

Т.А. Деменкова, А.И. Александров

Московский технологический университет (МИРЭА), Москва, Россия

АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС МОНИТОРИНГА МЕТЕОУСЛОВИЙ В СИСТЕМАХ УМНОГО ДОМА

Рассматривается методика разработки аппаратно-программного комплекса мониторинга метеоусловий и его алгоритмического обеспечения с целью применения в системах активного дома. Актуальность исследуемой предметной области обусловлена устойчивой тенденцией к автоматизации этапов сбора и анализа информации для оптимизации решения многих задач и процессов, а также исчерпанием запасов невозобновляемых энергоносителей. Суть исследования заключается в разработке принципов построения средств сбора и первичного анализа информации на основе технологий умного дома и Интернета вещей с целью создания беспроводных модулей мониторинга метеоусловий для использования в системах активного дома. В работе проведен анализ существующих аналогов системы, выявлены их преимущества и недостатки и на их основании определены основные требования к комплексу. Предложены также алгоритмы, разработаны структурные схемы и программы управления работой, обеспечивающие высокие показатели по надежности, энергопотреблению и качественно отличающие систему от аналогов. Выполнена количественная оценка надежности, потребляемой мощности и ресурсов микроконтроллера, а также времени работы автономного функционирования внешнего модуля метеостанции. Отличительная особенность работы заключается в создании нового решения структуры и алгоритмического обеспечения комплекса мониторинга метеоусловий на основе современных технологий умного дома и Интернета вещей, которые создают предпосылки для дальнейшего развития подобных систем.

Ключевые слова: технологии умного дома, Интернет вещей, автоматизированная система управления зданием, модульная метеостанция, энергосбережение, активный дом.

Для цитирования: Деменкова Т. А., Александров А. И. Аппаратно-программный комплекс мониторинга метеоусловий в системах умного дома // Радиопромышленность. 2018. № 2. С. 80–89.

T.A. Demenkova, A.I. Alexandrov

Moscow Technological University (MIREA), Moscow, Russia

HARDWARE AND SOFTWARE COMPLEX FOR WEATHER CONDITIONS MONITORING IN SMART HOME SYSTEMS

The paper is dedicated to methodology for development of weather monitoring firmware and its algorithmic support for implementation in active house systems. The high relevance of the studied subject area is explained by the steady trend for information collection and analysis processes automation for the purpose of optimizing solutions of multiple tasks and processes, also taking into account the depletion of non-renewable energy resources. The substance of the research is development of principles for building tools for collection and initial analysis of information based upon smart house technologies and the Internet of Things in order to develop wireless weather monitoring modules for use in the active house system. The paper analyses existing comparable systems, their advantages and disadvantages, and based the analysis the key requirements to the firmware have been defined. Appropriate algorithms have been proposed and schematic diagrams and operation control programs have been developed to secure high performance parameters for reliability and energy consumption and to make the system qualitatively different from comparable systems. Quantitative computations of reliability, power consumption, microcontroller useful life and autonomous operation time for the weather station external module have been performed. The paper is featured by a new solution developed for the structure and by the algorithmic support of the weather monitoring system based upon the smart home and Internet of Things advanced technologies creating the necessary conditions for further development of such systems.

Keywords: smart home technologies, Internet of Things, automated building management system, modular weather station, energy saving, active house.

For citation: Demenkova T. A., Alexandrov A. I. Hardware and software complex for weather conditions monitoring in smart home systems. Radiopromyshlennost, 2018, no. 2, pp. 80–89. (In Russian).

DOI 10.21778/2413-9599-2018-2-80-89

Введение

Строения класса активного дома являются комплексами автоматизированных систем управления зданием (АСУЗ) – технологичными, взаимосвязанными системами множества устройств, осуществляющих мониторинг и учет потребляемой тепловой и электрической энергии, метеоконтроль, опрос датчиков охранной системы, контроль систем водопровода и газоснабжения, а также многое другое [1]. Одним из ключевых узлов АСУЗ является модульная метеостанция, показания которой необходимы для поддержания в помещении заданного климата и оптимизации энергопотребления активного дома [2]. Анализ состояния рынка показал, что на данный момент для решения поставленной задачи существует лишь несколько устройств, способных предоставить необходимый функционал. Данное обстоятельство создает предпосылки для активной разработки и более широкого внедрения технологий, устройств и алгоритмов управления, позволяющих более эффективно распоряжаться имеющейся тепловой и электрической энергией.

Современные метеостанции представляют собой миниатюрные устройства, иногда снабженные выносными проводными или беспроводными модулями, способными с определенной точностью измерить все необходимые параметры метеоусловий. Обязательные требования к моделям метеостанций для систем активного дома [3]:

- возможность интеграции в инфраструктуру системы;
- использование беспроводных технологий передачи данных;
- модульная структура, построение согласно концепции Интернета вещей (Internet of Things, IoT) и масштабируемость системы;
- низкое энергопотребление.

Согласно представленным требованиям были отобраны следующие модели: Xiaomi Smart Home Kit, Oregon Scientific LW302 и Qubino Weather Station. Подробный анализ функциональных возможностей данных моделей позволил выявить их преимущества и недостатки:

Xiaomi Smart Home Kit. В качестве решения для осуществления метеоконтроля Xiaomi предлагает модуль Mi Smart Temperature and Humidity Sensor – миниатюрный датчик температуры и влажности,

обладающий следующими характеристиками: измерение температуры от –20 до 60 °С с точностью 0,3 °С; измерение влажности от 0 до 100% с точностью 3%; питание от литиевой батареи CR2032.

Достоинствами данного модуля являются его малый размер, высокая точность измерений, низкое энергопотребление и стоимость, использование протокола ZigBee, а также возможность интеграции в системы активного дома.

Среди недостатков модуля – отсутствие барометра и средств визуализации информации, а также невозможность его автономной работы, для функционирования ему необходимо постоянное соединение с центральным шлюзом системы.

Oregon Scientific LW302. Это модульная метеостанция, состоящая из трех частей, которые образуют единую радиосеть на частоте 433,92 МГц с топологией «звезда». Все считанные данные поступают в облачное хранилище и отображаются в персональном аккаунте или в мобильном приложении.

Достоинствами метеостанции являются модульная структура, возможность прогнозирования погоды, низкое энергопотребление, высокая точность показаний, а также отправка данных в Интернет.

Недостатки – отсутствие средств визуализации информации, плохие возможности для масштабируемости и интеграции в системы активного дома, высокая стоимость, а также зависимость заряда элементов питания внешнего модуля от колебаний температуры.

Qubino Weather Station. Представляет собой высококачественную метеостанцию, использующую для передачи данных протокол Z-Wave. Комплект состоит из двух термогигрометров, анемометра и датчика дождя, которые по радиоканалу на частоте 433 МГц передают данные на контроллер Z-Wave, образующий mesh-сеть. Одновременно с этим контроллер Z-Wave является ретранслятором сигнала, что повышает покрытие сети.

Преимуществами данного устройства являются использование современного протокола Z-Wave для построения распределенных, самоорганизующихся, маломощных mesh-сетей, широкий спектр и высокая точность измеряемых параметров, прекрасные возможности для масштабируемости и интеграции в системы активного дома, низкое энергопотребление, использование альтернативных источников энергии.

К недостаткам можно отнести отсутствие средств визуализации информации, необходимость наличия рабочей станции для поддержания работоспособности сети, узкий диапазон измеряемых температур, отсутствие барометра и высокую стоимость данного решения.

Обобщенные результаты анализа систем мониторинга метеоусловий сводятся к следующим заключениям:

- многие модели для функционирования требуют постоянного и устойчивого соединения с Интернетом, что является значительным недостатком и исключает возможность автономной работы устройства в составе систем активного дома;
- полное или частичное отсутствие средств визуализации информации снижает удобство использования данной системы;
- отказ от использования во внешних модулях системы источников альтернативной энергии;
- высокую отказоустойчивость и масштабируемость систем активного дома может гарантировать только сеть, реализующая ячеистую топологию, но абсолютное большинство аналогов разрабатываемого устройства для организации сети используют топологию «дерево» или «звезда», что значительно снижает надежность системы;
- технология построения mesh-сетей имеет высокую сложность, и на данный момент малое количество производителей готовы предложить решения на основе данной технологии – в частности, фирма DIGI является монополистом в данной области, разработанные ей протоколы ZigBee и Z-Wave успешны, но имеют очень высокую стоимость.

Цели данной работы – разработка программных и аппаратных решений устранения выявленных недостатков с привлечением современных технологий умного дома и Интернета вещей, а также использование доступной современной элементной базы, которая позволила бы вывести решение данной задачи на новый уровень.

Описание комплекса мониторинга метеоусловий

Основные функции комплекса мониторинга метеоусловий (модульной метеостанции) заключаются в постоянном информировании пользователя о метеоусловиях как вне помещения, так и внутри него и передаче собранного массива метеоданных на центральный сервер АСУЗ и сервер сервиса ThingSpeak для управления бытовыми климатическими приборами (термостат, кондиционер, увлажнитель и т.д.). В состав комплекса

входят центральный внутренний модуль и как минимум один внешний модуль для сбора метеоданных. Каждый из них имеет датчики температуры и влажности воздуха, дополнительно внутренний модуль снабжен датчиком атмосферного давления, а внешний – датчиком освещенности. В целях достижения максимальной распределенности и автономности сенсорной сети внешний модуль метеостанции обеспечен аккумуляторной батареей, солнечными панелями и специальными программными алгоритмами энергосбережения. Внутренний модуль обладает средствами отображения текущих значений отслеживаемых параметров и режимов работы системы и должен поддерживать wi-fi-соединение с сервером системы и по радиоканалу принимать показания датчиков внешних модулей. После первичной обработки полученной информации внутренний модуль передает массив метеоданных на центральный сервер. Вся система построена согласно концепции IoT и при наличии интернет-соединения в реальном времени отправляет собранные данные на аналитический сервис ThingSpeak для их хранения в облачном пространстве, систематизации и визуализации при помощи средств MATLAB [4].

Формируемая сенсорная сеть

В предложенной реализации комплекса внутренний и внешний модули метеостанции организуют централизованную сенсорную mesh-сеть. Основное требование к этой сети – обеспечение высокой надежности работы всей системы за счет способности к восстановлению при выходе из строя одного или нескольких узлов.

Разработанная в данной работе сенсорная сеть относится к категории WPAN с диапазоном частот 2,4–2,5 ГГц. Для решения задачи организации ретранслируемой ближней радиосвязи между маломощными передатчиками наиболее подходит стандарт IEEE 802.15.4, который специально разработан для приложений с низкими требованиями к пропускной способности сети, невысокими стоимостью и энергопотреблением. Основные требования этого стандарта:

- базовая частота – 2400,0–2483,5 МГц;
- радиус действия – от 10 до 160 м (при прямой видимости);
- скорость передачи данных – до 250 Кбит/с;
- максимальное количество устройств в сети – 65 000.

Данный стандарт является основой протокола ZigBee и покрывает физический и канальный уровни модели OSI. Особенностью выполненной разработки является использование наработок успешного протокола ZigBee и одновременный

отказ от применения дорогостоящих модулей, имеющих сертификацию данного стандарта. В упрощенной модели предложенная конфигурация комплекса является сетью маршрутизаторов, которая за счет разбиения маршрута на межузловые передачи и последовательной ретрансляции не позволяет затухать сигналу при передачах на большие расстояния. Для организации динамической маршрутизации все узлы сети обмениваются между собой маршрутной информацией, а master-узел поддерживает эту информацию в актуальном состоянии, осуществляя регулярное сканирование сети. В ячеистых сетях могут присутствовать как «спящие» узлы, так и статические, которые могут выполнять функции локальных master-узлов. Данные узлы должны бесперебойно функционировать, т.к. данный тип узла поддерживает функционирование определенного сектора сети. В таком случае при некотором количестве статических узлов появляется возможность прокладки наиболее оптимального маршрута [5].

Всем узлам сети присваивается уникальный номер `nodeID` в диапазоне от 1 до 255, master-узел имеет уникальный номер `nodeID`, равный 0, и адрес RF24Network, равный 00. Адреса RF24Network можно рассматривать как MAC-адреса, а идентификаторы узлов `nodeID` – как статические IP-адреса. При присоединении или повторной установке в сеть узлы будут запрашивать адрес RF24Network и идентифицироваться через `nodeID`. Идентификаторы узлов `nodeID` являются уникальными, а адреса RF24Network динамически изменяются в статически определенной структуре. Благодаря этому любой узел может связаться с ведущим узлом, поскольку его адрес RF24Network всегда известен (00). Master-узел, которым является внутренний модуль



Рисунок 1. Структурная схема внутреннего модуля метеостанции

метеостанции, отслеживает уникальные идентификаторы узлов и назначает адреса RF24Network, осуществляя также функцию координатора. Когда узел физически перемещается в пространстве или просто теряет соединение с сетью, он автоматически осуществляет переподрключение к сети и перенастройку внутри нее [6].

Структурный состав комплекса

На структурной схеме внутреннего модуля (рис. 1) представлены основные узлы системы, протоколы передачи данных между ними, а также уровни напряжения их питания. Внутренний модуль метеостанции имеет в своем составе следующие центральные узлы: микроконтроллер, wi-fi-модуль, радиомодуль, дисплей, модуль часов реального времени, а также набор необходимых датчиков и источник питания.

На структурной схеме внешнего модуля (рис. 2) представлены основные узлы системы, протоколы передачи данных между ними, а также уровни напряжения их питания. Внешний модуль метеостанции имеет в своем составе следующие центральные узлы: микроконтроллер, радиомодуль, аккумуляторный блок, солнечные панели, схемы измерения освещенности и напряжения на аккумуляторе и солнечных панелях, а также набор необходимых датчиков.

Алгоритмическое обеспечение модульной метеостанции

При включении внутреннего модуля осуществляются подключение необходимых для функционирования компонентов и библиотек, объявление используемых переменных и констант. Затем производится начальная настройка оборудования: инициализация интерфейсов UART, SPI, I2C, временное

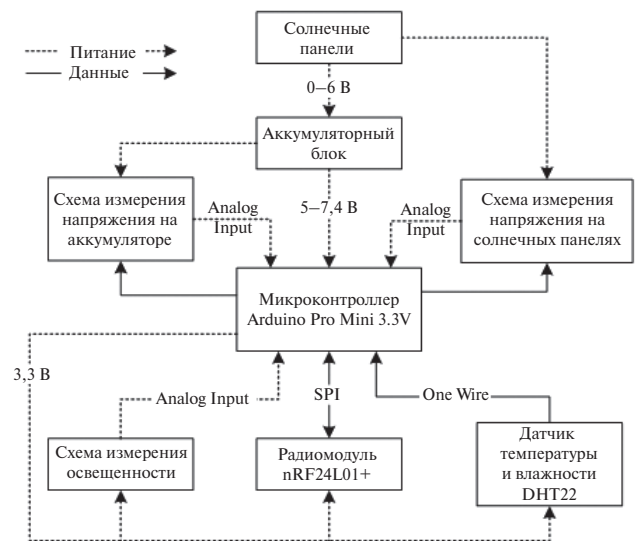


Рисунок 2. Структурная схема внешнего модуля метеостанции

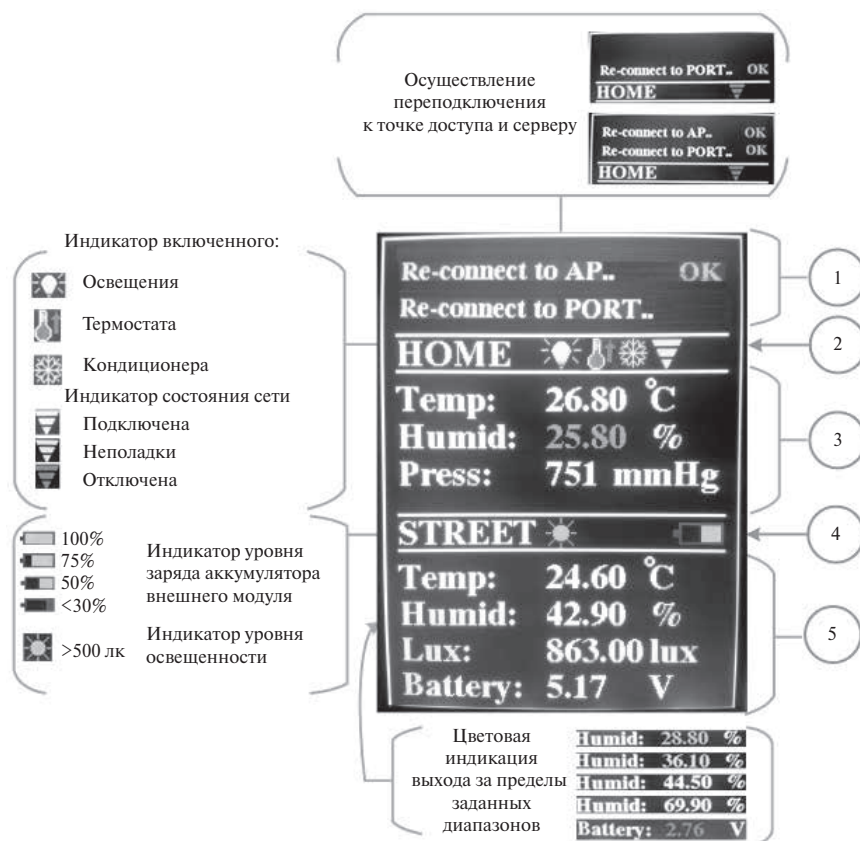


Рисунок 3. Основной интерфейс внутреннего модуля метеостанции: 1 – поле отображения данных о времени и дате; 2 – поле индикаторов внутреннего модуля; 3 – поле отображения данных от датчиков внутреннего модуля метеостанции; 4 – поле индикаторов внешнего модуля; 5 – поле отображения данных от датчиков внешнего модуля метеостанции

отключение сторожевого таймера, включение радиомодуля и дисплея, настройка заданного канала, организация mesh-сети и установка начальных значений на входах и выходах микроконтроллера, используемых для управления полезной нагрузкой. Далее на дисплее отображается процесс настройки радиомодуля, по окончании которого на нем появляется основной интерфейс пользователя. Пример графического интерфейса комплекса приведен на рис. 3.

Во внутреннем модуле реализован алгоритм смены его режима работы в зависимости от доступности сервера или точки доступа wi-fi. При включении модуля и при внезапном исчезновении связи с точкой доступа осуществляются сканирование всех присутствующих точек доступа wi-fi и поиск среди них известных модулю. При отсутствии всех предусмотренных кодом программы точек доступа модуль продолжает автономное функционирование, периодически осуществляя сканирование эфира.

В процессе выполнения программы микроконтроллер проверяет буфер wi-fi-модуля на наличие команд от сервера. При нахождении команды она реализуется, и микроконтроллер возвращается к основной программе. Осуществляются также

обновление статуса mesh-сети и проверка буфера радиомодуля на наличие пакета данных от внешних модулей. В случае обнаружения пакета информация в нем заносится в общий массив данных. При необходимости происходит реорганизация сети. Алгоритм работы внутреннего модуля представлен на рис. 4.

Разработанный алгоритм позволяет внутреннему модулю взаимодействовать с большим количеством однотипных внешних модулей, обеспечивая реализацию распределенной модульной сенсорной сети, предназначенной для осуществления мониторинга метеоусловий.

При включении внешнего модуля осуществляются подключение необходимых для функционирования компонентов и библиотек, объявление используемых переменных и констант. Затем происходит начальная настройка оборудования: включение радиомодуля, настройка заданного канала, подключение к общей mesh-сети и установка начальных значений на входах и выходах микроконтроллера, используемых для измерения напряжений на аккумуляторе и солнечных панелях.

Выполнение основного цикла алгоритма работы метеостанции начинается с обновления статуса

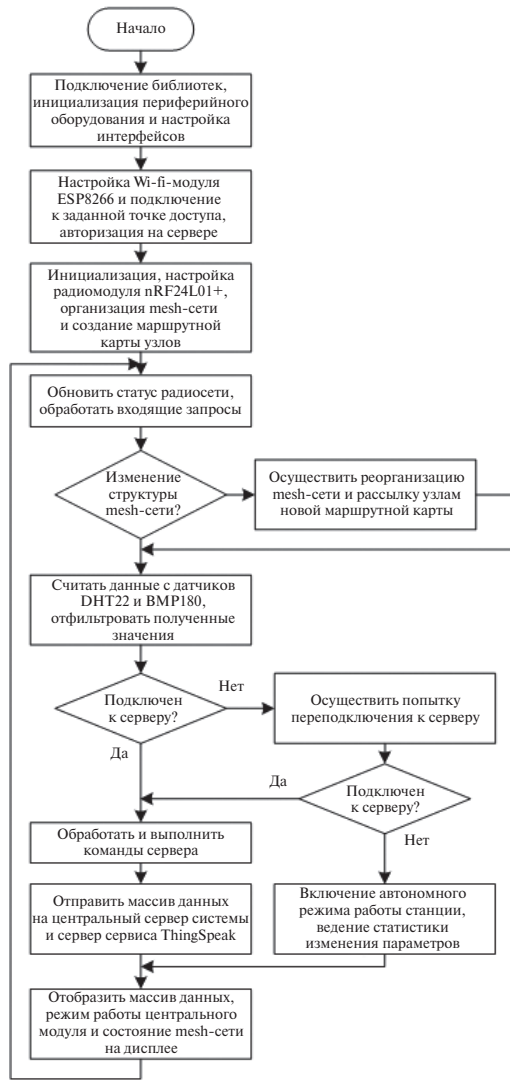


Рисунок 4. Алгоритм работы внутреннего модуля системы

радиосети. При этом обрабатываются запросы, поступившие в буфер радиомодуля, а также осуществляется отправка извещения на центральный модуль, отвечающий за координирование mesh-сети. Данное извещение содержит информацию о состоянии подключения данного узла и его потомках. Затем осуществляется считывание показателей температуры, влажности и уровня освещенности.

Для питания внешнего модуля используются аккумуляторы типа LiFePo4, которые подзаряжаются с помощью солнечных панелей. В целях экономии заряда измерение напряжения аккумулятора осуществляется в 5 раз реже, чем отправка данных. Для измерения напряжения солнечных панелей и его удержания в допустимых пределах разработан алгоритм, который в зависимости от уровня заряда аккумулятора изменяет продолжительность режима «сна» микроконтроллера и интенсивность отправки данных на внутренний модуль. Затем массив собранных данных отправляется в mesh-сеть.

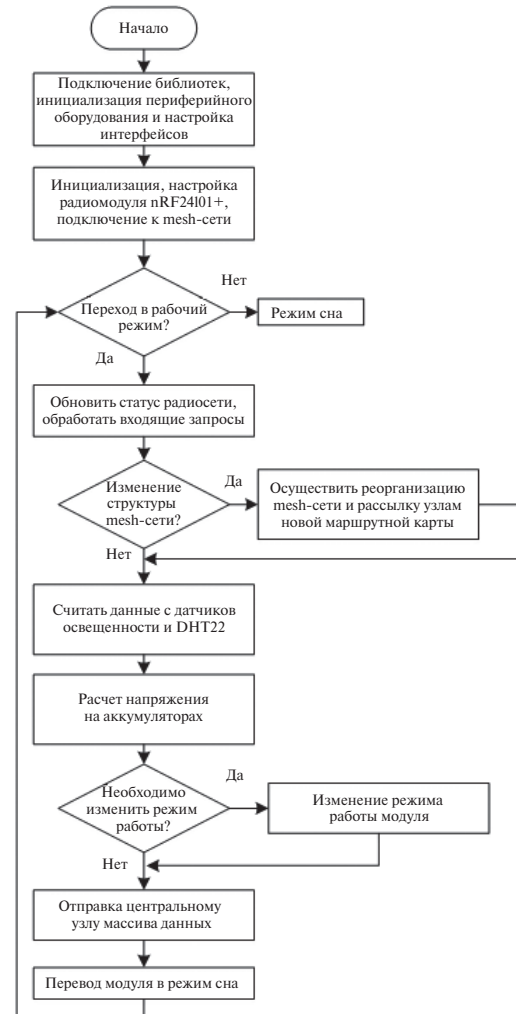


Рисунок 5. Алгоритм работы внешнего модуля системы

Осуществляется также маршрутизация транзитных пакетов данных от других узлов сети. При выполнении условия перевода микроконтроллера в режим сна отключается питание радиомодуля и всей периферии микроконтроллера за исключением сторожевого таймера и внешних прерываний, что позволяет в разы сократить энергопотребление системы. Алгоритм работы внешнего модуля представлен на рис. 5.

Технико-экономическое обоснование

Реализованные в проекте программно-аппаратные решения позволяют образовывать сенсорные сети как малого, так и широкого покрытия, а алгоритм, использованный в программе, дает возможность масштабировать данную сеть без ее основательной реорганизации. Использование источников альтернативной энергии повышает автономность устройства, а также его энергоэффективность, что влечет повышение КПД системы. Произведенный

анализ рынка показал, что стоимость разработанной системы значительно ниже, чем у аналогов, что говорит о конкурентоспособности проекта. Сравнение стоимости разработанного комплекса и его аналогов на февраль 2018 года приведено в табл. 1.

На основании вышесказанного можно сделать вывод, что целесообразность данной работы не вызывает сомнения, поскольку была произведена оценка перспективности использования новых технологических решений при решении задач мелкой и средней автоматизации. И разработанный комплекс в полной мере решает все поставленные задачи. Область применения данного комплекса обширна, внедрение данного решения положительно скажется как на крупных распределенных системах с большими потоками данных, так и на малых системах, автоматизируя процессы сбора и анализа информации.

Оценка параметров системы

Оценка надежности

Надежность разрабатываемого изделия закладывается на этапе его конструирования и напрямую зависит от правильности выбора технологии производства, качества материалов и компонентов, а также соблюдения условий изготовления. Произведем оценку среднего времени наработки на отказ и вероятности безотказной работы устройства в течение одного года. Для оценки вероятности безотказной работы $P(t)$ системы применим формулу

$$P(t) = \prod_{i=1}^n e^{-\int_0^t \lambda_i(t) dt}, \quad (1)$$

где n – число элементов системы; $\lambda_i(t)$ – интенсивность отказов i -го элемента, 1/ч.

Для расчета примем, что при выходе из строя одного элемента вся система перестает работать. При расчете надежности это позволит представить всю систему в виде последовательно соединенных элементов. Примем также условие, что интенсивности отказов элементов постоянны, т.е. $\lambda_i(t) = \text{const}$. Тогда для расчета суммарной интенсивности отказов всех элементов системы λ_0 можно воспользоваться формулой

$$\lambda_0 = \sum_{i=1}^n \lambda_i, \quad (2)$$

Таблица 1. Рыночная цена модульных метеостанций

Название	Цена, р.
Qubino Weather Station	19 790
Oregon Scientific LW302	7 790
Xiaomi Smart Home Kit	4 751
Разработанная модульная метеостанция	2 500

Тогда выражение для расчета вероятности безотказной работы системы можно переписать в виде

$$P(t) = \prod_{i=1}^n e^{-\lambda_0 t}, \quad (3)$$

где λ_0 – суммарная интенсивность отказов всех элементов системы, 1/ч; t – временной интервал, для которого осуществляется расчет, ч.

В расчете использованы номинальные значения интенсивностей отказов элементов, приведенные в табл. 2 и 3.

Рассчитаем суммарную интенсивность отказов элементов рассматриваемого внутреннего модуля по формуле (2):

$$\begin{aligned} \lambda_0 &= 5 \cdot 0,01 + 0,035 + 2 \cdot 0,1 + 2,2 + 0,02 + 0,3 + 1,7 + 1,2 + \\ &+ 0,28 + 0,2 + 1,2 + 0,7 + 3 \cdot 0,034 + 86 \cdot 0,004 + \\ &110 \cdot 0,0013 + 1,4 = 10,074 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч.} \end{aligned}$$

Рассчитаем среднее время наработки до отказа, являющееся величиной, обратной суммарной интенсивности отказов всех элементов:

$$t = 1 / 10,074 \cdot 10^{-6} \approx 99,3 \cdot 10^3 \text{ ч.}$$

Для оценки вероятности безотказной работы системы воспользуемся формулой (3). Оценку надежности системы будем производить в расчете на интервал времени, равный одному году, что приблизительно равно 8760 ч:

$$P(t) = 3,14^{-10,074 \cdot 10^{-6} \cdot 8760} \approx 0,903955.$$

Аналогично рассчитаем также суммарную интенсивность отказов элементов для рассматриваемого внешнего модуля. По формуле (2)

$$\begin{aligned} \lambda_0 &= 6 \cdot 0,01 + 0,035 + 2 \cdot 0,1 + 2 \cdot 0,157 + 4 \cdot 0,008 + 2 \cdot 0,98 + \\ &+ 0,3 + 2 \cdot 0,4 + 2,1 + 1,7 + 1,2 + 22 \cdot 0,004 + 46 \cdot 0,0013 + 1,3 = \\ &= 10,1488 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч.} \end{aligned}$$

Рассчитаем среднее время наработки на отказ:

$$t = 1 / 10,1488 \cdot 10^{-6} \approx 98,53 \cdot 10^3 \text{ ч.}$$

Вероятность безотказной работы системы определим по формуле (3). Интервал также будет равен одному году, или приблизительно 8760 ч:

$$P(t) = 3,14^{-10,1488 \cdot 10^{-6} \cdot 8760} \approx 0,903277.$$

Оценка потребляемой мощности

Оценим мощность, потребляемую внутренним и внешним модулями. Для этого сведем в табл. 4 и 5 значения потребляемой мощности каждого элемента внутреннего и внешнего модуля, а затем воспользуемся формулой

$$P = \sum_{i=1}^n P_i. \quad (4)$$

Таблица 2. Интенсивности отказов элементов внутреннего модуля метеостанции

Наименование	Количество	Интенсивность отказов $\lambda_0 \cdot 10^{-6}$, 1/ч
Резистор постоянный	5	0,01
Электролитический конденсатор	1	0,035
Керамический конденсатор	2	0,1
Отладочная плата	1	2,2
Часы реального времени	1	0,02
LCD-дисплей	1	0,3
Радиомодуль	1	1,7
Wi-fi-модуль	1	1,2
Преобразователь напряжения	1	0,28
Преобразователь логических уровней	1	0,2
Датчик температуры и влажности	1	1,2
Датчик атмосферного давления	1	0,7
Светодиод	3	0,034
Соединительный разъем	86	0,004
Пайка	110	0,0013
Плата	1	1,4

Таблица 3. Интенсивности отказов элементов внешнего модуля метеостанции

Наименование	Количество	Интенсивность отказов, $\lambda_0 \cdot 10^{-6}$, 1/ч
Резистор постоянный	6	0,01
Электролитический конденсатор	1	0,035
Керамический конденсатор	2	0,1
Диод Шоттки	2	0,157
Аккумулятор	4	0,008
Солнечная панель	2	0,98
Фоторезистор	1	0,3
Биполярный транзистор	2	0,4
Отладочная плата	1	2,1
Радиомодуль	1	1,7
Датчик температуры и влажности	1	1,2
Соединительный разъем	22	0,004
Пайка	46	0,0013
Плата	1	1,3

Здесь P – электрическая мощность, потребляемая прибором, Вт; n – количество потребителей схемы; P_i – электрическая мощность, потребляемая i -м элементом, Вт.

Рассчитаем максимальную потребляемую внутренним модулем мощность по формуле (4):

$$P = 0,43 + 0,0446 + 0,9 + 0,0055 + 0,00025 + 0,0011 + 0,37 = 1,75145 \text{ Вт.}$$

В программной части внешнего модуля используются алгоритмы сохранения электроэнергии, поэтому теоретически определить потребляемую внешним модулем мощность невозможно. Проведем расчет мощности, потребляемой внешним модулем в пике потребления, а затем сравним ее с практически измеренным значением.

Рассчитаем максимальную мощность, потребляемую внешним модулем, по формуле (4):

Таблица 4. Мощность, потребляемая элементами внутреннего модуля метеостанции

Наименование	Потребляемая мощность, Вт
Отладочная плата Arduino Mega 2560	0,43
Радиомодуль nRF24L01+	0,0446
Wi-fi-модуль ESP8266	0,9
Датчик температуры и влажности DHT22	0,0055
Датчик давления и температуры BMP180	0,00025
Часы реального времени RTC DS3231	0,0011
Дисплей ILI9341	0,37

Таблица 5. Мощность, потребляемая компонентами внешнего модуля метеостанции

Наименование	Потребляемая мощность, Вт
Отладочная плата Arduino Pro Mini 3,3V	0,0850
Радиомодуль nRF24L01+	0,0446
Датчик температуры и влажности DHT22	0,0055
Схема измерения освещенности	0,0033

$$P = 0,0850 + 0,0446 + 0,0055 + 0,0033 = 0,1384 \text{ Вт.}$$

Согласно разработанному алгоритму, внешний модуль имеет два основных режима функционирования: режим опроса датчиков и отправки данных и режим сна. Режим опроса датчиков и отправки данных занимает 1,5 с, потребляемый ток в это время составляет 26 мА, что эквивалентно устройству с мощностью 130 мВт. В режиме сна, в котором модуль находится от 10 с до 1 ч, потребляемый ток составляет 1,4 мА. Мощность эквивалентного устройства с данным режимом работы составляет 0,007 Вт.

Оценка времени автономной работы внешнего модуля

В качестве примера приведем оценку времени автономного функционирования внешнего модуля

БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (проект 8.5098.2017).

ACKNOWLEDGEMENT

The work was performed with the support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (project 8.5098.2017).

при стандартном режиме работы с частотой отправки данных, равной 1 раз в 10 мин. Таким образом, осуществляется 6 отправок данных в 1 ч или 144 отправки за день, которые занимают 216 с, или 3,6 мин (0,06 ч). Все остальное время, а именно 1436,4 мин (23,94 ч), модуль функционирует в режиме сна, потребляя ток, равный 1,4 мА [7].

Энергопотребление системы в каждом режиме, а также общее потребление за сутки составляют не более 36 мА·ч, что при стандартной емкости аккумуляторов обеспечивает надежное функционирование в течение 30 дней. В данной оценке не учтены автоматическое уменьшение интенсивности отправки данных на внутренний модуль при пониженном напряжении на системе электропитания, а также процесс подзарядки аккумуляторов при помощи солнечных батарей, что значительно увеличивает срок автономной работы устройства.

Заключение

Рассмотренный программно-аппаратный комплекс предназначен как для внедрения в системы АСУЗ и проекты активного дома, так и для самостоятельного функционирования, в частности для обеспечения контроля условий технических экспериментов и технологических режимов, требующих поддержания определенного состояния помещений. Разработанное алгоритмическое обеспечение образует распределенную сенсорную mesh-сеть с модульной структурой, предназначенную для сбора метеорологической информации, ее первичного анализа и отправки на центральный сервер АСУЗ. Данное программное обеспечение лишено многих недостатков, присущих аналогичным устройствам. Работоспособность системы сохраняется при исчезновении соединения с Интернетом, т.к. внутренний модуль способен осуществлять отправки данных на локальный сервер системы, а также производить попытки восстановления связи при ее ухудшении. Использование стандарта IEEE 802.15.4 в качестве основы для разработки протокола организации mesh-сети позволило сохранить функционал данной технологии и отказаться от дорогостоящих модулей ZigBee. Сохранение модульной структуры построения в соответствии с концепцией IoT, а также запас производительности гарантируют масштабируемость системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Rowland C., Goodman E., Charlier M., Light A., Lui A. Designing connected products: UX for the Consumer Internet of Things. In: O'Reilly Media. 2015.
2. Толстель О.В., Чурилов А.О., Нестеров О.В. Реализация системы управления микроклиматом // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. (Физико-математические и технические науки). 2016. № 4. С. 44–48.
3. Файст В. Основные положения по проектированию пассивных домов. М.: Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2008. 144 с.
4. Нестеров А. Проектирование АСУТП. Кн. 1. СПб.: ДЕАН, 2009. 944 с.
5. Гусс С.В. Самоорганизующиеся mesh-сети для частного использования // Математические структуры и моделирование. 2016. № 4 (40). С. 102–115.
6. Баскаков С.С. Распределенный алгоритм автоматического выбора опорных узлов в беспроводных многоячейковых (mesh) сетях // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. (Приборостроение). 2008. № 4.
7. Воробьев А.Ю. Электроснабжение компьютерных и телекоммуникационных систем. М.: Эко-Трендз, 2002. 280 с.

REFERENCES

1. Rowland C., Goodman E., Charlier M., Light A., Lui A. Designing Connected Products: UX for the Consumer Internet of Things. In: O'Reilly Media. 2015.
2. Tolstel O.V., Churilov A.O., Nesterov O.V. Realization of a control system of a microclimate. *Bulletin of the Baltic federal university of I. Kant. Ser.: Physical and mathematical and technical science*, 2016, no. 4, pp. 44–48. (In Russian).
3. Feist W. *Osnovnye polozheniya po proektirovaniyu passivnykh domov* [Basic provisions for the design of passive houses]. Moscow, Izdatelstvo Assotsiatsii stroitelnykh vuzov Publ., 2008, 144 p. (In Russian).
4. Nesterov A. *Proektirovanie ASUTP* [Design of the PCS]. Book 1. Saint-Petersburg, DEAN Publ., 2009, 944 pp. (In Russian).
5. Gooss S.V. Self-organizing mesh network for private use. *Mathematical structures and modeling*. 2016, no. 4 (40), pp. 102–115. (In Russian).
6. Baskakov S.S. The distributed algorithm of the automatic choice of basic knots in wireless multicell (mesh) networks. *Vestnik of Bauman BMSTU. Ser.: Priborostroyeniye*, 2008, no. 4. (In Russian).
7. Vorobyov A. Yu. *Elektrosnabzhenie kompyuternykh i telekommunikatsionnykh sistem* [Power supply of computer and telecommunication systems]. Moscow, Eco-Trends Publ., 2002, 280 p. (in Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Деменкова Татьяна Александровна, к.т.н., доцент, кафедра вычислительной техники, ведущий научный сотрудник, Центр проектирования интегральных схем, устройств наноэлектроники и микросистем, Московский технологический университет (МИРЭА), 119454, Москва, просп. Вернадского, д. 78, тел.: +7 (916) 240-48-40, e-mail: demenkova@mirea.ru.
Александров Алексей Игоревич, магистрант, кафедра вычислительной техники, Московский технологический университет (МИРЭА), 119454, Москва, просп. Вернадского, д. 78, тел.: +7 (966) 013-36-49, e-mail: vox613@gmail.com.

AUTHORS

Demenkova Tatyana, PhD, associate professor, Computer Science Department, leading researcher of Integrated Circuits, Nanoelectronics Devices and Microsystems Design Center, Moscow Technological University (MIREA), 78, prospekt Vernadskogo, Moscow, 119454, Russia, tel.: +7 (916) 240-48-40, e-mail: demenkova@mirea.ru.

Alexandrov Aleksey, master's degree student, Computer Science Department, Moscow Technological University (MIREA), 78, prospekt Vernadskogo, Moscow, 119454, Russia, tel.: +7 (966) 013-36-49, e-mail: vox613@gmail.com.