

ПРОГРАММНО-УПРАВЛЯЕМОЕ УСТРОЙСТВО УДАЛЁННОГО МОНИТОРИНГА ХОЛОДИЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ С ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫМ АНАЛИЗОМ ПАРАМЕТРОВ

Бобровский П.Д.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь*

Научный руководитель: Кудина А.В. – к.т.н., доцент, доцент кафедры ЭТТ

Аннотация. Разрабатывается программно-управляемое автономное устройство удалённого мониторинга холодильного оборудования, обеспечивающее сбор данных от подключённых датчиков, их интеллектуальный анализ на уровне edge-вычислений, выявление аномалий работы системы и передачу информации для повышения надёжности эксплуатации и эффективности управления холодильными установками.

Ключевые слова: удалённый мониторинг, холодильное оборудование, интернет вещей, IoT, edge-вычисления, интеллектуальный анализ данных, предиктивная диагностика, датчики, промышленный мониторинг, автоматизация.

Введение. Программно-управляемое автономное устройство удалённого мониторинга холодильного оборудования представляет собой самостоятельный аппаратно-программный шлюз, известный как edge-устройство [1]. Оно функционирует в качестве центральной точки для сбора данных, их предварительной обработки и последующей передачи информации, полученной от разнообразных датчиков, подключённых к холодильной системе. Кроме того, это устройство обеспечивает возможность дистанционного управления различными исполнительными компонентами, такими как реле, клапаны и частотные преобразователи.

Основная часть. Устройство спроектировано для установки непосредственно у объекта мониторинга, который может располагаться в серверной комнате, внутри холодильной камеры, в распределительном щите или даже на наружной стене транспортного средства. Оно работает в автономном режиме, независимо от наличия внешнего персонального компьютера, поскольку оснащено собственным процессором, системой энергообеспечения, часами реального времени, а также средствами связи как с облачными сервисами, так и с мобильными операторами. Само устройство не способно измерять какие-либо параметры без подключения внешних датчиков. Все необходимые измерения поступают от подключённых сенсоров, которые могут отслеживать температуру, давление, ток, влажность, факт открытия дверей, утечки фреона и другие важные параметры.

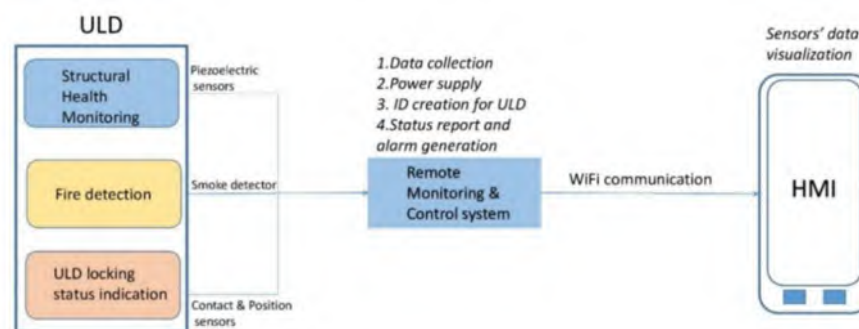


Рисунок 1 – Структурная схема системы удалённого мониторинга

Устройство проектируется модульным и сенсор-агностическим, что позволяет ему быть гибким и универсальным в различных применениях. Стандартный набор интерфейсов обеспечивает подключение разнообразных датчиков и контроллеров, включая цифровые и аналоговые варианты [1]. Для измерения температуры могут быть использованы датчики 1-Wire/DS18B20. Для интеграции с промышленными датчиками и контроллерами предусмотрен интерфейс RS-485, работающий по протоколу Modbus RTU [4]. Кроме того, интерфейсы I²C и SPI позволяют подключать платы расширения, расширяя функциональные возможности устройства. Аналоговые входы поддерживают сигналы 4–20 mA и 0–10 V, что подходит для подключения датчиков давления и уровня. Универсальные GPIO позволяют интегрировать герконы, датчики открытия дверей и датчики протечки. Для управления и контроля коммутации устройство оснащено релейными выходами и опторазвязками. Дополнительно, в зависимости от конфигурации, могут быть доступны интерфейсы CAN или Modbus TCP/IP для взаимодействия с другими устройствами и системами. Для обеспечения связи с удалённым сервером и мобильным приложением устройство поддерживает различные варианты подключения, включая Ethernet, Wi-Fi и сотовые сети (LTE/5G, NB-IoT). На случай потери основного соединения предусмотрен резервный канал связи, который может быть реализован через SMS или LoRaWAN. Блок питания устройства поддерживает технологию PoE (Power over Ethernet), что упрощает его подключение и снижает количество необходимых кабелей. Кроме того, предусмотрена возможность использования автономной батареи или UPS (Uninterruptible Power Supply) для обеспечения непрерывной работы устройства при отключении основного электропитания.

На борту устройства функционирует встроенная операционная система и комплекс специализированных сервисов, обеспечивающих полный цикл обработки данных: сбор данных с датчиков, предварительную фильтрацию для удаления шумов и избыточной информации, проверку целостности для обеспечения достоверности собранных данных, сжатие для оптимизации хранения и передачи, а также шифрование для защиты данных от несанкционированного доступа. Кроме того, на устройстве имеется локальная временная база данных для хранения хронологически упорядоченной информации и продвинутый движок аналитики, позволяющий проводить глубокий анализ собранных данных. Интеллектуальная составляющая системы реализована в виде гибридного решения, объединяющего правила и модели машинного обучения [5]. В частности, используется rule-engine для отслеживания критических порогов и сценариев безопасности, таких как падение давления хладагента или выход температуры за допустимые пределы. Дополнительно применяются модели anomaly-detection и predictive-maintenance, обученные на обширных исторических профилях работы оборудования, что позволяет осуществлять раннее выявление деградации компрессора, утечек или неэффективной работы системы. Устройство также производит корреляционный анализ, сопоставляя изменение температуры с током компрессора, временем открытия дверей и уличной температурой, чтобы точно отличать нормальные сезонные колебания от аномалий. Важно отметить, что интеллектуальный анализ выполняется непосредственно на границе сети (edge), что позволяет устройству быстро детектировать срочные проблемы и формировать информативные, контекстные тревоги [2]. Однако, в соответствии с принятым архитектурным ограничением, устройство предназначено в первую очередь для мониторинга и дистанционного управления, а не для замены решений, принимаемых оператором. Оно генерирует предупреждения, диагностические отчёты и рекомендации, а реальные корректирующие команды выполняются либо по удалённым инструкциям оператора, либо через административные политики, заданные владельцем системы. Хотя существует опция «автоматическое безопасное вмешательство», по умолчанию она остаётся отключенной, подчёркивая приоритет ручного управления и контроля.

Основной функционал и особенности:

1 Сбор и унификация данных от разных типов датчиков (температура, давление, ток, вибрация, влажность, CO₂, положения дверей).

2 Локальная проверка качества данных (фильтрация выбросов, декодирование, верификация сигнатур датчиков), отслеживание «здоровья» сенсоров (контроль обрыва, шумов, калибровочных дрейфов).

3 Edge-аналитика: детекция аномалий, прогноз отказов, выявление трендов энергопотребления и эффективности.

4 Система уведомлений и эскалации: push-уведомления, SMS, e-mail, интеграция с платформами мониторинга (SCADA, CMMS) через REST/HTTPS, MQTT, WebSocket.

5 Дистанционное управление: исполнение команд удалённого оператора (включение/выключение компрессора, перевод в режим энергосбережения, открытие/закрытие клапанов) через безопасный канал; журналирование всех действий.

6 Гибкая политика выборки: адаптивные частоты опроса (обычно 1–60 с) и агрегация для передачи, чтобы экономить трафик при стабильной работе и увеличивать детализацию при наличии аномалий.

7 FOTA (firmware-over-the-air) и управление конфигурацией: удалённый деплой обновлений и смена параметров без физического доступа.

8 Интерфейс администратора и API для интеграции в статьи, отчёты, CRM и ERP – готовые графики, CSV/JSON-экспорт, и готовые шаблоны отчетности для соответствия требованиям пищевой и фармацевтической отраслей.

Главная задача устройства – обеспечить непрерывную и надёжную видимость состояния холодильного оборудования в режиме реального времени, минимизировать время простоя и предотвратить потери продукции за счёт раннего обнаружения неисправностей и быстрого оповещения ответственных лиц. В практическом выражении это означает сокращение сроков реакции на аварии и инциденты, оптимизацию энергопотребления посредством детального анализа режимов работы оборудования [3] и предоставления рекомендаций по настройке для достижения максимальной эффективности, а также планирование технического обслуживания на основе реального износа оборудования, а не строго по календарному графику. Кроме того, устройство обеспечивает поддержку соответствия санитарным и регуляторным требованиям благодаря автоматической записи ключевых параметров и формированию хронологически подписываемых логов, что является важным для аудита и соблюдения нормативных требований. Для крупных сетей, таких как супермаркеты, логистические центры и фармацевтические склады, требующие непрерывного поддержания cold-chain, устройство предоставляет масштабируемую и гибкую платформу мониторинга с единым протоколом сбора данных и комплексной аналитикой. Это существенно упрощает управление парком холодильного оборудования, обеспечивая единый взгляд на состояние всех единиц оборудования и позволяя принимать обоснованные решения на основе данных.

В современных условиях эксплуатации холодильного оборудования, особенно в сферах пищевого производства, фармацевтики, логистики и распределённых торговых сетях, приоритетными становятся энергоэффективность, обеспечение контроля температурных режимов и минимизация влияния человеческого фактора. Разрабатываемое устройство отвечает этим вызовам благодаря своей автономной архитектуре и интеллектуальному анализу данных на периферии (edge-аналитике). Оно не просто передаёт телеметрические данные в облако, а непосредственно анализирует параметры на месте установки. Это особенно важно при нестабильной связи, территориальной разрозненности объектов и высоких требованиях к скорости реакции – критические события регистрируются и обрабатываются мгновенно без задержек на стороне сервера.

Важным преимуществом является адаптивный характер мониторинга. Устройство динамически изменяет частоту опроса датчиков и глубину анализа в зависимости от текущего

состояния системы: в стабильном режиме оно работает в энергосберегающем и трафико-оптимизированном формате, при обнаружении аномалий автоматически повышает детализацию сбора данных и формирует расширенную диагностическую картину. Такой подход позволяет одновременно снижать эксплуатационные расходы и повышать точность прогнозирования отказов. В условиях роста тарифов на электроэнергию и ужесточения нормативных требований к хранению продукции это дает ощутимый экономический эффект.

Оригинальность решения заключается в сочетании трех уровней интеллектуальности в одном автономном устройстве: контроль корректности самих датчиков (обнаружение деградации сенсоров), корреляционный анализ взаимосвязанных параметров холодильного цикла и встроенные предиктивные алгоритмы, ориентированные специально на холодильные процессы. Большинство существующих систем на рынке либо являются простыми регистраторами температуры, либо зависят от облачных вычислений для анализа. В данном случае аналитическое ядро реализовано на уровне устройства, что создает эффект «локального цифрового эксперта», способного формировать контекстные выводы без постоянной зависимости от внешней инфраструктуры.

Отсутствие прямых аналогов обусловлено комплексной концепцией: устройство разрабатывается не как датчик, не как универсальный промышленный контроллер и не как облачная платформа, а как специализированный интеллектуальный узел мониторинга холодильного оборудования с возможностью масштабирования в распределенную сеть. Уникальность достигается за счет модульности интерфейсов подключения, встроенной системы самодиагностики, гибридной аналитической модели и независимой автономной работы. Такая комбинация функционала формирует новый класс решений на стыке технологий Интернета вещей (IoT), предиктивной диагностики и отраслевой специализации, что делает устройство технологически оригинальным для современного этапа развития рынка.

Устройство проектируется с учётом простоты внедрения, что включает в себя настраиваемые профили подключения различных типов датчиков для сбора точных данных, гибкие режимы безопасности для защиты передаваемой информации, а также локальные графические интерфейсы пользователя (GUI) и LED-индикаторы для первичной диагностики и устранения неисправностей непосредственно на месте установки устройства. Кроме того, в комплекте поставки предусмотрены подробные инструкции по калибровке и проверке датчиков, что обеспечивает их точную и надежную работу на протяжении всего срока службы. В сети допускается групповая работа устройств, что позволяет осуществлять кластеризацию данных для формирования региональных сводок и более эффективного анализа информации. Ключевыми эксплуатационными требованиями к устройству являются точная синхронизация времени с использованием протоколов NTP или встроенных часов реального времени (RTC), резервирование каналов связи для обеспечения бесперебойной работы, надежная защита от несанкционированного доступа с помощью таких технологий, как безопасная загрузка (secure boot), протокол TLS и шифрование данных при передаче по протоколам REST и MQTT. Помимо этого, устройство должно быть способно функционировать в жестких температурных и вибрационных условиях, что делает его пригодным для использования в различных промышленных и сложных окружающих средах.

Разрабатываемое программно-управляемое устройство удалённого мониторинга холодильного оборудования представляет собой специализированное автономное решение нового поколения, ориентированное на интеллектуальный анализ параметров и повышение надёжности эксплуатации. Его архитектура объединяет модульный сбор данных от подключаемых датчиков, локальную edge-аналитику, систему самодиагностики и защищённую удалённую связь, что позволяет обеспечить непрерывный контроль состояния оборудования без постоянной зависимости от облачной инфраструктуры.

Практическая ценность устройства выражается в снижении рисков аварий, минимизации потерь продукции, оптимизации энергопотребления и переходе к предиктивному обслуживанию. Интеллектуальный анализ взаимосвязанных параметров холодильного цикла формирует качественно новый уровень мониторинга – от простой фиксации показателей к интерпретации и прогнозированию.

Заключение. Таким образом, предлагаемое решение формирует самостоятельный класс специализированных интеллектуальных устройств для холодильной отрасли, сочетая автономность, аналитическую глубину и отраслевую направленность. Это делает его перспективной платформой для цифровизации и модернизации систем холодоснабжения в современных условиях.

Список литературы

- 1 Баранов, А. В. Применение технологий Интернета вещей в системах промышленного мониторинга / А. В. Баранов, И. С. Кузнецов // Информационные технологии. – 2021. – № 7. – С. 15–22.
- 2 Громов, В. А. Edge-вычисления в распределённых системах сбора и обработки данных / В. А. Громов, П. Н. Сидоров // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2022. – № 5. – С. 3–11.
- 3 Чернышев, К. В. Методы повышения энергоэффективности холодильных установок на основе интеллектуального анализа параметров / К. В. Чернышев, А. С. Панов // Холодильная техника. – 2022. – № 3. – С. 34–40.
- 4 Кравченко, Д. И. Применение протоколов MQTT и Modbus в системах удалённого мониторинга оборудования / Д. И. Кравченко, О. Н. Матвеев // Электронные средства и системы управления. – 2020. – № 1. – С. 45–52.
- 5 Широков, П. А. Интеллектуальные системы технической диагностики и мониторинга: современные подходы и перспективы развития / П. А. Широков, В. Н. Григорьев // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2021. – Т. 64, № 9. – С. 731–740

UDC 62-529

SOFTWARE-CONTROLLED REMOTE MONITORING DEVICE FOR REFRIGERATING EQUIPMENT WITH INTELLIGENT PARAMETER ANALYSIS

Bobrovsky P.D.

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
Minsk, Republic of Belarus*

Kudina A. V. – Cand. of Sci, Associate Professor

Annotation. A software-controlled autonomous device for remote monitoring of refrigeration equipment is being developed. This device collects data from connected sensors, performs intelligent analysis at the edge computing level, detects system anomalies, and transmits information to improve the reliability and efficiency of refrigeration systems.

Keywords. Remote monitoring, refrigeration equipment, Internet of Things, IoT, edge computing, intelligent data analysis, predictive diagnostics, sensors, industrial monitoring, and automation.