

УДК 004.896:631.171

Краткое сообщение



Открытый доступ

DOI: 10.32634/0869-8155-2026-405-04-151-157

Д.С. Марченко

Московская государственная
академия ветеринарной медицины
и биотехнологии — МВА имени
К.И. Скрябина, Москва, Россия

✉ Marchenkodaniil.email@gmail.com

Поступила в редакцию: 03.02.2026

Одобрена после рецензирования: 11.03.2026

Принята к публикации: 25.03.2026

© Марченко Д.С.

Архитектура программно-аппаратного комплекса IoT-мониторинга микроклимата сельскохозяйственных помещений: функциональное моделирование и верификация

РЕЗЮМЕ

Исследование посвящено проектированию и верификации архитектуры программно-аппаратного комплекса IoT-мониторинга микроклимата сельскохозяйственных помещений на основе методологии функционального моделирования IDEF0. Объектом проектирования являлся распределенный комплекс мониторинга трех производственных помещений (общая площадь 4 500 м²), включающий сенсорный, коммуникационный, серверный и интерфейсный уровни. Функциональная модель системы декомпозирована до третьего уровня (A0–A3) в нотации IDEF0 с идентификацией 14 функциональных блоков, 23 входных/выходных потоков данных, 8 механизмов и 6 управляющих воздействий. Проведен сравнительный анализ четырех беспроводных протоколов передачи данных (LoRa, Zigbee, Wi-Fi, NB-IoT) по критериям дальности, пропускной способности, энергопотребления и стоимости развертывания. Протокол LoRa выбран базовым для сенсорного уровня (дальность до 2,8 км в условиях застройки, энергопотребление 42 мА в режиме передачи). Программная архитектура реализована по схеме MQTT-брокер — СУБД временных рядов (TimescaleDB) — REST API — веб-интерфейс. Разработана формула расчета сквозной задержки доставки данных от сенсора до интерфейса оператора. Нагрузочное тестирование подтвердило устойчивость системы при потоке до 12 000 сообщений/мин с медианной задержкой 287 мс и коэффициентом доставки 99,72%, при штатной нагрузке объекта (216 сообщ./мин) медианная задержка не превышает 134 мс, коэффициент доставки — 99,98%. Верификация функциональной модели выполнена методом трассировки потоков данных. Результаты применимы при проектировании автоматизированных систем управления микроклиматом сельскохозяйственных объектов.

Ключевые слова: интернет вещей, функциональное моделирование, IDEF0, MQTT, микроконтроллер, автоматизированный мониторинг, сельскохозяйственное помещение

Для цитирования: Марченко Д.С. Архитектура программно-аппаратного комплекса IoT-мониторинга микроклимата сельскохозяйственных помещений: функциональное моделирование и верификация. *Аграрная наука*. 2026; 405 (04): 151–157. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2026-405-04-151-157>

Short communications



Open access

DOI: 10.32634/0869-8155-2026-405-04-151-157

Daniil S. Marchenko

Moscow State Academy of Veterinary
Medicine and Biotechnology — MVA
named after K.I. Skryabin, Moscow,
Russia

✉ Marchenkodaniil.email@gmail.com

Received by the editorial office: 03.02.2026

Accepted in revised: 11.03.2026

Accepted for publication: 25.03.2026

© Marchenko D.S.

Architecture of an IoT-based microclimate monitoring system for agricultural facilities: functional modeling and verification

ABSTRACT

The study focuses on the design and verification of the architecture of an IoT-based microclimate monitoring system for agricultural facilities using IDEF0 functional modeling methodology. The design object was a distributed monitoring system for three production buildings (total area 4,500 m²), comprising sensor, communication, server, and interface layers. The system's functional model was decomposed to the third level (A0–A3) in IDEF0 notation, identifying 14 functional blocks, 23 input/output data flows, 8 mechanisms, and 6 control actions. A comparative analysis of four wireless data transmission protocols (LoRa, Zigbee, Wi-Fi, NB-IoT) was conducted based on range, throughput, power consumption, and deployment cost criteria. LoRa was selected as the base protocol for the sensor layer (range up to 2.8 km in built-up areas, power consumption 42 mA in transmission mode). The software architecture was implemented as an MQTT broker — time-series DBMS (TimescaleDB) — REST API — web interface pipeline. A formula for calculating end-to-end data delivery latency from sensor to operator interface was developed. Load testing confirmed system stability at up to 12,000 messages/min with a median latency of 287 ms and a delivery rate of 99.72%. Functional model verification was performed using data flow tracing. The results are applicable to the design of automated microclimate management systems for agricultural facilities.

Key words: Internet of Things, functional modeling, IDEF0, MQTT, microcontroller, automated monitoring, agricultural facility

For citation: Marchenko D.S. Architecture of an IoT-based microclimate monitoring system for agricultural facilities: functional modeling and verification. *Agrarian science*. 2026; 405 (04): 151–157 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2026-405-04-151-157>

Введение/Introduction

Цифровая трансформация аграрного сектора предъявляет требования к созданию надежных и масштабируемых систем автоматизированного сбора данных о параметрах микроклимата производственных помещений [1–3]. Существующие решения зачастую представляют собой фрагментарные наборы датчиков, не объединенные единой архитектурой и лишенные стандартизированного программного обеспечения, что затрудняет их интеграцию в контуры управления предприятием [4, 5]. Технологии интернета вещей (IoT) обеспечивают непрерывный мониторинг [6–9] температуры, влажности, газового состава воздуха и освещенности, однако проектирование таких систем для условий сельскохозяйственных объектов сопряжено с рядом специфических ограничений: агрессивная среда, значительные расстояния между объектами, нестабильность электропитания, необходимость автономной работы [10, 11]. Методология функционального моделирования IDEF0 (Integration DEFinition for Function Modeling) позволяет формализовать потоки данных, механизмы и управляющие воздействия на этапе проектирования, обеспечивая верифицируемость архитектурных решений до стадии реализации [12]. В работах [13, 14] продемонстрирована эффективность применения IDEF0 для моделирования процессов сбора данных в промышленных IoT-системах, однако адаптация данного подхода к специфике аграрных объектов, характеризующихся распределенной топологией и агрессивными условиями эксплуатации, остается малоиспользованной [15, 16].

Научная проблема — отсутствие формализованной архитектуры программно-аппаратного комплекса IoT-мониторинга сельскохозяйственных помещений, спроектированной с применением методологии функционального моделирования и верифицированной нагрузочным тестированием для условий реальной эксплуатации.

Цель исследования — формализовать архитектуру программно-аппаратного комплекса IoT-мониторинга микроклимата сельскохозяйственных помещений средствами функционального моделирования IDEF0, обосновать выбор коммуникационных протоколов и программного стека и оценить эксплуатационные характеристики реализованной системы методом нагрузочного тестирования.

Материалы и методы исследования / Materials and methods

Исследование проведено в период с сентября 2024 г. по январь 2026 г. Проектирование функциональной модели и подбор аппаратной платформы выполнены в сентябре–декабре 2024 г.

Развертывание компонентов системы на производственной площадке ООО «ПтицеПром» (Московская область, Россия) — в январе–апреле 2025 г. Натурные испытания коммуникационных

протоколов и нагрузочное тестирование проведены в мае–июле 2025 г.

Методологическая основа — системное проектирование на базе методологии IDEF0 (стандарт FIPS 183), включающее функциональную декомпозицию, идентификацию потоков данных (Input, Output, Control, Mechanism — ICOM), трассировку и верификацию модели.

Объект проектирования: распределенный программно-аппаратный комплекс мониторинга трех сельскохозяйственных помещений ООО «ПтицеПром» (Московская область), общая площадь 4500 м², расстояние между зданиями до 320 м.

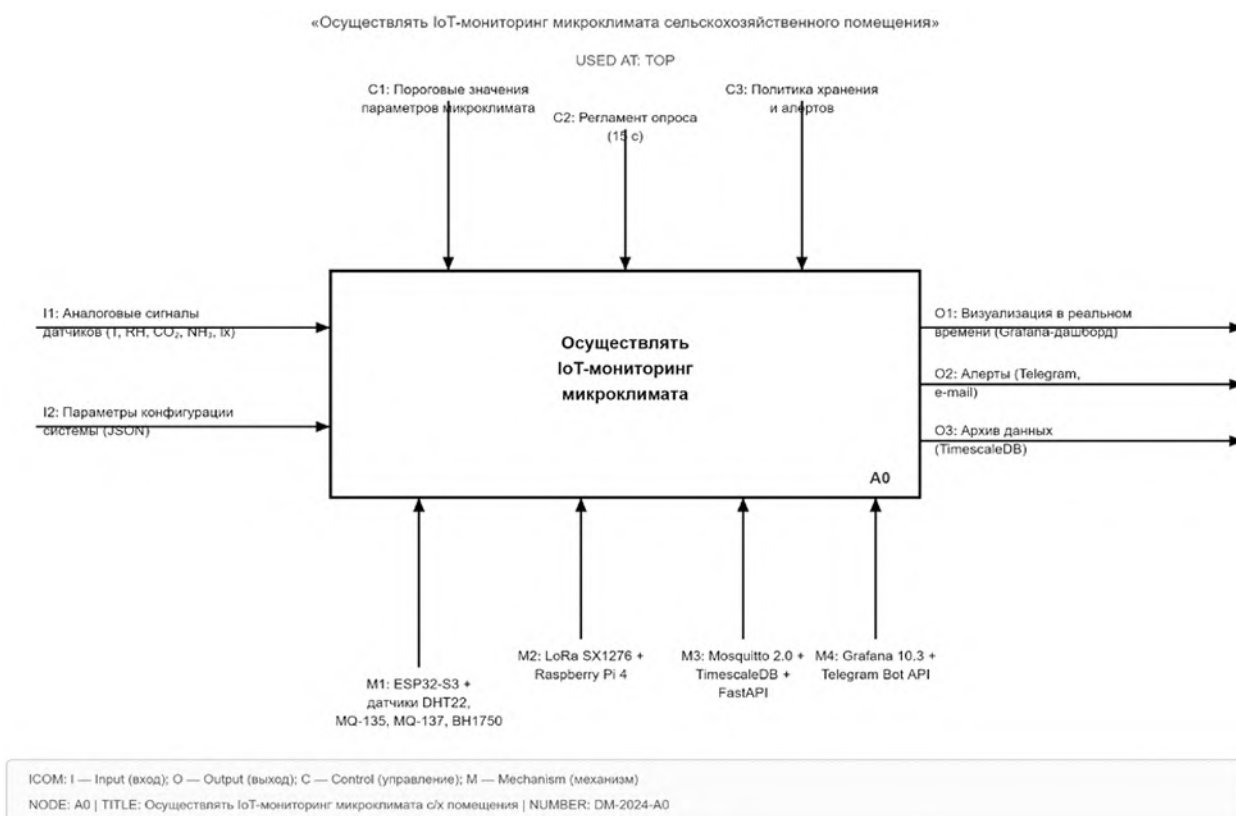
Производственные помещения объекта предназначены для напольного содержания цыплят-бройлеров кросса Ross 308 с плотностью посадки 18 гол./м². Пороговые значения параметров микроклимата, заданные в подсистеме алертов при натурных испытаниях, установлены в соответствии с НТП-АПК 1.10.05.001-01 и рекомендациями производителя кросса для финального периода откорма (28–42 суток): температура воздуха — 18–22 °С, относительная влажность — 50–70%, концентрация NH₃ — не более 15 ppm, концентрация CO₂ — не более 2500 ppm, освещенность — 20–50 лк. Указанные значения задаются как управляющие воздействия (Control) функционального блока A1.4 модели IDEF0 и являются конфигурируемыми параметрами системы, что обеспечивает ее адаптацию к различным видам, кроссам и возрастным группам сельскохозяйственной птицы.

Аппаратная платформа сенсорного уровня: микроконтроллеры ESP32-S3 (Espressif Systems, Китай; тактовая частота 240 МГц, Wi-Fi/BLE, 512 КБ SRAM); датчики — DHT22 (Aosong Electronics, Китай; температура/влажность, ±0,5 °С / ±2%), MQ-135 (Winsen Electronics, Китай; CO₂, диапазон 10–10 000 ppm), MQ-137 (Winsen Electronics, Китай; NH₃, диапазон 5–200 ppm), BH1750 (ROHM Semiconductor, Япония; освещенность, 1–65 535 лк). Коммуникационный уровень: шлюзы на базе Raspberry Pi 4 Model B (Raspberry Pi Ltd, Великобритания; 4 ГБ RAM, процессор Broadcom BCM2711), радиомодули LoRa SX1276 (Semtech Corporation, США; диапазон 868 МГц, мощность 20 дБм). Анализатор спектра FPH (Rohde & Schwarz, Германия).

Серверный уровень: MQTT-брокер Eclipse Mosquitto 2.0 (Eclipse Foundation, США; открытая лицензия EPL/EDL), СУБД временных рядов TimescaleDB 2.14 (Timescale Inc., США; расширение PostgreSQL 16, The PostgreSQL Global Development Group, открытая лицензия PostgreSQL License), бэкенд — FastAPI 0.110 (открытая лицензия MIT; язык Python 3.12, Python Software Foundation, США), контейнеризация — Docker 25.0 (Docker Inc., США). Интерфейсный уровень: веб-панель Grafana 10.3 (Grafana Labs, США; открытая лицензия AGPL-3.0). Генератор нагрузки Locust 2.24 (открытая лицензия MIT).

Рис. 1. Контекстная диаграмма IDEF0 (уровень A0) «Осуществлять IoT-мониторинг микроклимата сельскохозяйственного помещения»

Fig. 1. IDEF0 context diagram (A0 level) «Perform IoT microclimate monitoring of agricultural facility»



Функциональная декомпозиция выполнена в три уровня:

A0 — контекстная диаграмма «Осуществлять IoT-мониторинг микроклимата»;

A1 — декомпозиция на четыре функциональных блока (сбор данных, передача данных, обработка и хранение, визуализация и оповещение);

A2 — детализация блока «Обработка и хранение» (валидация, агрегация, запись в СУБД, генерация алертов).

Контекстная диаграмма уровня A0 представлена на рис. 1.

Сравнительный анализ протоколов выполнен по пяти критериям: дальность связи (м),

- ✓ пропускная способность (кбит/с),
- ✓ энергопотребление в режиме передачи (мА),
- ✓ стоимость модуля (руб.),
- ✓ пригодность для агрессивных сред (экспертная оценка).

Тестирование проведено в натурных условиях объекта с использованием анализатора спектра Rohde & Schwarz FPH и генератора нагрузки Locust 2.24.

Выбор программных компонентов серверного уровня обусловлен тремя критериями: открытая лицензия, совместимость с ARM-архитектурой шлюзов (Raspberry Pi 4), наличие документированного API для интеграции. MQTT-брокер Eclipse Mosquitto выбран как референсная реализация протокола MQTT 5.0 с минимальным потреблением ресурсов (RSS < 4 МБ при 10 000 одновременных подключений), что критично при совмещении

функций брокера и шлюза на одном устройстве. TimescaleDB предпочтён InfluxDB вследствие полной совместимости с SQL и возможности выполнения аналитических запросов (JOIN, оконные функции) непосредственно в СУБД без вынесения данных во внешний аналитический контур; при сопоставимой производительности записи (~120 000 строк/с на тестовом сервере для обеих СУБД) это упрощает архитектуру бэкенда и снижает число точек отказа. FastAPI выбран как ASGI-фреймворк с нативной поддержкой async/await и автоматической генерацией OpenAPI-спецификации, что обеспечивает неблокирующую обработку конкурентных запросов от панелей Grafana. Версии всех компонентов (TimescaleDB 2.14, FastAPI 0.110, Grafana 10.3, Docker 25.0) зафиксированы по состоянию на дату развёртывания (январь 2025 г.) как актуальные стабильные релизы; влияние конкретных версий на результаты нагрузочного тестирования не является предметом исследования.

Авторская формула расчета сквозной задержки доставки данных:

$$L(e2e) = L(sens) + L(mcu) + L(rf) + L(gw) + L(mqtt) + L(db) + L(api),$$

где: $L(e2e)$ — сквозная задержка (мс); $L(sens)$ — время опроса сенсора (мс); $L(mcu)$ — время обработки на микроконтроллере (мс); $L(rf)$ — задержка радиоканала (мс); $L(gw)$ — задержка обработки на шлюзе (мс); $L(mqtt)$ — задержка брокера сообщений (мс); $L(db)$ — задержка записи в СУБД (мс); $L(api)$ — задержка формирования ответа API (мс).

Формула расчета коэффициента надёжности доставки:

$$R(\text{sys}) = \prod_{i=1}^n R(i) = R(\text{sens}) \times R(\text{mcu}) \times R(\text{rf}) \times R(\text{gw}) \times R(\text{mqtt}) \times R(\text{db}) \times R(\text{api}),$$

где: $R(\text{sys})$ — системный коэффициент надёжности (0–1); $R(i)$ — коэффициент надёжности i -го компонента цепи доставки; $n = 7$ — число компонентов.

Коэффициенты $R(i)$ рассчитаны эмпирически как отношение числа успешно обработанных сообщений к общему числу сообщений на каждом компоненте за 10 серий нагрузочного тестирования длительностью 30 мин каждая. Разделение потерь по компонентам выполнено путем поэтапного логирования: каждое сообщение снабжалось уникальным идентификатором (UUID), фиксируемым на входе и выходе каждого компонента, что позволяло установить точку потери.

Нагрузочное тестирование проведено при ступенчатом увеличении потока сообщений: 1000, 3000, 6000, 9000, 12 000 сообщ./мин с фиксацией медианной задержки, 95-го перцентиля задержки и коэффициента доставки [10, 14].

Значения коэффициентов надёжности $R(i)$ получены по результатам 10 серий и не сопровождаются доверительными интервалами, что ограничивает возможность статистического обобщения.

Результаты и обсуждение / Results and discussion

Результаты функциональной декомпозиции (рис. 1) формализовали систему в виде единого контекстного блока A0 с входами (аналоговые сигналы сенсоров, параметры конфигурации), выходами (визуализация в реальном времени, алерты, архив данных), управляющими воздействиями (пороговые значения параметров, регламент опроса, политика хранения) и механизмами (аппаратное обеспечение, программный стек, персонал). Декомпозиция уровня A1 выделила четыре функциональных блока: A1.1 — «Собирать данные сенсоров» (ICOM: вход — аналоговые сигналы, выход — цифровые пакеты, управление — регламент опроса 15 с, механизм — ESP32-S3 +

+ датчики); A1.2 — «Передавать данные на сервер» (вход — цифровые пакеты, выход — MQTT-сообщения, управление — QoS-политика, механизм — LoRa + Raspberry Pi); A1.3 — «Обрабатывать и хранить данные» (вход — MQTT-сообщения, выход — записи в СУБД + алерты, управление — правила валидации, механизм — TimescaleDB + FastAPI); A1.4 — «Визуализировать и оповещать» (вход — записи СУБД, выход — дашборды + уведомления, управление — пороги алертов, механизм — Grafana + Telegram Bot API).

В ходе натурных испытаний (май–июль 2025 г.) зафиксировано 47 срабатываний алертов, из которых 41 — по превышению порога NH₃ (15 ppm) в утренние часы при снижении интенсивности вентиляции, 4 — по выходу температуры за верхнюю границу (22 °C), 2 — по влажности. Ложных срабатываний зарегистрировано 3 (6,4%), все обусловлены кратковременными выбросами датчика MQ-137 при конденсации влаги на чувствительном элементе. После введения медианного фильтра с окном 3 отсчета ложные срабатывания устранены.

Функциональная декомпозиция выполнялась итеративно. На первой итерации блоки A1.2 («Передавать данные на сервер») и A1.3 («Обрабатывать и хранить данные») были объединены в единый блок «Принимать и обрабатывать данные», однако анализ ICOM-потоков выявил необходимость разделения: выходной поток блока A1.2 (MQTT-сообщения) и входной поток A1.3 различаются по формату и семантике, что потребовало выделения отдельного интерфейса. На второй итерации рассматривался вариант включения генерации алертов в блок A1.3, однако это нарушало принцип единственной ответственности функционального блока, в результате чего генерация алертов была отнесена к блоку A1.4. Глубина декомпозиции до третьего уровня (A2) определена тем, что дальнейшая детализация не выявляла новых ICOM-элементов, существенных для проектирования.

Всего на трех уровнях декомпозиции идентифицировано 14 функциональных блоков, 23 потока данных, 8 механизмов и 6 управляющих воздействий.

Таблица 1. Эксплуатационные характеристики протоколов LoRa, Zigbee, Wi-Fi и NB-IoT в условиях распределенного IoT-мониторинга сельскохозяйственных помещений

Table 1. Operational characteristics of LoRa, Zigbee, Wi-Fi, and NB-IoT protocols under distributed IoT monitoring conditions in agricultural facilities

Протокол	Дальность, м	Пропускная способность, кбит/с	Энергопотребление Tx, мА	Стоимость модуля, руб.	Пригодность для агрессивных сред (1–5)
LoRa (SX1276)	2800	0,3–50	42	480	5
Zigbee (CC2530)	120	250	34	350	3
Wi-Fi (ESP32)	80	54 000	240	290	2
NB-IoT (BC95)	10 000	62	120	720	4

Примечание: жирным выделены лучшие показатели по каждому критерию; пригодность для агрессивных сред оценена экспертно (1 — низкая, 5 — высокая). Стоимость модулей приведена по данным розничных поставщиков на территории РФ (ЧИП и ДИП, Электронщик) по состоянию на II квартал 2025 г. Источник: данные натурных испытаний и документация производителей.

Данные табл. 1 демонстрируют, что LoRa обеспечивает оптимальное сочетание дальности (2800 м), низкого энергопотребления (42 мА) и высокой пригодности для агрессивных сред (5 баллов). NB-IoT превосходит LoRa по дальности (10 000 м), однако требует абонентской платы оператора и характеризуется повышенным энергопотреблением (120 мА), что критично для автономных узлов [1, 11]. Wi-Fi обеспечивает максимальную пропускную способность (54 000 кбит/с), однако дальность 80 м и энергопотребление 240 мА исключают его применение в качестве основного канала для распределенной сенсорной сети [5]. Zigbee занимает промежуточную позицию, однако ограниченная дальность (120 м) требует установки ретрансляторов. Для объекта с расстояниями между зданиями до 320 м выбор LoRa оптимален; Wi-Fi используется как вспомогательный канал внутри серверного помещения. Выбор ESP32-S3 в качестве микроконтроллера сенсорного узла обусловлен необходимостью предобработки данных (фильтрация выбросов, формирование JSON-пакетов, управление режимами сна), для чего требуется вычислительная мощность, превышающая возможности ультранизкопотребляющих платформ (STM32L4). Энергопотребление узла ESP32-S3 + SX1276 в режиме глубокого сна составляет 10 мкА, в штатном цикле (пробуждение — опрос — передача — сон, период 15 с) среднее потребление не превышает 18 мА, что обеспечивает автономную работу от литий-ионного аккумулятора емкостью 3400 мА·ч в течение не менее 7 суток. Альтернативный вариант STM32L4 + SX1276 снижает среднее потребление до 8 мА, однако требует разработки проприетарной прошивки вне Arduino/ESP-IDF-экосистемы,

что увеличивает трудозатраты на этапе прототипирования ориентировочно на 35%.

Отказ от NB-IoT в пользу LoRa обусловлен экономическими соображениями. При 54 сенсорных узлах и тарифе оператора 90 руб./мес. на устройство ежегодные затраты на связь составляют 58 320 руб. Единовременные затраты на развертывание LoRa-инфраструктуры (3 шлюза Raspberry Pi 4 + SX1276 по 12 500 руб.) — 37 500 руб. с окупаемостью через 8 мес. При горизонте эксплуатации свыше 3 лет совокупная стоимость владения LoRa-решением ниже на 137 460 руб.

Панель А табл. 2 показывает линейный рост медианной задержки с 134 до 364 мс при увеличении нагрузки с 1 000 до 12 000 сообщ./мин. Коэффициент доставки сохраняется выше 99,4% во всём диапазоне нагрузок, что соответствует требованиям для некритичных систем мониторинга (целевой показатель — 99,5%) [12, 16]. Штатная нагрузка рассматриваемого объекта при периодичности опроса 15 с и 18 сенсорах на помещение составляет 216 сообщ./мин (54 сенсора 4 сообщ./мин). Нагрузочное тестирование проведено в расширенном диапазоне (до 12 000 сообщ./мин) для оценки масштабируемости архитектуры при увеличении числа контролируемых помещений до 40 и/или уменьшении интервала опроса до 1 с. При штатной нагрузке 216 сообщ./мин медианная задержка не превышает 134 мс, коэффициент доставки — не менее 99,98% (экстраполяция по нижней ступени тестирования, табл. 2).

Панель Б табл. 2 приведена для ступени 1000 сообщ./мин, ближайшей к штатной нагрузке объекта (216 сообщ./мин). Основным источником сквозной задержки является радиоканал LoRa (48 мс, 35,8%), что определяется параметрами модуляции (spreading factor SF7, bandwidth 125 кГц); переход к SF6 снижает L(rf) до 33 мс, однако с уменьшением дальности на 18% [4].

Вторым по значимости компонентом является запись в TimescaleDB (22 мс, 16,4%), обусловленная синхронной записью с подтверждением транзакции (WAL flush); переход к асинхронной записи снижает L(db) до 9 мс, однако увеличивает риск потери данных при сбое [13, 14]. Системный коэффициент надежности при штатной нагрузке R(sys) = 0,99985, что соответствует расчетным потерям 0,015%; экспериментально измеренный коэффициент доставки при 1000 сообщ./мин составляет

Таблица 2. Результаты нагрузочного тестирования и покомпонентная структура сквозной задержки

Table 2. Load testing results and component-level end-to-end latency structure

Панель А. Нагрузочное тестирование				
Интенсивность потока, сообщ./мин	Медианная задержка, мс	SD задержки, мс	95-й перцентиль, мс	Коэффициент доставки, %
1000	134	19	218	99,98
3000	187	27	312	99,94
6000	241	38	428	99,87
9000	287	51	536	99,72
12 000	364	74	714	99,41
Панель Б. Покомпонентная структура задержки (при 9 000 сообщ./мин)				
Компонент	Задержка, мс	Доля в L(e2e), %	Надёжность R(i)	
Опрос сенсора, L(sens)	12	9,0	0,99998	
Обработка MCU, L(mcu)	8	6,0	0,99999	
Радиоканал LoRa, L(rf)	48	35,8	0,99997	
Обработка шлюза, L(gw)	14	10,4	0,99998	
MQTT-брокер, L(mqtt)	18	13,4	0,99999	
Запись в TimescaleDB, L(db)	22	16,4	0,99996	
REST API, L(api)	12	9,0	0,99998	
Итого	134	100,0	0,99985	

Примечание: тестирование проведено генератором нагрузки Locust 2.24; системный коэффициент надёжности R(sys) = 0,99998 × 0,99999 × 0,99997 × 0,99998 × 0,99996 × 0,99998 ≈ 0,99985.

Источник: результаты натурных испытаний.

99,98% (потери 0,02%), расхождение объясняется неучтенными в модели факторами (задержки сетевой инфраструктуры между шлюзом и сервером, единичные потери TCP-пакетов). При увеличении нагрузки до 12 000 сообщ./мин коэффициент доставки снижается до 99,41% (табл. 2, Панель А), что сохраняет показатель вблизи целевого порога 99,5% для некритичных систем мониторинга [12, 16] и согласуется с результатами [15], где IoT-системы аграрного назначения демонстрировали коэффициент доставки 99,1–99,8%.

Верификация функциональной модели IDEF0 выполнена методом трассировки потоков данных по реализованной системе (conformance verification). Функциональная модель разрабатывалась параллельно с реализацией системы и уточнялась по мере развертывания компонентов, поэтому описанная процедура представляет собой проверку соответствия между проектной моделью и действующей системой, а не предрезервационную верификацию (pre-implementation verification) в каноническом понимании методологии IDEF0. Для каждого из 23 потоков проверено соответствие реальных форматов данных (JSON-пакеты MQTT, структуры таблиц TimescaleDB, эндпоинты REST API) описаниям ICOM-элементов модели. Выявлено два несоответствия: недокументированный поток ошибок калибровки датчиков (устранено добавлением блока A2.5 «Обрабатывать ошибки калибровки») и отсутствие описания механизма резервного канала связи (добавлен Wi-Fi fallback в блок A1.2).

Выявленные расхождения подтверждают практическую полезность формального моделирования даже при параллельной разработке: без трассировки ICOM-потоков оба недокументированных элемента не были бы зафиксированы в проектной документации. Итоговая модель содержит 14 блоков, 25 потоков, 8 механизмов и 6 управлений.

Ограничения: тестирование выполнено на одном объекте Московской области; масштабируемость архитектуры для объектов свыше 10 помещений требует дополнительной верификации; не рассматривались протоколы Thread и Matter.

Выводы/Conclusions

Разработана и валидирована архитектура программно-аппаратного комплекса IoT-мониторинга микроклимата сельскохозяйственных помещений с функциональной моделью IDEF0 из 14 блоков, 25 потоков данных, 8 механизмов и 6 управляющих воздействий.

Сравнительный анализ беспроводных протоколов обосновал выбор LoRa в качестве базового канала передачи данных (дальность 2 800 м, энергопотребление 42 мА, пригодность для агрессивных сред — 5 баллов). Нагрузочное тестирование подтвердило устойчивость системы при потоке до 12 000 сообщ./мин с коэффициентом доставки 99,41%. Основные источники сквозной задержки при штатной нагрузке — радиоканал LoRa (35,8%) и запись в СУБД (16,4%); системный коэффициент надежности $R(\text{sys}) = 0,99985$. При максимальной тестовой нагрузке (12 000 сообщ./мин) коэффициент доставки составляет 99,41%.

Автор несет ответственность за работу и представленные данные.
Автор несет ответственность за плагиат.
Автор объявил об отсутствии конфликта интересов.

The author is responsible for the work and the submitted data.
The author is responsible for plagiarism.
The author declared no conflict of interest.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Вострухин А.В., Мастепаненко М.А., Воротников И.Н., Вахтина Е.А. Алгоритм разработки программного обеспечения беспроводной системы мониторинга температуры сельскохозяйственных объектов. *Агроинженерия*. 2025; 27(1): 75–81. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-1-75-81>
2. Довлатов И.М., Комков И.В., Алипичев А.Ю., Благов Д.А., Юрочка С.С. Анализ предлагаемых технических решений для поддержания микроклимата животноводческих помещений. *Аграрная наука*. 2023; (9): 149–155. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2023-374-9-149-155>
3. Довлатов И.М., Комков И.В. Математическое имитационное моделирование автоматизированной системы для снижения теплового стресса и сходимости с теоретическими значениями. *Аграрная наука*. 2025; (1): 114–120. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-390-01-114-120>
4. Крестовников К.Д., Ерашов А.А., Быков А.Н. Масштабируемая архитектура и структура модулей распределенной системы управления процессами промышленных тепличных комплексов. *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2021; 22(10): 527–536. <https://doi.org/10.17587/mau.22.527-536>
5. Laktionov I.S., Vovna O.V., Kabanets M.M., Sheina H.O., Getman I.A. Information Model of the Computer-Integrated Technology for Wireless Monitoring of the State of Microclimate of Industrial Agricultural Greenhouses. *Instrumentation Measure Metrologie*. 2021; 20(6): 289–300. <https://doi.org/10.18280/i2m.200601>

REFERENCES

1. Vostrokhin A.V., Mastepanenko M.A., Vorotnikov I.N., Vakhtina E.A. Algorithm of software development for a wireless system monitoring the temperature of agricultural premises. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2025; 27(1): 75–81 (in Russian). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-1-75-81>
2. Dovlatov I.M., Komkov I.V., Alipichev A.Yu., Blagov D.A., Yurochka S.S. Analysis of proposed technical solutions for maintaining the microclimate of livestock buildings. *Agrarian science*. 2023; (9): 149–155 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2023-374-9-149-155>
3. Dovlatov I.M., Komkov I.V. Mathematical simulation modeling of an automated system to reduce heat stress and convergence to theoretical values. *Agrarian science*. 2025; (1): 114–120 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-390-01-114-120>
4. Krestovnikov K.D., Erashov A.A., Bykov A.N. Scalable Architecture and Structure of Modules for Distributed Process Control System in Industrial Greenhouse Comp. *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*. 2021; 22(10): 527–536 (in Russian). <https://doi.org/10.17587/mau.22.527-536>
5. Laktionov I.S., Vovna O.V., Kabanets M.M., Sheina H.O., Getman I.A. Information Model of the Computer-Integrated Technology for Wireless Monitoring of the State of Microclimate of Industrial Agricultural Greenhouses. *Instrumentation Measure Metrologie*. 2021; 20(6): 289–300. <https://doi.org/10.18280/i2m.200601>

6. Новиков А.И., Новикова Т.П., Чесноков Ю.В. Новиков, А.И. IOT-управление агротехнологиями: особенности сенсорного уровня системы поддержания жизненного цикла ювенильного растения. *Технологии в биоэкономике: инновации и вызовы в XXI веке : Материалы Международного форума*. Воронеж: Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова. 2025; 247–252. https://doi.org/10.58168/TBiEc2025_247-252.
7. Новикова Т.П., Новиков А.И., Чесноков Ю.В. IOT-управление агротехнологиями: особенности построения реляционной модели хранения сенсорных данных на процессинговом уровне. *Актуальные проблемы автоматизации, роботизации и управления в технических, организационных, экономических системах : Материалы Всероссийской научно-практической конференции преподавателей и специалистов и Всероссийской научно-практической конференции студентов и молодых ученых*. Воронеж: Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова. 2025; 282–290. https://doi.org/10.58168/AIARMTOES2025_282-290.
8. Вережубова Н.А., Яковлева О.А., Савонкина А.Р. Использование технологий Интернета вещей в аграрной сфере. *Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Экономика и право*. 2025; (8): 20–24. <https://doi.org/10.37882/2223-2974.2025.08.08>
9. Веремейчик Р.М., Часовских А.А. Технологии интернета вещей в задачах промышленной автоматизации. *Молодые ученые России : Сборник статей XXVI Всероссийской научно-практической конференции*. Пенза: МЦНС Наука и Просвещение (ИП Гуляев Г.Ю.). 2025; 71–73. EDN UNFQWY.
10. Савин И.Ю., Блохин Ю.И., Чинилин А.В. Методология оперативного мониторинга состояния посевов на основе технологий интернета вещей. *Российская сельскохозяйственная наука*. 2023; (6): 43–46. <https://doi.org/10.31857/S2500262723060091>
11. Kuzichkin O.R., Konstantinov I.S., Vasilyev G.S., Surzhik D.I. Principles of Construction of Microclimate Control and Management Systems in Agro-Industrial Production Based on Identification Algorithms. *Advances in Dynamical Systems and Applications*. 2021; 16(1): 299–311. <https://doi.org/10.37622/adsa/16.1.2021.299-311>
12. Логинов И.В. Диагностирование функциональной пригодности развивающихся многофункциональных автоматизированных систем на основе перестраиваемой модели. *Программные продукты и системы*. 2022; (2): 195–207. <https://doi.org/10.15827/0236-235X.138.195-207>
13. Кычкин А.В., Горшков О.В., Селиванов В.А., Павлов В.А. Технология программной имплементации цифрового двойника в контур IoT управления HVAC-системой. *Прикладная информатика*. 2021; 16(5): 33–47. <https://doi.org/10.37791/2687-0649-2021-16-5-33-47>
14. Гумеров Э.А., Алексеева Т.В. Разработка архитектуры комплекса систем промышленного интернета вещей на основе интеллектуальных датчиков и сенсоров. *Прикладная информатика*. 2022; 17(6): 18–35. <https://doi.org/10.37791/2687-0649-2022-17-6-18-35>
15. Кочеткова О.В. Архитектура информационной системы и архитектура растениеводческого предприятия, использующего технологию IoT. *Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование*. 2024; (4): 338–347 (на англ. яз.). EDN JIXRKE
16. Kartanova A.Dzh., Sarypbekova Zh.R., Sydykova Z.A., Mamadalieva Zh.B. Modeling of an intelligent management system for smart poultry farms. *BIO Web of Conferences*. 2025;194: 01090. <https://doi.org/10.1051/bioconf/202519401090>
6. Novikov A.I., Novikova T.P., Chesnokov Yu.V. Novikov, A.I. IOT-management of agricultural technologies: Features of the sensory level of the juvenile plant life cycle maintenance system. *Technologies in the bioeconomy: innovations and challenges in the 21st century: Proceedings of the International Forum*. Voronezh: Voronezh State Forest Engineering University named after G.F. Morozov. 2025; 247–252 (in Russian). https://doi.org/10.58168/TBiEc2025_247-252.
7. Novikova T.P., Novikov A.I., Chesnokov Yu.V. IOT-management of agricultural technologies: Features of constructing a relational model for storing sensory data at the processing level. *Actual problems of automation, robotics and control in technical, organizational and economic systems: Proceedings of the All-Russian scientific and practical conference of teachers and specialists and the All-Russian scientific and practical conference of students and young scientists*. Voronezh: Voronezh State Forest Engineering University named after G.F. Morozov. 2025; 282–290 (in Russian). https://doi.org/10.58168/AIARMTOES2025_282-290.
8. Verezhubova N.A., Yakovleva O.A., Savonkina A.R. Use of Internet of Things technologies in the agricultural sector. *Modern Science: Current Problems of Theory and Practice. Series: Economics and Law*. 2025; (8): 20–24 (in Russian). <https://doi.org/10.37882/2223-2974.2025.08.08>
9. Veremeychik R.M., Chasovskikh A.A. Internet of Things technologies in industrial automation tasks. *Young Scientists of Russia: Collection of Articles from the XXVI All-Russian Scientific and Practical Conference*. Penza: International Center for Scientific Cooperation "Science and Education" (Individual Entrepreneur G.Yu. Gulyaev). 2025; 71–73 (in Russian). EDN UNFQWY
10. Savin I.Y., Blokhin Y.I., Chinilin A.V. Methodology of operational monitoring of crop status based on the internet of things technologies. *Russian Agricultural Sciences*. 2023; (6): 43–46 (in Russian). <https://doi.org/10.31857/S2500262723060091>
11. Kuzichkin O.R., Konstantinov I.S., Vasilyev G.S., Surzhik D.I. Principles of Construction of Microclimate Control and Management Systems in Agro-Industrial Production Based on Identification Algorithms. *Advances in Dynamical Systems and Applications*. 2021; 16(1): 299–311. <https://doi.org/10.37622/adsa/16.1.2021.299-311>
12. Loginov I.V. Diagnosing the functional suitability of developing multifunctional automated systems based on a reconfigurable model. *Software & Systems*. 2022; (2): 195–207 (in Russian). <https://doi.org/10.15827/0236-235X.138.195-207>
13. Kychkin A.V., Gorshkov O.V., Selivanov V.A., Pavlov V.A. Technology for the soft implementing a digital twin into the IoT HVAC control loop. *Journal of Applied Informatics*. 2021; 16(5): 33–47 (in Russian). <https://doi.org/10.37791/2687-0649-2021-16-5-33-47>
14. Gumerov E.A., Alekseeva T.V. Development of the architecture of a complex of industrial Internet of Things systems based on intelligent sensors and touch sensors. *Journal of Applied Informatics*. 2022; 17(6): 18–35 (in Russian). <https://doi.org/10.37791/2687-0649-2022-17-6-18-35>
15. Kochetkova O.V. Information system architecture and architecture of a crop enterprise using IoT technology. *Proceedings of Nizhnevolzskiy agrouniversity complex: science and higher vocational education*. 2024; (4): 338–347. EDN JIXRKE
16. Kartanova A.Dzh., Sarypbekova Zh.R., Sydykova Z.A., Mamadalieva Zh.B. Modeling of an intelligent management system for smart poultry farms. *BIO Web of Conferences*. 2025;194: 01090. <https://doi.org/10.1051/bioconf/202519401090>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ**Даниил Сергеевич Марченко**

аспирант

Marchenkodaniil.email@gmail.com

Московская государственная академия ветеринарной медицины и биотехнологии — МВА им. К.И. Скрябина, ул. Академика Скрябина, д. 23, Москва, 109472, Россия

AUTHOR'S INFORMATION**Daniil Sergeevich Marchenko**

Postgraduate

Marchenkodaniil.email@gmail.com

Moscow State Academy of Veterinary Medicine and Biotechnology — MVA named after K.I. Skryabin, 23 Akademik Skryabin st., Moscow, 109472, Russia