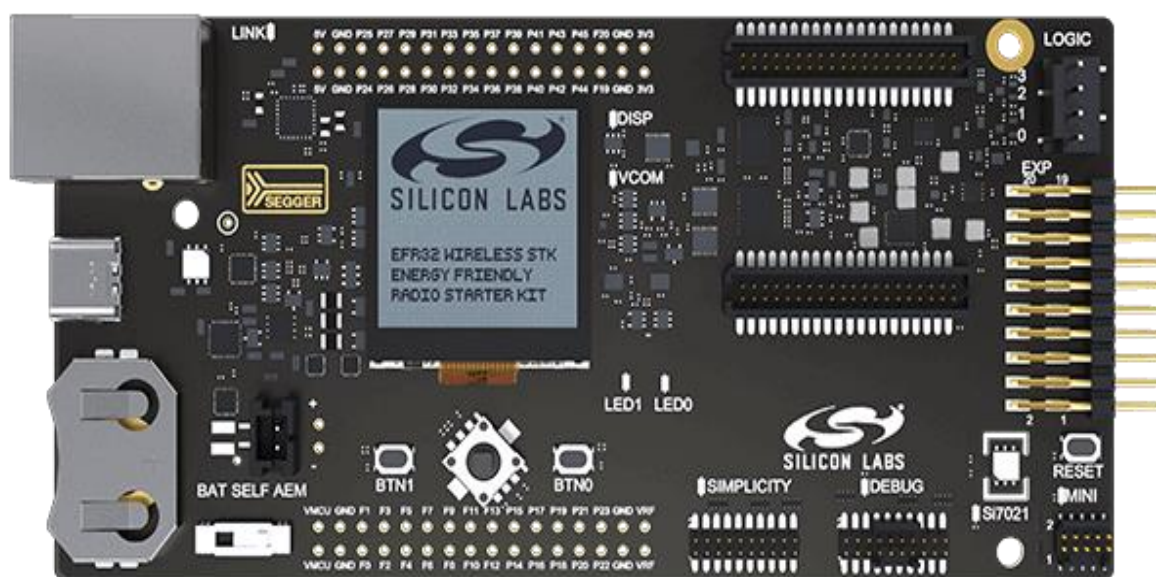


Рисунок 6 – Модуль-микроконтроллер EFR32MG21A

Выбор микроконтроллера

Для управления датчиком и ZigBee-модулем используется микроконтроллер ESP32 DevKitC (показан на рисунке 7). Он обеспечивает:

- цифровой ввод/вывод для интерфейсов 1-Wire и UART;
- встроенный стабилизатор напряжения 3,3 В;
- энергоэффективные режимы сна;
- совместимость с большинством библиотек и протоколов.

ESP32 обрабатывает полученные от датчика данные, формирует сообщение и отправляет его в ZigBee-модуль.

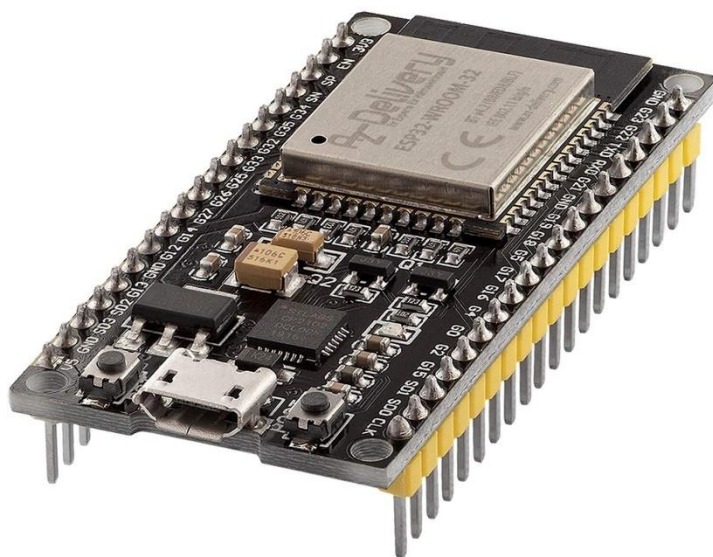


Рисунок 7 – Микроконтроллер ESP32

Выбор координатора ZigBee

В качестве центрального элемента сети используется шлюз Sonoff Zigbee Bridge (показан на рисунках 8, 9). Он выполняет функции координатора ZigBee-сети, принимает данные от сенсорных узлов и передаёт их на сервер через Wi-Fi. Устройство совместимо с платформой Home Assistant при использовании Zigbee2MQTT и MQTT-протокола.

Основные характеристики:

- поддержка ZigBee 3.0 – работа с до 128 устройств – автоматическая маршрутизация в Mesh-сети – интеграция с локальными системами автоматизации.

Координатор устанавливается в зоне устойчивого Wi-Fi-покрытия и обеспечивает стабильный приём данных от беспроводных сенсоров. Использование перепрошивки (например, на Tasmota) расширяет возможности настройки и совместимости с различными устройствами.



Рисунок 8 – Внешний вид хаба Sonoff Zigbee Bridge

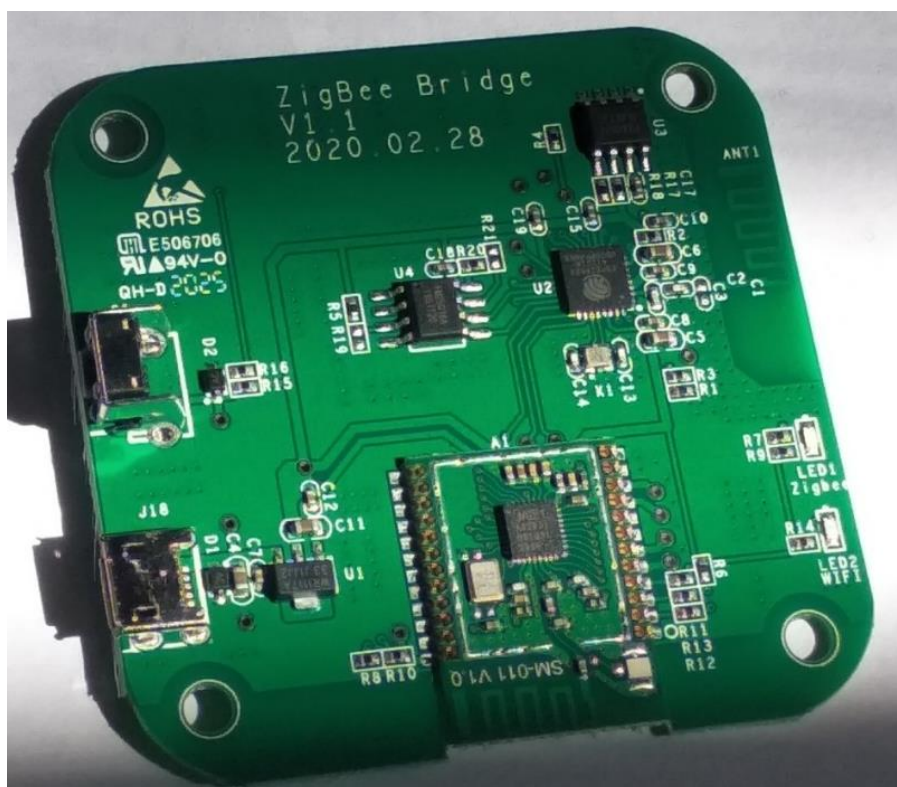


Рисунок 9 – Майнборд хаба Sonoff Zigbee Bridge

2.3 Расчет параметров ZigBee-сети

Сеть ZigBee функционирует в диапазоне частот 2,4 ГГц, где дальность прямой передачи сигнала в открытом пространстве может достигать 100 метров. Однако при эксплуатации внутри помещений параметры связи значительно зависят от конструктивных особенностей здания и наличия физических препятствий, таких как стены, перекрытия и элементы внутренней отделки.

Оценка потерь сигнала

При передаче сигнала через преграды наблюдается его затухание, обусловленное отражениями, поглощением и многолучевым распространением. Ориентировочные значения потерь для типовых материалов:

– гипсокартон снижает уровень сигнала на 5...8 дБ – кирпичная стена на 10...12 дБ – железобетонная стена — на 20...30 дБ.

Учитывая, что мощность передатчика ZigBee-модуля составляет до +20 dBm, при прохождении через две кирпичные стены остаётся порядка – 4 dBm, что находится на пределе чувствительности большинства приёмников. Для обеспечения устойчивой связи в таких условиях необходимо предусмотреть установку промежуточных устройств – маршрутизаторов.

Структура сети

Для типового многоквартирного здания с шестью стояками предусмотрена установка шести сенсорных узлов и двух ZigBee-маршрутизаторов, равномерно размещённых в пределах зоны покрытия. В центральной точке находится координатор, подключённый к серверу визуализации. Такая конфигурация позволяет реализовать полносвязную Mesh-сеть, в которой каждый узел может передавать данные через один или несколько соседних маршрутизаторов.

Рекомендации по размещению

– конечные устройства располагаются вблизи стояков отопления – маршрутизаторы устанавливаются в общем коридоре или шахте, обеспечивая максимальный охват – координатор размещается в пределах устойчивого сигнала Wi-Fi. На рисунке 10 показана схема организации сети.

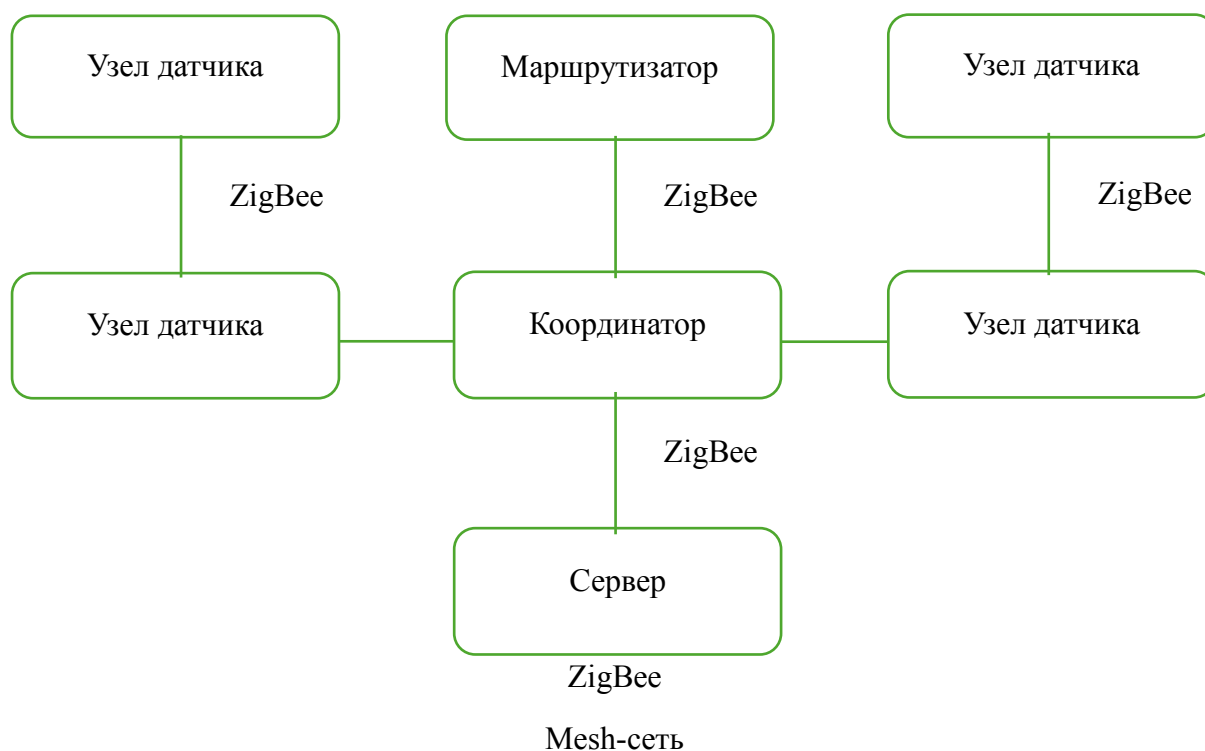


Рисунок 10 – Схема организации ZigBee-сети с размещением маршрутизаторов

Предложенная структура обеспечивает надёжную передачу данных при типовых потерях сигнала, допускает масштабирование и устойчива к выходу отдельных узлов за счёт автоматической маршрутизации.

2.4 Алгоритм работы системы

Функционирование системы мониторинга основано на последовательном выполнении задач, включающих съём данных, передачу по беспроводной сети и визуализацию результатов на сервере. Алгоритм работы сенсорного узла построен на периодическом опросе датчика температуры и передаче информации по протоколу ZigBee. Взаимодействие между компонентами представлено на рисунке 11.

Общий порядок работы устройства:

- после подачи питания контроллер ESP32 переходит в режим инициализации оборудования;
- по таймеру или заданному интервалу выполняется опрос датчика DS18B20 по шине 1-Wire;
- полученные данные проверяются по контрольной сумме CRC; при некорректном результате выполняется повторный опрос через заданную задержку, без перехода к следующим этапам;
- в случае корректного значения данные преобразуются в температурное значение, формируется информационный JSON-пакет, включающий адрес узла, температуру и временную метку;
- сформированный пакет передаётся на ZigBee-модуль через интерфейс UART;
- сообщение передаётся по Mesh-сети ZigBee, при необходимости ретранслируется соседними узлами;
- координатор сети принимает сообщение и отправляет его в локальную сеть по Wi-Fi;
- сервер Home Assistant получает данные через MQTT, сопоставляет с нужной переменной и отображает температуру в пользовательском интерфейсе.

Для оптимизации энергопотребления между циклами измерения контроллер ESP32 переходит в режим сна. Интервал опроса выбирается с учётом компромисса между актуальностью данных и продолжительностью автономной работы устройства (оптимально — 30...60 секунд).

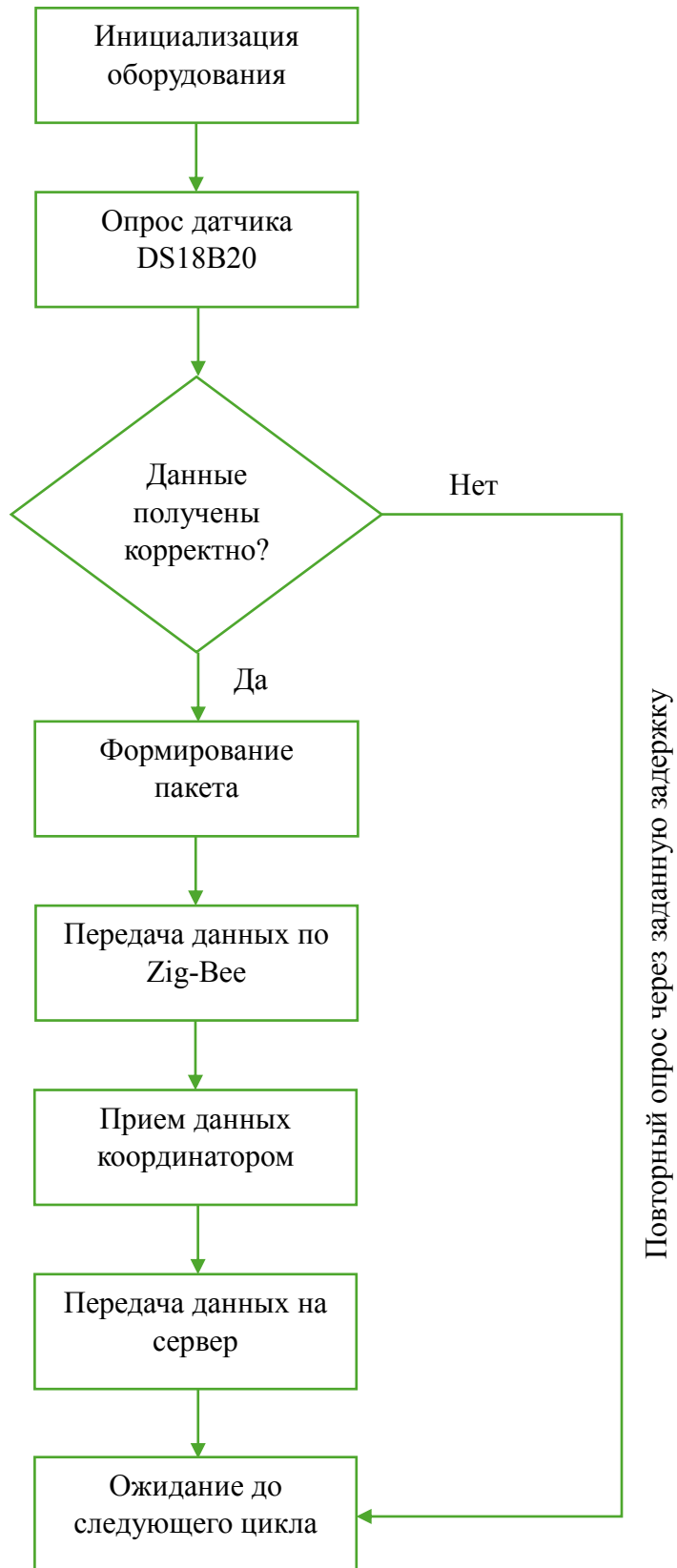


Рисунок 11 – Блок-схема (условий) работы сенсорного узла системы мониторинга

Представленная блок-схема условий иллюстрирует логически завершённую и повторяемую последовательность операций сенсорного узла, включая проверку корректности считанных данных и последующее ветвление. Такая структура обеспечивает масштабируемость системы — добавление новых точек измерения не требует изменения алгоритмической логики.

2.5 Вывод по проектно-расчетному разделу

Разработана масштабируемая распределённая система мониторинга температуры отопительных стояков, использующая цифровые датчики DS18B20, модули беспроводной связи на основе ZigBee и сервер визуализации Home Assistant. Выполнены расчёты параметров связи в условиях жилого здания, определены требования к узлам сети и реализован алгоритм взаимодействия компонентов по Mesh-топологии.

Отдельно стоит отметить обоснование выбора управляющего микроконтроллера. На этапе прототипирования использован модуль ESP32 благодаря его широким функциональным возможностям, отладочной поддержке и доступности библиотек. Это позволило быстро реализовать структуру взаимодействия с датчиком температуры и модулем ZigBee. Однако, в рамках полученного замечания по избыточности функционала ESP32 для данной задачи, а также с учётом требований к энергопотреблению, в заключительной части проектирования обоснована необходимость его замены на более энергоэффективный микроконтроллер или ZigBee-модуль с интегрированным MCU (например, EFR32MG21), способный выполнять опрос сенсоров и передачу данных автономно. Данный вывод учтён при формировании рекомендаций к дальнейшему развитию системы.

3 Конструкторско-технологический раздел

3.1 Разработка архитектуры системы сбора данных

В данном разделе представлена архитектура системы мониторинга температурных стояков, включающая все ключевые аппаратные и программные компоненты. Система предназначена для беспроводного сбора данных, передачи их по протоколу ZigBee и отображения значений на серверной платформе в графическом интерфейсе.

Состав системы:

– цифровые датчики температуры DS18B20 – микроконтроллеры ESP32, управляющие измерением и передачей – ZigBee-модули EFR32MG21A, реализующие беспроводную связь – координатор сети (Sonoff Zigbee Bridge), связанный с сервером – серверная часть на базе Home Assistant с поддержкой MQTT.

Алгоритм взаимодействия узлов:

1. Датчик измеряет температуру в заданном интервале;
2. ESP32 получает данные с DS18B20 и упаковывает их в формат JSON;
3. Данные передаются в ZigBee-модуль по UART;
4. Узел отправляет пакет по Mesh-сети;
5. Координатор получает пакет и отправляет его на сервер через Wi-Fi;
6. Home Assistant принимает значение и отображает в интерфейсе визуализации.

Схематическое отображение компонентов системы приведено на рисунке 12.

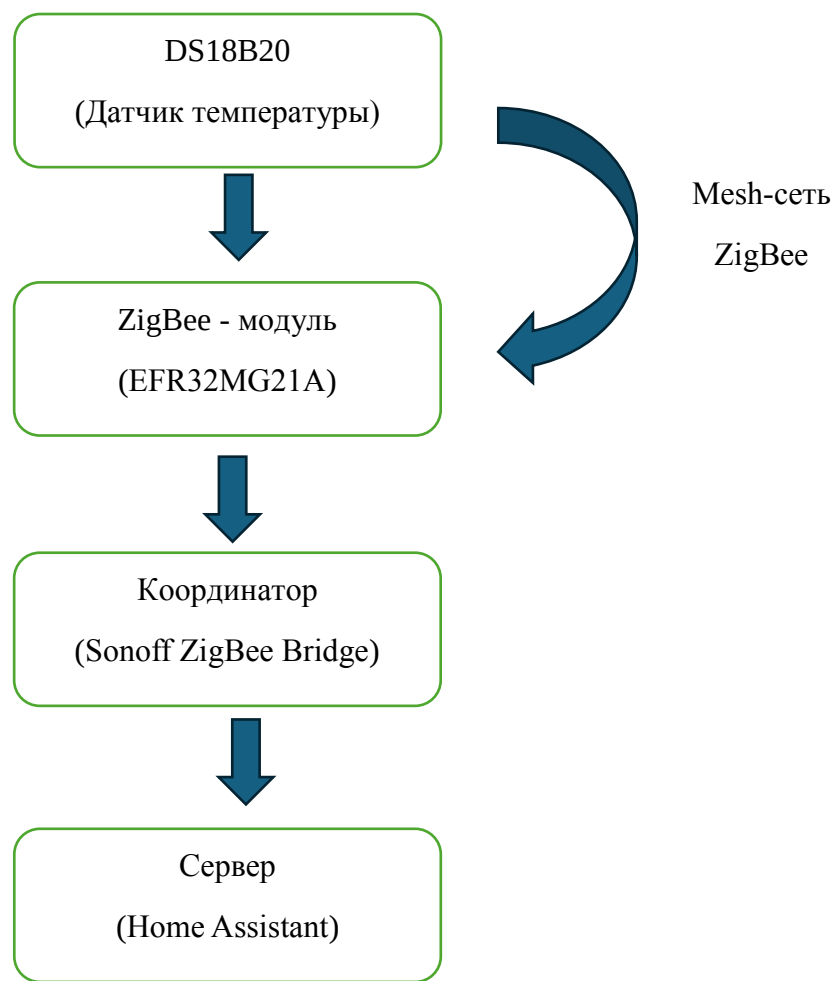


Рисунок 12 – Блок-схема системы

Примечание: Реальная схема может включать дополнительные маршрутизаторы ZigBee, если между датчиками и координатором имеются значительные преграды.

3.2 Подключение компонентов и схемы

Для построения сенсорного узла используются следующие компоненты:

– микроконтроллер ESP32 DevKitC – цифровой температурный датчик DS18B20 – ZigBee-модуль на чипе EFR32MG21A – резистор 4,7 кОм (подтяжка линии данных 1-Wire) – источник питания 3,3 В (встроенный в ESP32) – соединительные провода и монтажная плата.

Подключение компонентов осуществляется по стандартной схеме.

Подключение DS18B20:

– линия данных DQ подключается к GPIO4 контроллера ESP32 – питание VDD — к шине 3,3 В – GND — к общему проводу – между DQ и VDD установлен резистор 4,7 кОм (pull-up).

Подключение ZigBee-модуля (EFR32MG21A):

– RX ZigBee-модуля подключается к TX (GPIO17) ESP32 – TX ZigBee-модуля — к RX (GPIO16) ESP32 – питание модуля — 3,3 В – GND — к общей земле схемы.

Питание:

Все элементы питаются от стабилизированного источника 3,3 В, подаваемого с контроллера ESP32. При необходимости может использоваться внешний модуль питания или батарейное питание через LDO-стабилизатор. Компоненты должны быть объединены к общей «земле».

Подключение указано на рисунке 13, где показана схема подключения датчика DS18B20 к ESP32.

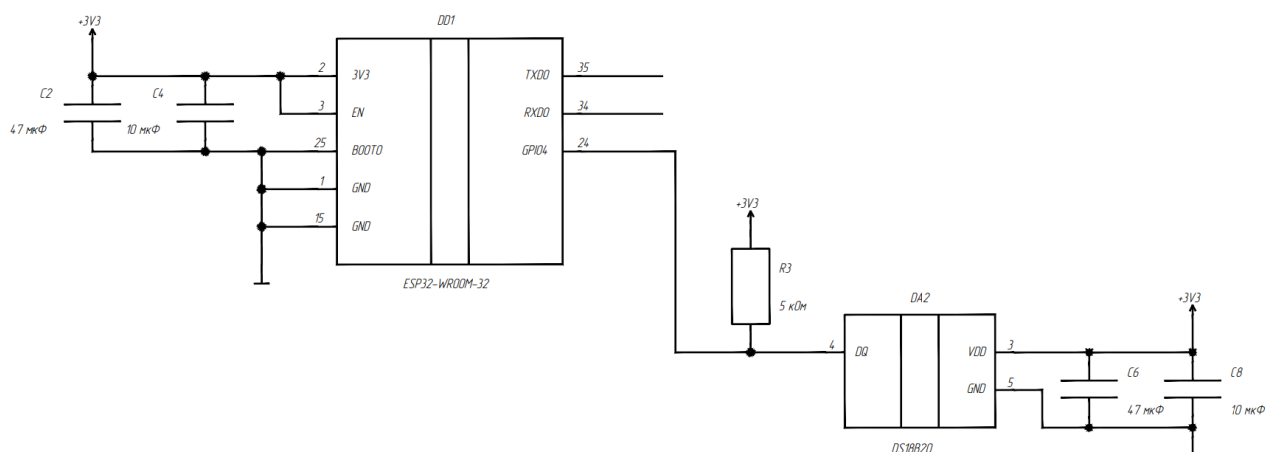


Рисунок 13 – Схема подключения датчика DS18B20 к ESP32

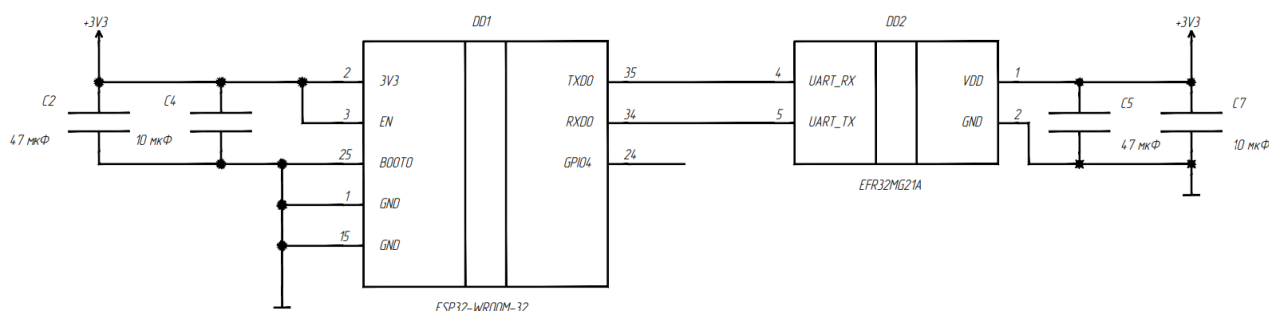


Рисунок 14 – Подключение модуля EFR32MG21A к микроконтроллеру ESP32

Модуль беспроводной связи EFR32MG21A подключается к микроконтроллеру ESP32 через интерфейс UART: вывод TX модуля соединён с GPIO16 (RX ESP32), а RX модуля — с GPIO17 (TX ESP32) (рисунок 14). Питание 3,3 В подаётся от стабилизированного выхода контроллера, общий провод (GND) объединён с землёй всей схемы. Такое соединение обеспечивает двунаправленный обмен данными по протоколу ZigBee и позволяет передавать измеренные параметры температуры от сенсоров в сеть. Схема исключает логические несоответствия и рассчитана на работу в рамках стандартного диапазона напряжений.

На принципиальной схеме (рисунок 15) представлен полный состав и электрические соединения всех компонентов, входящих в состав одного сенсорного узла системы мониторинга. Схема включает микроконтроллер ESP32, цифровой температурный датчик DS18B20 и модуль беспроводной связи EFR32MG21A, взаимодействующие между собой по цифровым интерфейсам 1-Wire и UART. Присутствует подтягивающий резистор на линии данных DS18B20. Подтягивающий резистор на линии данных DS18B20 необходим для корректной работы интерфейса 1-Wire. Он формирует стабильный логический уровень «1», предотвращает дребезг

сигнала и обеспечивает надёжный обмен между датчиком и микроконтроллером.

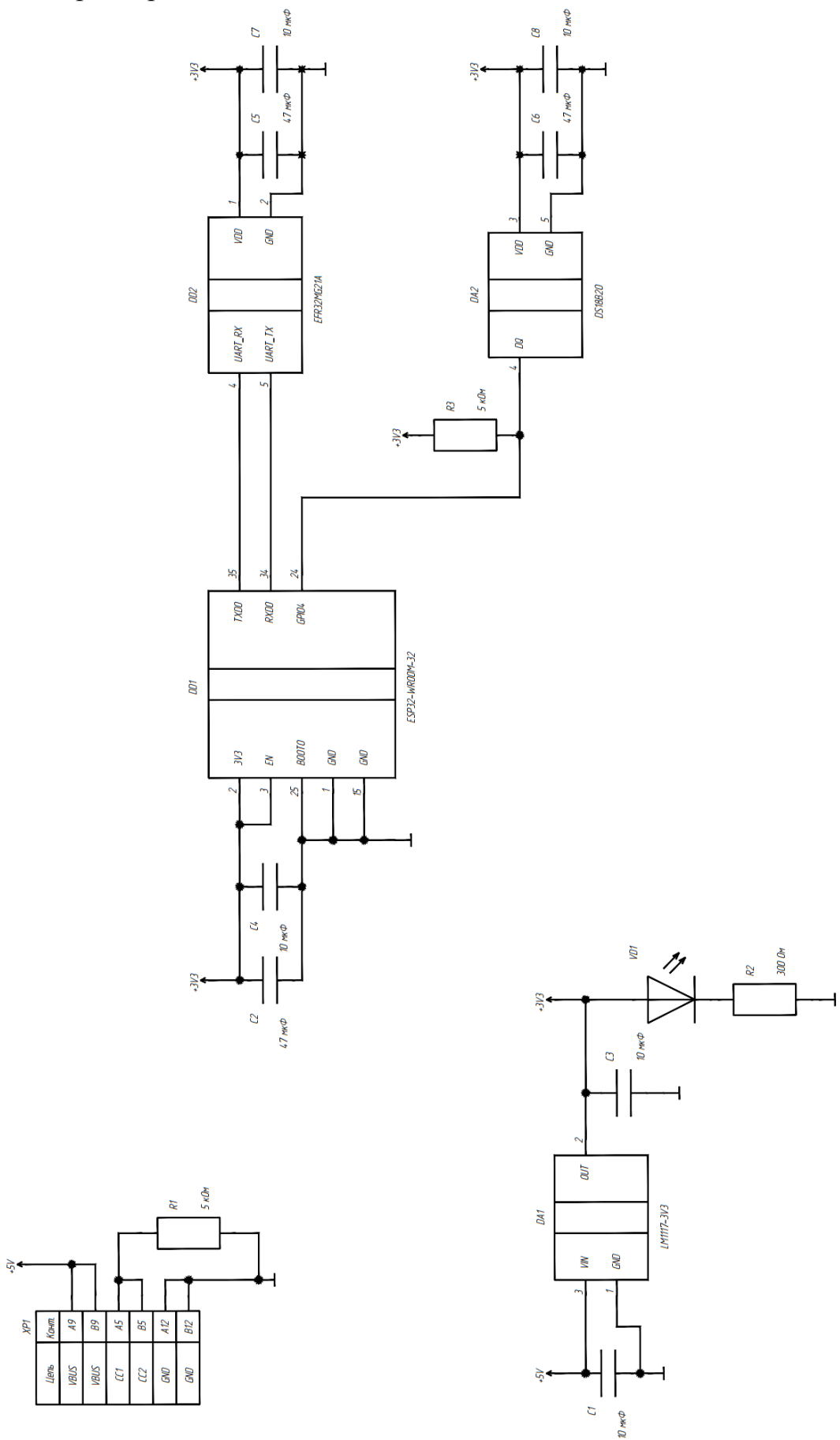


Рисунок 15 – Электрическая принципиальная схема сенсорного узла системы мониторинга

Микроконтроллер ESP32 DevKitC выступает в роли управляющего устройства, обеспечивая опрос температурного датчика и передачу полученных данных в ZigBee-модуль через интерфейс UART.

Датчик температуры DS18B20 подключён к выводу GPIO4 контроллера по интерфейсу 1-Wire. Между линией DQ и шиной питания 3,3 В установлен резистор подтяжки номиналом 4,7 кОм, обеспечивающий стабильный логический уровень и корректный обмен данными.

Также на схеме предусмотрены байпасные (децимирующие) конденсаторы, установленные между линией питания и общим проводом для подавления высокочастотных помех и стабилизации питания микроконтроллера и ZigBee-модуля. Их наличие обеспечивает надёжную работу узла при переключении режимов и во время передачи данных.

Питание на DS18B20 подаётся от встроенного стабилизатора 3,3 В платы ESP32, общая земля объединяет все компоненты.

При необходимости на схеме указывается дополнительный стабилизатор напряжения (например, LM1117-3.3), если питание подаётся от внешнего источника 5 В.

3.3 Программная реализация и алгоритмы работы системы

Программное обеспечение сенсорного узла реализовано с использованием платформы Arduino и разработано на языке C++. Основными задачами микроконтроллера ESP32 являются опрос цифрового температурного датчика DS18B20, формирование пакета данных и передача его через ZigBee-модуль в сеть.

Для работы с датчиком температуры используется библиотека DallasTemperature, обеспечивающая взаимодействие с шиной 1-Wire.

Сформированные данные упаковываются в формате JSON и передаются через UART-интерфейс на ZigBee-модуль.

Основные этапы алгоритма функционирования устройства:

1. Инициализация всех компонентов: DS18B20, UART, библиотеки JSON
2. Считывание температурного значения с сенсора
3. Формирование структуры данных в виде JSON-объекта
4. Передача JSON-пакета через UART в ZigBee-модуль
5. Переход в режим ожидания до следующего цикла измерений

Фрагмент кода основной программы представлен ниже:

```
#include <DallasTemperature.h>
#include <OneWire.h>
#include <ArduinoJson.h>

void loop() {
    sensors.requestTemperatures();
    float t = sensors.getTempCByIndex(0);
    DynamicJsonDocument doc(64);
    doc[«temperature»] = t;
    serializeJson(doc, Serial1);
    delay(60000); // задержка в 1 минуту
}
```

Полный скетч программы, включающий настройку UART-интерфейса, работу с датчиком DS18B20, формирование JSON-структур и обработку возможных ошибок, приведён в приложении А. В коде

реализованы все необходимые функции для считывания данных с цифрового сенсора, преобразования их в структурированный формат и передачи в радиомодуль с использованием стандартной библиотеки Serial.

Обмен данными между микроконтроллером ESP32 и ZigBee-модулем EFR32MG21A осуществляется через аппаратный UART-интерфейс, для чего задействованы порты GPIO16 (RX) и GPIO17 (TX). Протокол передачи — асинхронный, с параметрами: скорость 9600 бод (9600 бит/с), 8 бит данных, без контроля чётности, один стоп-бит. Выбор данной конфигурации обусловлен стабильной работой модулей на невысокой скорости обмена и достаточной пропускной способностью для передачи коротких сообщений температурных значений.

Сформированное сообщение, передаваемое от микроконтроллера ESP32 в ZigBee-модуль, представлено в формате JSON. Такой подход обеспечивает стандартизированную, легко парсируемую (от англ. parse, «разбирать», «анализировать») структуру данных.

Пример:

```
{  
  «id»: «ST_01»,  
  «temperature»: 22.3,  
  «timestamp»: «2025-06-24T13:45:00»  
}
```

«id» — уникальный идентификатор сенсорного узла, задаётся в программе вручную;

«temperature» — значение измеренной температуры в градусах Цельсия, округлённое до одного знака после запятой;

«timestamp» — временная метка, формируемая контроллером или сервером (опционально, в зависимости от реализации).

Если формирование временной метки на стороне ESP32 не требуется, поле «timestamp» может быть исключено, и сервер

визуализации будет добавлять время получения сообщения самостоятельно.

Передача осуществляется в текстовом виде без использования дополнительных уровней контроля целостности, так как сетевой стек ZigBee включает встроенные механизмы проверки (контрольные суммы, подтверждение доставки, повторная передача).

На стороне приёма координатор ZigBee (например, Sonoff Zigbee Bridge) принимает сообщение и перенаправляет его через шлюз Zigbee2MQTT в локальную сеть. Далее данные поступают в MQTT-брокер, где для каждого сенсорного узла создаётся свой топик (например, zigbee/sensor/ST_01). Это позволяет динамически интегрировать новые устройства без ручной перенастройки сервера.

Визуализация полученных данных осуществляется в серверной части системы — на платформе Home Assistant, настроенной на приём MQTT-сообщений. В интерфейсе дашборда отображаются текущие значения температуры, графики изменения во времени, а также возможно задание порогов и уведомлений при выходе за пределы нормы. Архивирование показаний осуществляется автоматически в базу данных платформы (обычно SQLite или InfluxDB), что позволяет проводить ретроспективный анализ и строить аналитические отчёты.

Таким образом, реализованная программа обеспечивает надёжное и масштабируемое взаимодействие между сенсорным узлом и системой визуализации, с учётом особенностей протоколов UART, ZigBee и MQTT. Работа узла не требует внешнего вмешательства и может функционировать автономно в течение длительного времени, при этом корректно интегрируясь в распределённую сеть сбора данных.

3.4 Технологическая реализация и интеграция готового прототипа

Функциональная схема системы

Для полной наглядности взаимодействия аппаратных и программных компонентов разработанного прототипа на рисунке 16 представлена функциональная схема системы. Она служит основой для понимания логики работы всей системы мониторинга и демонстрирует последовательность передачи данных от источника измерений до конечного уровня отображения.

На схеме прослеживается полный путь, начиная с формирования сигнала цифровым температурным датчиком DS18B20, установленным на поверхности стояка отопления. Этот сигнал поступает на микроконтроллер ESP32, где происходит его первичная обработка: считывание, проверка контрольной суммы, преобразование в числовое значение и упаковка в формат JSON.

После этого данные передаются через интерфейс UART на ZigBee-модуль, интегрированный в тот же сенсорный узел. Благодаря поддержке стандарта IEEE 802.15.4 и архитектуре Mesh, модуль обеспечивает надёжную беспроводную передачу информации даже через строительные преграды. Сигнал маршрутизируется по сети и в конечном счёте доставляется до координатора — устройства, выполняющего агрегацию данных от всех узлов системы.

Координатор, функционирующий на базе устройства Sonoff Zigbee Bridge, конвертирует ZigBee-сообщения и перенаправляет их через Wi-Fi в локальную сеть. Здесь информацию принимает MQTT-брокер, интегрированный с сервером визуализации на платформе Home Assistant.

На уровне сервера данные декодируются и записываются в переменные соответствующих измерительных узлов. Далее они

отображаются в пользовательском интерфейсе — дашборде Home Assistant, где пользователь может отслеживать значения температуры в реальном времени, анализировать историю изменений и оперативно реагировать на отклонения.

Интерфейс также позволяет настроить автоматические сценарии: например, оповещения при превышении пороговых значений или запуск внешнего оборудования. Таким образом, схема не только иллюстрирует передачу данных, но и подчёркивает интеграцию всей системы в рамках единой IoT-экосистемы.

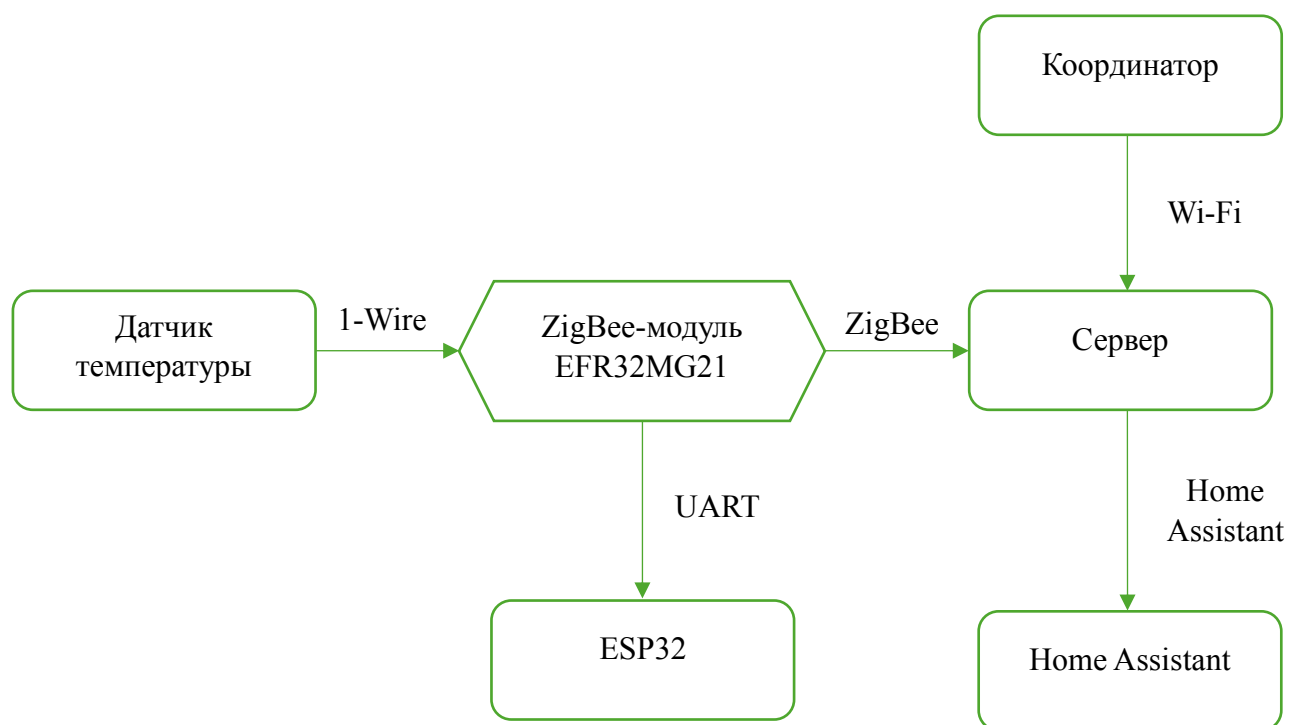


Рисунок 16 – Функциональная схема системы сбора и визуализации температурных данных

Сборка готового прототипа

Аппаратная сборка:

Корпус: для сборки прототипа используется прототипная плата (например, breadboard или печатная плата для разработки) с местами для установки ESP32, DS18B20 (несколько датчиков) и ZigBee-модуля.

Питание: используется стабилизированное питание (модуль 3.3V для ESP32 и ZigBee-модуля, 5V для некоторых датчиков, если требуется) с возможностью автономного питания от аккумулятора.

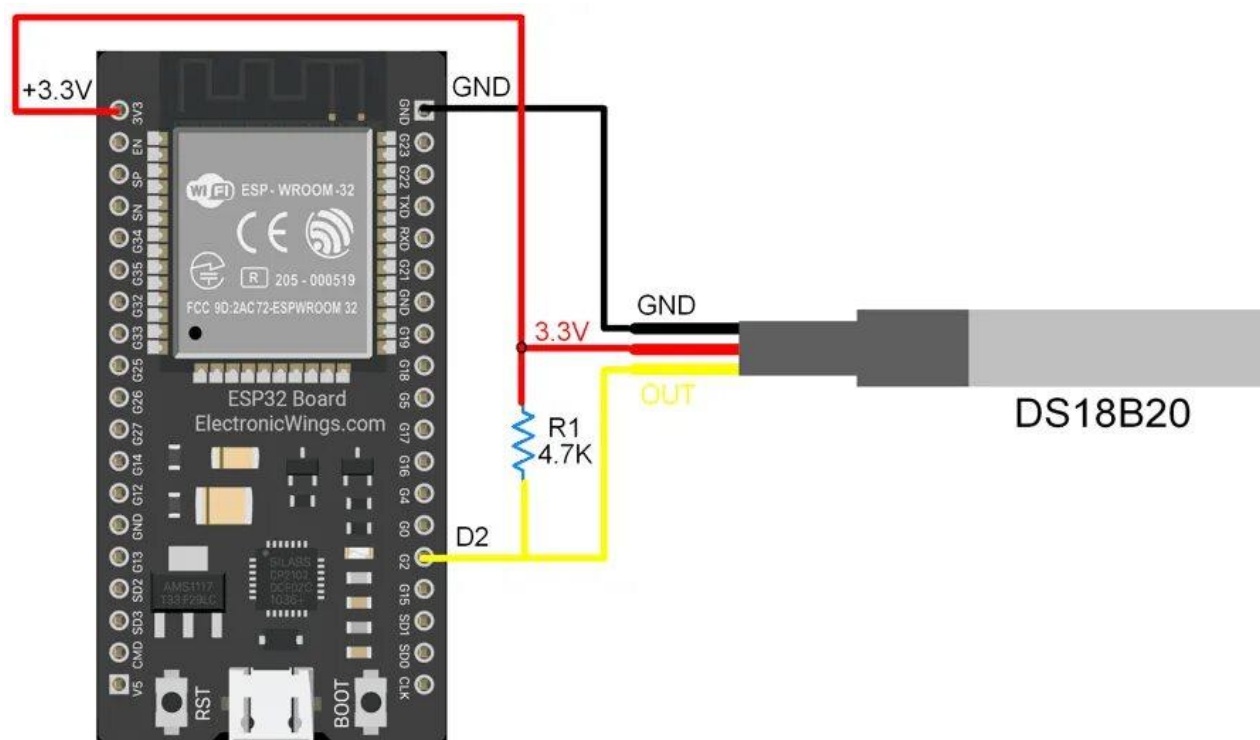


Рисунок 17 – Схема подключения ESP32 DS18B20 Zigbee

Антенны: при необходимости для повышения дальности связи антенные разъемы подключаются к ZigBee-модулю.

Хранение данных: данные, полученные с датчиков и обработанные микроконтроллером ESP32, передаются по беспроводной связи (через ZigBee-модуль) на шлюз (например, Sonoff Zigbee Bridge). После этого

информация пересылается на сервер или в систему умного дома (например, Home Assistant) по протоколу MQTT или через облачный сервис. Для долговременного хранения и анализа показатели температуры сохраняются в базе данных (например, InfluxDB, SQLite или встроенное хранилище Home Assistant), что позволяет строить графики изменений и осуществлять мониторинг в реальном времени.

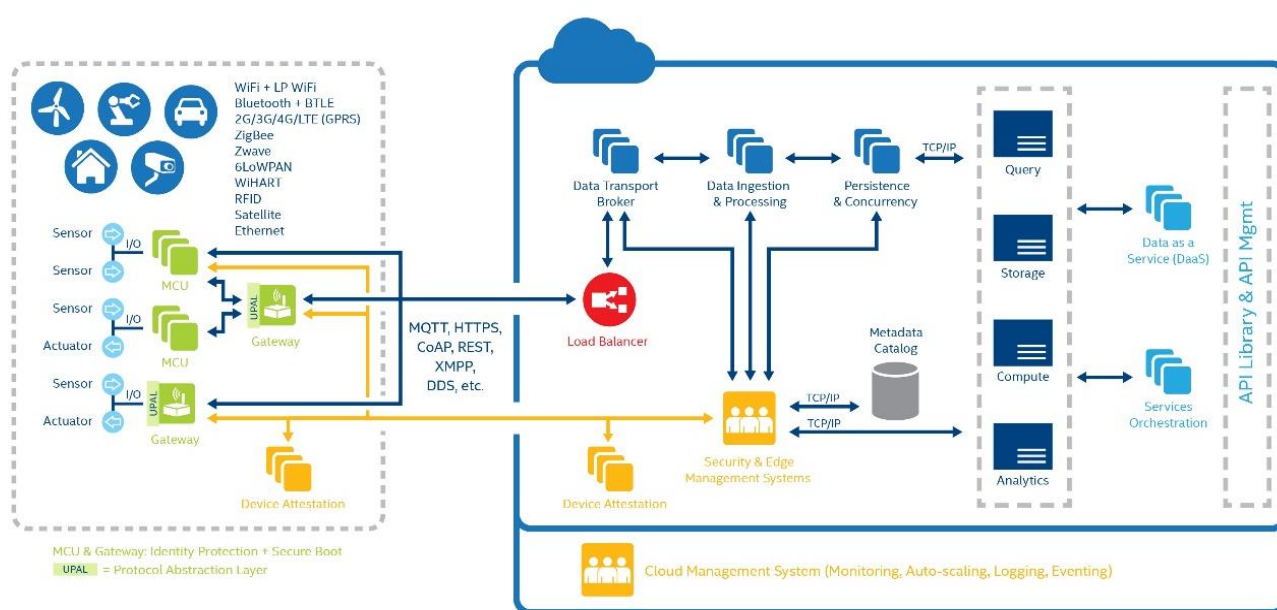


Рисунок 18 – Схема передачи и хранения данных

Программное обеспечение:

Загружен скетч для ESP32 (как показано в примере), который считывает данные с DS18B20, формирует JSON и передаёт их через UART к ZigBee-модулю.

На стороне координатора настроена прошивка Sonoff Zigbee Bridge для приема данных и их передачи в сеть Wi-Fi.

На сервере настроен Home Assistant с MQTT-интеграцией, который подписан на топик (например, zigbee/sensor/ST_01) и отображает полученные данные на дашборде.

Тестирование готового прототипа

Этапы тестирования:

1. Проверка работы датчиков: сравнение измерений DS18B20 с контрольными измерениями (например, стандартным термометром) для подтверждения точности.

2. Тестирование ZigBee-сети: проверка стабильности передачи данных с разных точек — в открытом пространстве и через стены. Имитировать перебои в связи и проверить автоматическую маршрутизацию.

3. Проверка серверной интеграции: проверка корректного приема JSON-сообщений в Home Assistant, обновление данных на дашборде, срабатывание уведомлений при превышении пороговых значений.

Критерии успешного тестирования: данные передаются по сети без значительных задержек; графики обновляются каждые 5 секунд в режиме реального времени; при возникновении ошибок (например, потеря связи) система автоматически уведомляет оператора.

Оптимизация энергопотребления

Режимы сна и энергосбережения

Для датчиков DS18B20: возможность использования паразитного питания позволяет уменьшить расход энергии за счёт сокращения количества внешних проводов. Для ZigBee-модулей: настройка перехода в спящий режим (sleep mode) в периоды отсутствия активности сети снижает энергопотребление до долей миллиампер.

Оптимизация периодичности измерений: установка интервала между измерениями (например, 30 – 60 секунд) позволяет сбалансировать частоту обновления и энергопотребление.

Результаты предварительных расчётов:

Оценка среднего энергопотребления на датчик может быть снижено до 1 мА во время активного измерения. При использовании режима сна

ZigBee модулей среднее энергопотребление уменьшается приблизительно на 40–50%.

Итоги готового прототипа и возможности масштабирования

Готовый прототип включает:

Аппаратную часть: ESP32 с подключенными датчиками DS18B20, ZigBee-модуль на базе EFR32MG21A и координатор Sonoff Zigbee Bridge.

Программную реализацию: программа для считывания температуры, формирования JSON и передачи данных, а также серверная интеграция с Home Assistant для визуализации.

Проверенную работоспособность: проведены тесты на стабильность связи через стены и точность измерений, а также реализация облачной интеграции.

Возможности масштабирования: легко добавить дополнительные датчики для измерения температуры на других стояках. Использование Mesh-сети позволяет расширить систему без значительного увеличения сложности. Возможность интеграции с другими IoT-системами (например, автоматическое управление вентилями) для создания комплексной системы управления отоплением.

Для повышения надёжности связи между сенсорными узлами и координатором в системе применяются ZigBee-маршрутизаторы. Они обеспечивают ретрансляцию сообщений по Mesh-топологии, способствуя устойчивой передаче данных при наличии архитектурных преград. В качестве примеров можно привести: Tuuya ZigBee Smart Plug, Sonoff Zigbee USB Dongle Plus (в режиме маршрутизатора) и IKEA TRÅDFRI Signal Repeater — устройства, совместимые с ZigBee 3.0 и поддерживающие автоматическое включение в сеть.

3.5 Вывод о конструкторско-технологическом разделе

В результате выполнения конструкторско-технологического раздела была разработана структура сенсорного узла, предназначенного для измерения температуры стояков отопления и передачи собранных данных в систему визуализации. Проект охватывает полный цикл инженерного проектирования: от построения архитектуры до реализации аппаратной схемы и программной логики взаимодействия компонентов с учётом особенностей беспроводной передачи информации в условиях жилых зданий.

Благодаря использованию микроконтроллера ESP32, цифрового датчика DS18B20 и ZigBee-модуля EFR32MG21A удалось обеспечить не только совместимость всех элементов по уровням сигналов и интерфейсам, но и реализовать устойчивое взаимодействие с низким энергопотреблением. Принципиальная схема узла охватывает все основные модули — от цепей питания до канала передачи данных — что гарантирует целостность архитектуры и её адаптацию под различные конфигурации.

Программная часть реализована в среде Arduino с применением библиотек DallasTemperature и ArduinoJson, что упрощает разработку, тестирование и последующую модернизацию. Алгоритм работы включает инициализацию оборудования, опрос сенсора, формирование сообщения в формате JSON и передачу данных по UART. Такая модульность позволяет в будущем оперативно адаптировать код для работы с другими сенсорами или сетевыми интерфейсами. Используемая структура JSON обеспечивает совместимость с широким спектром программных платформ, а передача по протоколу ZigBee открывает возможности для масштабирования сети без изменения логики обмена.

Заключение

В данной бакалаврской работе была выполнена комплексная разработка распределённой системы мониторинга температуры стояков отопления, реализованной на базе технологии ZigBee. Проект охватил все стадии инженерного цикла — от формулировки задач и обоснования технологического выбора до построения архитектурной модели, разработки схем, программной реализации и интеграции в современную IoT-среду.

Обоснование выбора беспроводной технологии ZigBee строилось на анализе специфики многоквартирных зданий с вертикальной разводкой стояков отопления. Такие системы требуют устойчивого мониторинга в условиях сложной архитектуры, наличия перекрытий и преград, а также высокой степени автономности. Среди альтернативных решений ZigBee был выбран как наиболее подходящий протокол, благодаря низкому энергопотреблению, поддержке Mesh-сетей, устойчивости к радиопомехам и способности к самоорганизации маршрутов.

Сформированная система базируется на цифровых датчиках температуры DS18B20, ZigBee-модулях на чипе EFR32MG21A, координаторе сети (Sonoff Zigbee Bridge) и сервере визуализации Home Assistant с MQTT-интеграцией. В состав проекта включена разработка схем подключения, расчёт топологии сети, анализ устойчивости сигнала и алгоритмическое описание принципа работы каждого компонента. Архитектура отличается модульностью, надёжностью и возможностью дальнейшего наращивания без переработки логики передачи данных.

Программная реализация сенсорного узла построена на использовании открытых библиотек и языка C++ в среде Arduino. Алгоритм включает опрос температурного датчика DS18B20 по интерфейсу 1-Wire, проверку контрольной суммы CRC, формирование

сообщения в формате JSON и передачу данных через интерфейс UART в ZigBee-модуль. Протокол взаимодействия с сервером реализован на базе MQTT, позволяя системе быть гибкой, расширяемой и легко интегрируемой в существующие платформы «умного дома».

Отдельное внимание было уделено выбору управляющего контроллера. На этапе макетирования системы в составе сенсорного узла применён модуль ESP32. Этот выбор обусловлен техническими и организационными причинами: ESP32 обладает встроенными интерфейсами UART, 1-Wire и ADC, хорошо поддерживается в среде Arduino, имеет развитую библиотечную экосистему и позволяет оперативно реализовать прототип, минимизируя трудозатраты на начальном этапе. Также, наличие встроенного стабилизатора питания и интерфейса USB позволяет упростить подключение и наладку системы без необходимости дополнительной аппаратной обвязки.

При этом следует отметить, что использование ESP32 не означает его привязку к финальной версии системы. Уже в рамках проектной части обоснована возможность замены этого модуля на более энергоэффективные решения. В частности, возможно использование упрощённого микроконтроллера с меньшим энергопотреблением (например, STM32L, ATmega328) либо полная интеграция функций управления и передачи данных в рамках ZigBee-модуля EFR32MG21A, оснащённого собственным вычислительным ядром. Такой подход позволит существенно сократить энергозатраты конечного устройства и упростить его конструктивную реализацию. Таким образом, выбор ESP32 на этапе разработки является осознанным, рационально оправданным и не ограничивает перспективы дальнейшего развития системы.

Предложенное решение демонстрирует соответствие современным требованиям к системам мониторинга: архитектурная гибкость, низкое энергопотребление, устойчивость связи и возможность масштабирования.

Протокол ZigBee позволяет строить самоорганизующиеся сети с ретрансляцией данных, что особенно актуально в многоквартирных зданиях с плотной застройкой. Использование открытых стандартов и платформ (MQTT, Home Assistant) облегчает интеграцию в уже существующую инфраструктуру и предоставляет возможности расширения функционала за счёт подключения дополнительных датчиков или исполнительных устройств.

Таким образом, можно утверждать, что цели и задачи бакалаврской работы достигнуты в полном объёме. Разработана и обоснована инженерная система, отвечающая требованиям надёжности, энергоэффективности и масштабируемости. Архитектура может быть легко адаптирована для решения аналогичных задач в области автоматизации и контроля параметров окружающей среды, как в бытовом, так и в промышленном секторе.

Разработанная система не только обеспечивает точный сбор данных и визуализацию, но и обладает гибкостью благодаря использованию маршрутизаторов ZigBee. Это позволяет масштабировать сеть без изменения логики передачи и гарантирует устойчивость связи даже в условиях сложной архитектуры здания.

В перспективе данная система может служить основой для внедрения механизмов автоматической регулировки отопления, создания предиктивных алгоритмов управления микроклиматом, интеграции в комплексные системы «умного дома» и формирования распределённых сетей мониторинга на уровне района или города. Полученный результат демонстрирует не только техническую состоятельность предложенного подхода, но и его соответствие принципам устойчивого развития и повышения энергоэффективности в жилищно-коммунальном секторе.

Список использованных источников

1. ГОСТ 26331–94. Соединения первичных преобразователей температуры с трубопроводами и аппаратами. Типы и основные размеры. Технические требования. — М.: Госстандарт России, 1995.
2. ГОСТ Р 8.585–2001. Государственная система обеспечения единства измерений. Термопары. Номинальные статические характеристики преобразования. — М.: Стандартинформ, 2010.
3. Макаров С. Л. Arduino UNO и Raspberry Pi 3: от схемотехники к интернету вещей. — М.: ДМК Пресс, 2019. — 206 с.
4. Позднов М. В., Прядилов А. В. Выполнение бакалаврской работы: учеб.-метод. пособие. — Тольятти: Изд-во ТГУ, 2020. — 57 с.
5. Рычков Е. Н. Устройства умного дома и Интернета вещей на основе плат семейства ESP32. — Уфа: Ridero, 2024. — 240 с.
6. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника: в 2 т. — М.: ДМК Пресс, 2015. — 1770 с.
7. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники. — М.: БИНОМ, 2024. — 704 с.
8. Шерц П., Монк С. Практическая электроника для изобретателей. — М.: ДМК Пресс, 2022. — 1088 с.
9. Arduino – OneWire Library Documentation [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.arduino.cc/reference/en/libraries/onewire/> (дата обращения: 23.06.2025).
10. ArduinoJson — C++ JSON library for IoT [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://arduinojson.org/> (дата обращения: 26.06.2025).
11. DallasTemperature Library — Arduino Library for Maxim Temperature ICs [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://github.com/milesburton/Arduino-Temperature-Control-Library> (дата обращения: 21.06.2025).

12. DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer Datasheet [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf> (дата обращения: 09.06.2025).

13. EFR32MG21 Series 2 Wireless Gecko SoC Datasheet [Электронный ресурс]. — Silicon Labs. — Режим доступа: <https://www.silabs.com/documents/public/data-sheets/efr32mg21-datasheet.pdf> (дата обращения: 14.06.2025).

14. ESP32 Arduino Core — Official documentation for ESP32 development using Arduino [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://docs.espressif.com/projects/arduino-esp32/en/latest/> (дата обращения: 24.06.2025).

15. ESP32 Technical Reference Manual [Электронный ресурс]. — Espressif Systems. — Режим доступа: <https://docs.espressif.com/projects/espressif/en/latest/esp32/> (дата обращения: 20.06.2025).

16. ESPHome — Smart home firmware for ESP devices [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://esphome.io/> (дата обращения: 26.06.2025).

17. Guru-PNR. Всё про термопары: принцип действия, типы, характеристики [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://guru-pnr.ru/index.php?appl=textviewer&type=wiki&article=kipiadatchiki_temperatura_tps (дата обращения: 26.06.2025).

18. Home Assistant Documentation [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.home-assistant.io/docs/> (дата обращения: 15.06.2025).

19. IEEE 802.15.4. Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs) [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://mentor.ieee.org/802.15/dcn/14/15-14-0585-01-0000.pdf> (дата обращения: 18.06.2025).

20. MQTT Essentials – A Lightweight IoT Protocol [Электронный ресурс]. — HiveMQ. — Режим доступа: <https://www.hivemq.com/mqtt-essentials/> (дата обращения: 26.06.2025).

21. Owen. Датчики температуры. Термопары: справочная информация [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://owen.ru/catalog/datchiki_temperaturi/info/general_information_termopari (дата обращения: 26.06.2025).

22. Sonoff Zigbee Bridge — User Manual [Электронный ресурс]. — ITEAD. — Режим доступа: <https://itead.cc/product/sonoff-zigbee-bridge/> (дата обращения: 21.06.2025).

23. Tasmota Documentation — Open source firmware for ESP-based devices [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://tasmota.github.io/docs/> (дата обращения: 23.06.2025).

24. ZigBee Alliance. Zigbee Specification 3.0 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://zigbeealliance.org/solution/zigbee/> (дата обращения: 20.06.2025).

25. Zigbee2MQTT: Documentation and Integration Guide [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.zigbee2mqtt.io/> (дата обращения: 16.06.2025).

Приложение А

Фрагмент исходного кода программы для микроконтроллера ESP32

```
#include <OneWire.h>           // 1-Wire шина
#include <DallasTemperature.h> // DS18B20
#include <ArduinoJson.h>       // JSON

#define ONE_WIRE_BUS 4        // GPIO4 – шина данных

OneWire oneWire(ONE_WIRE_BUS);
DallasTemperature sensors(&oneWire);

void setup() {
    sensors.begin();           // Инициализация датчика
    Serial1.begin(9600);       // UART для ZigBee
}

void loop() {
    sensors.requestTemperatures();
    float t = sensors.getTempCByIndex(0);

    DynamicJsonDocument doc(128);
    doc[«id»] = "ST_01";       // ID узла
    doc[«temperature»] = t;     // Температура (°C)
    serializeJson(doc, Serial1); // Отправка JSON
    delay(60000);              // Интервал — 60 с
}
```