



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-1-83-90>

УДК 004.738

МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГРАНИЧНЫХ УСТРОЙСТВ В СЕТИ IoT

А. О. АНДРЕЙЧУК

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(Минск, Республика Беларусь)*

Аннотация. В статье рассматриваются методы повышения энергетической эффективности граничных устройств IoT, включая аппаратные решения, беспроводное питание устройств через Wi-Fi, протоколы связи, алгоритмы управления энергопотреблением и использование возобновляемых источников энергии. Предложена архитектура гибридной системы питания, разработан в виде диаграммы алгоритм последовательности работы адаптивного управления. Это в совокупности позволило обеспечить эффективное энергоснабжение датчиков системы IoT. Основной проблемой была идентификация высокой нелинейности импеданса выпрямительной системы, зависящей от входной мощности, частоты и параметров DC-DC-преобразователя, что делает традиционные подходы к согласованию цепей неэффективными в широкой полосе частот Wi-Fi.

Ключевые слова: IoT, энергоэффективность, Wi-Fi Energy Harvesting, гибридная система, ESP32.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Андрейчук, А. О. Методы повышения энергетической эффективности граничных устройств в сети IoT / А. О. Андрейчук // Доклады БГУИР. 2026. Т. 24, № 1. С. 83–90. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-1-83-90>.

METHODS FOR INCREASING THE ENERGY EFFICIENCY OF EDGE DEVICES IN IoT NETWORKS

ALIAKSANDR ANDREICHUK

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. This article examines methods for improving the energy efficiency of IoT edge devices, including hardware solutions, wireless powering via Wi-Fi, communication protocols, energy management algorithms, and the use of renewable energy sources. A hybrid power system architecture is proposed, and an adaptive control sequence algorithm is developed as a diagram. Together, these factors ensure efficient power supply to IoT system sensors. The main challenge was identifying the high nonlinearity of the rectifier system impedance, which depends on the input power, frequency, and DC-DC converter parameters, making traditional approaches to matching circuits ineffective over the wide Wi-Fi frequency band.

Keywords: IoT, energy efficiency, Wi-Fi Energy Harvesting, hybrid system, ESP32.

Conflict of interests. The author declares that there is no conflict of interests.

For citation. Andreichuk A. O. (2026) Methods for Increasing the Energy Efficiency of Edge Devices in IoT Networks. *Doklady BGUIR*. 24 (1), 83–90. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-1-83-90> (in Russian).

Введение

Актуальность темы обусловлена стремительным развитием технологий интернета вещей (IoT), которые находят применение в промышленности, умных городах, здравоохранении и многих других сферах. Однако ограниченная энергоэффективность граничных устройств (Edge Devices) остается серьезным вызовом, влияющим на их долговечность, производительность и стоимость эксплуатации. Цель исследования – разработка и анализ методов повышения энергетической эффективности граничных устройств в сети IoT.

Беспроводное питание устройств через Wi-Fi представляет собой инновационную технологию, позволяющую использовать энергию электромагнитных сигналов для обеспечения работы маломощных электронных устройств [1]. Wi-Fi-роутеры и точки доступа генерируют электромагнитные сигналы для передачи данных. Эти сигналы могут быть уловлены ректеннами, которые преобразуют переменное электромагнитное поле в постоянный ток. Ректенны, как правило, состоят из антенны, которая улавливает радиоволны, и выпрямителя, преобразующего их в электрическую энергию. Полученная в результате энергия может использоваться для питания маломощных устройств, например, датчиков IoT, гаджетов или сенсоров.

Одним из основных преимуществ беспроводного питания через Wi-Fi является его универсальность. С учетом того, что Wi-Fi-сети уже развернуты повсеместно, эта технология достаточно легко интегрируется в существующую инфраструктуру. Данный подход актуален для устройств, размещенных в труднодоступных местах, например, где замена батареи или прокладка проводов затруднены. Эта технология способствует снижению экологической нагрузки за счет уменьшения использования одноразовых батарей. Несмотря на перспективность, технология имеет ряд ограничений. Основное из них – низкая плотность энергии Wi-Fi-сигналов, что делает ее применимой только для устройств с достаточно малым энергопотреблением. Эффективность преобразования энергии также остается относительно низкой, что ограничивает ее использование. Кроме того, существует риск снижения качества передачи данных при интенсивном использовании энергии сигналов [1].

Выбор подходящих протоколов связи также оказывает значительное влияние на энергопотребление IoT-устройств. Среди наиболее перспективных технологий выделяются LPWAN (Low Power Wide Area Network), включая LoRaWAN и NB-IoT, которые обеспечивают большую дальность связи при низком энергопотреблении, но имеют ограниченную пропускную способность [2]. Также есть технология BLE (Bluetooth Low Energy), отличающаяся низким энергопотреблением, но малой дальностью действия, что может быть недостатком для распределенных систем. Протоколы энергосберегающей маршрутизации, такие как RPL для 6LoWPAN, требуют тщательной настройки для оптимальной работы в зависимости от топологии сети и типов передаваемых данных. Оптимизация времени пробуждения и передачи данных тоже способствует снижению энергопотребления. Однако каждый протокол имеет свои ограничения, и выбор зависит от конкретных требований проектируемой системы.

Использование интеллектуальных алгоритмов для обеспечения функционирования системы позволяет существенно снизить энергопотребление IoT-устройств. Среди таких алгоритмов выделяются машинное обучение для прогнозирования нагрузки и адаптации режима работы устройств, автоматическое управление питанием, включая переход в спящий режим при отсутствии активности, и оптимизация маршрутизации данных для минимизации энергозатрат на передачу [3]. В качестве примеров успешного применения данных алгоритмов можно рассмотреть системы управления освещением в умных городах, которые адаптируют яркость на основе анализа трафика, а также IoT-устройства в сельском хозяйстве, использующие машинное обучение для оптимизации работы датчиков влажности почвы и автоматического полива [3].

Для увеличения автономности IoT-устройств важную роль играют методы энергоснабжения и рекуперации энергии. Среди них – использование солнечных панелей и других возобновляемых источников энергии, технологии Energy Harvesting, позволяющие собирать энергию из окружающей среды (например, вибрации, тепло, свет), и повышение эффективности батарей и систем их управления [1].

Первоначальные затраты на внедрение описанных выше решений могут быть значительными. Долгосрочные выгоды включают снижение эксплуатационных расходов и уменьшение зависимости от традиционных источников питания. Рентабельность использования возобновляемых

источников энергии зависит от условий эксплуатации, таких как доступность солнечного света или кинетической энергии, и требований к мощности и продолжительности работы устройств.

Результаты исследований и их обсуждение

Для достижения поставленной цели использовались Wi-Fi-роутеры для передачи энергии без существенного снижения производительности сети. В отличие от телевизионных и сотовых сетей, Wi-Fi широко распространен в помещениях и функционирует в нелицензируемом ISM-диапазоне, что позволяет легально модифицировать передачи для доставки энергии. Перепрофилирование существующих Wi-Fi-сетей под функцию энергопитания может существенно упростить внедрение устройств с RF-питанием, не требуя дополнительной энергетической инфраструктуры.

Wi-Fi использует метод модуляции OFDM, который обладает высокой эффективностью для передачи энергии за счет большого отношения пиковой мощности к средней. Современные сенсоры и мобильные устройства зачастую оснащаются антеннами на 2,4 ГГц для работы с Wi-Fi, Bluetooth или ZigBee. Таким образом, одна и та же антенна может использоваться как для передачи данных, так и для сбора энергии, что минимально влияет на размеры устройства.

Несмотря на успехи исследований в области радиочастотной идентификации (RFID), которые продемонстрировали эффективность сборщиков энергии на 2,4 ГГц, до настоящего времени не было представлено успешное получение энергии с использованием сигналов существующих Wi-Fi-устройств. Однако при практической реализации выявились определенные проблемы.

Для оценки возможностей подачи энергии Wi-Fi-роутером был проведен эксперимент с использованием роутера (2,437 ГГц, мощность 23 дБм, антенны 4,04 дБи) и датчиком температуры. RF-сборщик энергии должен обеспечивать минимальное напряжение для работы сенсора или микроконтроллера. Для этого применяются выпрямитель, преобразующий несущий сигнал в постоянный ток, и DC-DC-преобразователь, повышающий напряжение. При этом каждый DC-DC-преобразователь имеет минимальный порог входного напряжения; в экспериментах использовался преобразователь с минимальным порогом 300 мВ.

Основная причина заключается в несоответствии требований к подаче энергии и особенностей протокола Wi-Fi. На рис. 1 представлено напряжение на выходе приемника энергии в условиях Wi-Fi-трансляций. График показывает, что сбор энергии осуществляется только в то время, когда происходит передача пакетов, тогда как в «тихие» периоды энергия рассеивается, и минимальное напряжение не достигается. Данные паузы являются неизбежной особенностью распределенного протокола доступа, при котором несколько устройств совместно используют один канал. Непрерывная трансляция роутером трафика может устранить данные паузы, однако это приведет к значительному ухудшению качества обслуживания клиентов и соседних сетей.

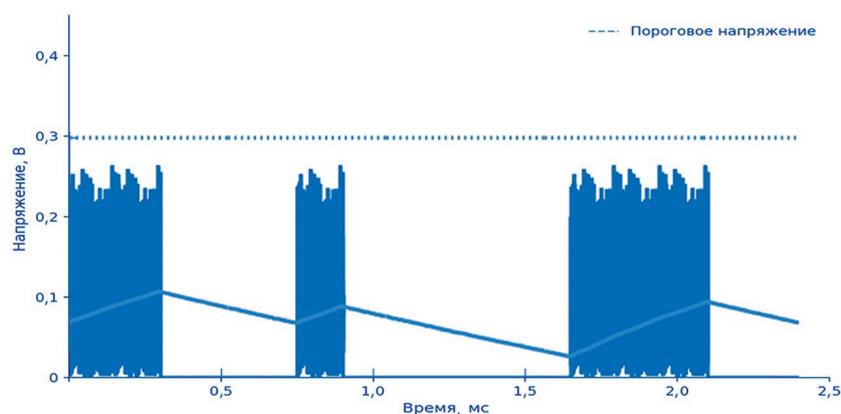


Рис. 1. Проблема беспроводного энергоснабжения с использованием Wi-Fi
Fig. 1. The problem of wireless power supply using Wi-Fi

Наблюдаемая степень загрузки беспроводного канала маршрутизатора находилась в диапазоне 10–40 %. Учитывая, что мощность передачи смартфонов на порядок ниже (0–2 дБм), можно сделать вывод, что основным драйвером процесса сбора энергии является трафик, генерируемый непосредственно точкой доступа. Следовательно, достижение порога эффективного энергоснабжения возможно лишь при условии высокой загруженности канала со стороны маршрутизатора.

Задачей разработки устройства для сбора энергии является эффективное энергоснабжение в пределах множества каналов Wi-Fi-диапазона 2,4 ГГц. Также в качестве одной из задач выступает достижение высокой чувствительности устройства на всех этих каналах. В данном случае чувствительность определяется как минимальный уровень мощности, при котором устройство способно инициализировать и обеспечить питание сенсоров и микроконтроллера. Теоретически возможно накопление энергии в течение продолжительного времени для последующей инициализации. Однако на практике из-за наличия токов утечки функционирование устройства невозможно ниже определенного порога мощности. Данный параметр является критически важным, поскольку мощность, доступная на стороне сенсора, уменьшается с увеличением расстояния до Wi-Fi-роутера; таким образом, чувствительность устройства определяет его максимальный операционный диапазон.

Рис. 2 демонстрирует архитектуру типичного RF-устройства сбора энергии. Принятый антенной сигнал поступает на выпрямитель, преобразующий сигнал 2,4 ГГц в постоянный ток. Затем повышающий DC-DC-преобразователь увеличивает напряжение до уровня, требуемого для питания сенсора и микроконтроллера (МК). Проблема заключается в выраженной нелинейности характеристик выпрямителя, зависящих от входной мощности, рабочей частоты и параметров DC-DC-преобразователя. Эта нелинейность осложняет достижение высокой чувствительности и эффективности устройства в полосе частот шириной 72 МГц, покрывающей три канала Wi-Fi.



Рис. 2. Архитектура RF-устройства сбора энергии
Fig. 2. Architecture of RF energy harvesting device

На рис. 2 в состав устройства включена согласующая цепь для трансформации импеданса выпрямителя и его согласования с антенным импедансом. Основная сложность проектирования согласующей цепи заключается в том, что импеданс выпрямителя сильно зависит от частоты и характеристик DC-DC-преобразователя.

В рамках проведенного исследования была разработана комплексная архитектура гибридной системы питания для граничных IoT-устройств, представленная на рис. 3. Данная архитектура интегрирует несколько взаимосвязанных модулей, образующих единую энергетическую систему. Основным компонентом системы стал RF-энергетический сборщик, состоящий из широкополосной антенны диапазоном 2,4 ГГц и трехкаскадной схемы удвоения напряжения на высокоэффективных диодах Шоттки марки HSMS-2860. Данный преобразовательный блок выполняет ключевую функцию трансформации переменного электромагнитного поля Wi-Fi-сигналов в постоянное напряжение.

Накопительный блок системы представлен электролитическим конденсатором емкостью 1000 мкФ, который служит энергетическим буфером, аккумулируя полученную энергию между циклами передачи данных. Особое внимание было уделено разработке интеллектуального модуля управления питанием на базе программируемого микроконтроллера ESP32. Данный выбор обусловлен наличием встроенного высокоточного аналого-цифрового преобразователя (АЦП) с разрешением 12 бит, который используется для замены аппаратного компаратора. Микроконтроллер работает в режиме глубокого сна (Deep Sleep) с ультранизким энергопотреблением, периодически пробуждаясь для измерения напряжения [4].

Литий-ионный аккумулятор напряжением 3,7 В был интегрирован в систему в качестве надежного резервного источника, гарантирующего бесперебойную работу устройства. Замыкал архитектуру сенсорный узел на основе датчика температуры и влажности DHT22.

Принцип работы системы, детализированный на рис. 4, реализован через циклический алгоритм, начинающийся с фазы накопления энергии, когда устройство переходит в состояние глубокого сна. В этот период RF-сборщик преобразует электромагнитное излучение в электрическую энергию, заряжая накопительный конденсатор. Периодически (например, каждые несколько секунд) таймер реального времени (RTC) ESP32 выводит микроконтроллер из режима сна.

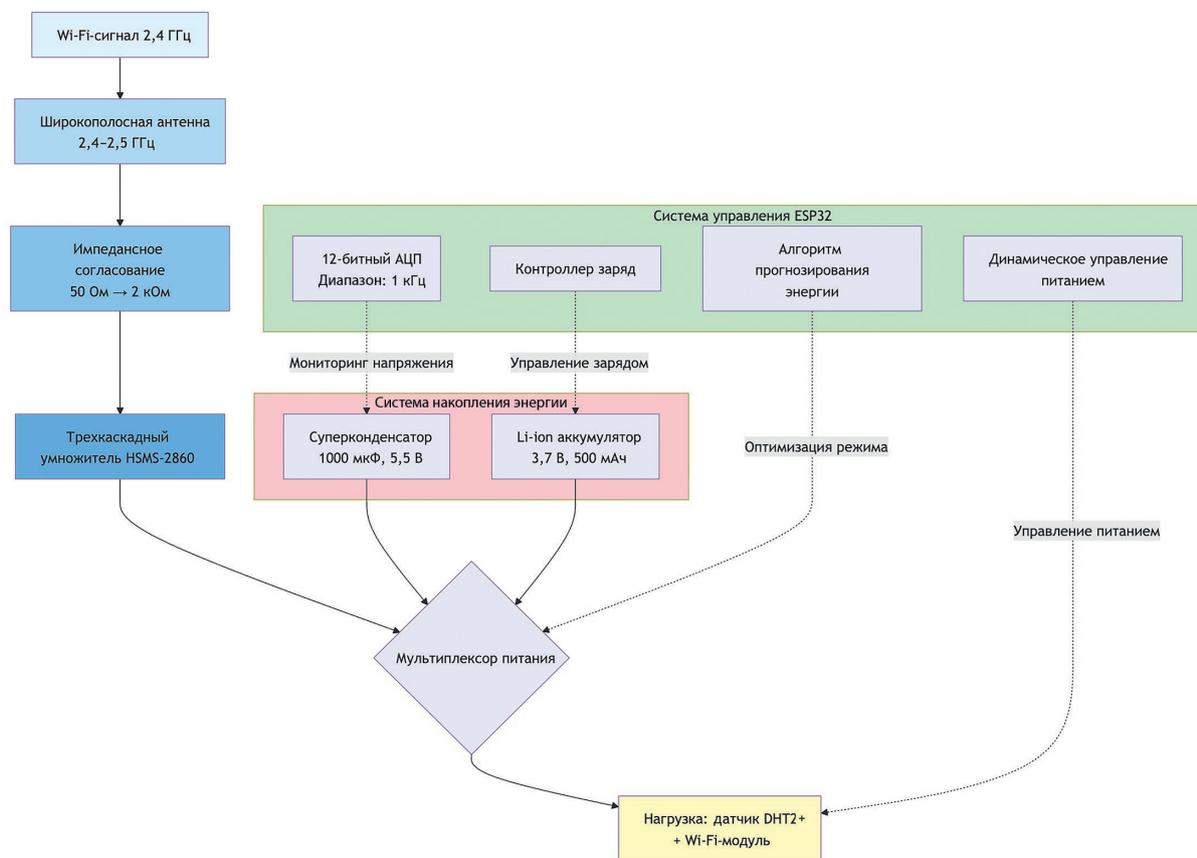


Рис. 3. Архитектура гибридной системы питания
Fig. 3. Hybrid power system architecture

После пробуждения встроенный АЦП микроконтроллера ESP32 выполняет измерение напряжения на накопительном конденсаторе через делитель напряжения. Полученное цифровое значение сравнивается с программно заданным пороговым уровнем (эквивалентным ~3,0 В) в коде алгоритма. При достаточной энергии, когда значение с АЦП превышает порог, система отключает батарею через цифровой вывод управления ключом (MOSFET) и переводит сенсорный узел на питание исключительно от harvested энергии для выполнения рабочего цикла, включающего измерение и передачу данных. В случае недостаточной энергии, когда значение с АЦП ниже порога, система немедленно возвращается в режим глубокого сна для дальнейшего накопления энергии. Если после нескольких попыток напряжение так и не достигает порога, алгоритм инициирует переход на питание от литий-ионного аккумулятора для выполнения критически важных задач.

Использование АЦП ESP32 предоставляет ключевое преимущество – гибкость. Пороговое напряжение, интервалы измерения и логика принятия решений могут быть легко изменены программно, что позволяет адаптировать систему к различным условиям окружающей RF-среды без изменения схемы.

Экспериментальная часть исследования проводилась с использованием специализированного IoT-датчика, оснащенного разработанной гибридной системой питания на базе ESP32 [4]. В качестве источника RF-энергии использовался стандартный Wi-Fi-роутер TP-Link Archer C7. Для мониторинга энергетических параметров был задействован осциллограф Rigol DS1054Z, а сбор и анализ данных осуществлялись через специализированное программное обеспечение. Методология эксперимента предусматривала размещение датчика на различных расстояниях от роутера с генерацией контролируемой нагрузки для создания стабильного электромагнитного поля. Каждый тестовый сценарий продолжительностью 24 ч позволял получить статистически значимые результаты.

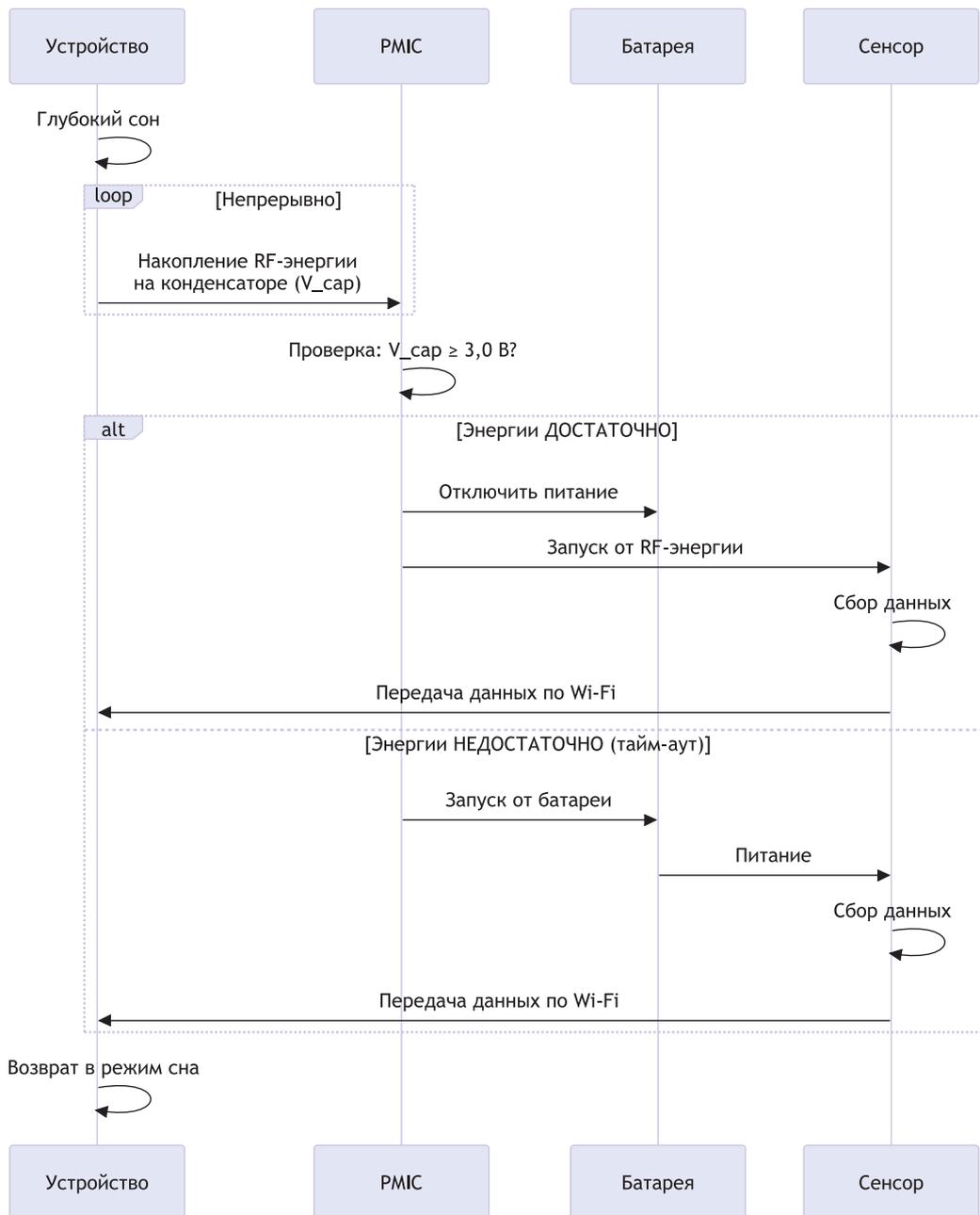


Рис. 4. Диаграмма последовательности работы адаптивного управления
Fig. 4. Adaptive control sequence diagram

Результаты экспериментального исследования, представленные на рис. 5, выявили выраженную корреляцию между эффективностью сбора энергии и параметрами расстояния до источника сигнала и степенью загрузки беспроводного канала. На дистанции 2 м при загрузке канала 70 % наблюдалась стабильная работа системы с регулярным достижением порогового напряжения каждые 2–3 мин. На расстоянии 6 м требования к загрузке канала значительно возрастали.

Адаптивный алгоритм управления на основе АЦП ESP32 продемонстрировал эффективность в переключении между энергетическими источниками. На рис. 6 представлено сравнение разряда батареи в различных конфигурациях: линия 1 – отдельный источник питания, 2 – гибридная система, 3 – стандартная батарея без оптимизации. График показывает значительное увеличение времени автономной работы при использовании гибридной системы. На дистанции 4 м при загрузке канала 50 % гибридная система позволила увеличить время автономной работы на 35 %, в то время как на дистанции 2 м система продемонстрировала практически полную энергетическую автономию.

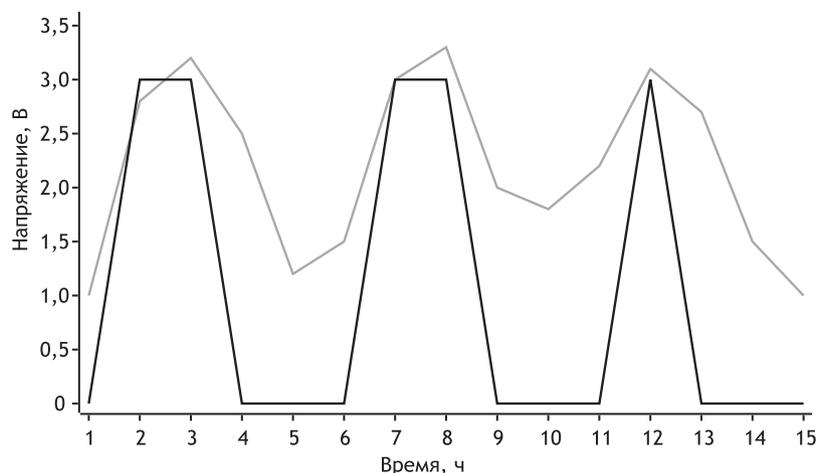


Рис. 5. Концептуальный график напряжения на конденсаторе
Fig. 5. Conceptual graph of voltage across a capacitor

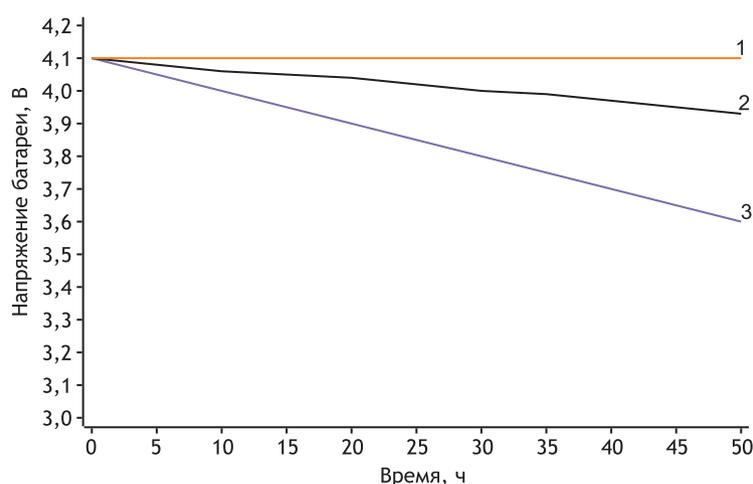


Рис. 6. Сравнение разряда батареи: 1 – отдельный источник питания; 2 – гибридная система; 3 – стандартная батарея без оптимизации
Fig. 6. Battery discharge comparison: 1 – separate power source; 2 – hybrid system; 3 – standard battery without optimization

Проведенное исследование доказывает практическую целесообразность и эффективность применения гибридных систем питания на базе доступных микроконтроллеров, таких как ESP32, в современных IoT устройствах, открывая новые перспективы для создания автономных интеллектуальных систем.

Заключение

Установлено, что, несмотря на теоретический потенциал и повсеместную распространенность Wi-Fi-инфраструктур, использование стандартных Wi-Fi-роутеров для надежного питания удаленных датчиков в настоящее время не представляется возможным. Ключевым ограничением, подтвержденным в ходе эксперимента, является прерывистый (пакетный) характер передачи данных в Wi-Fi, который приводит к постоянным циклам заряда-разряда накопительной емкости и не позволяет достичь минимального порогового напряжения, необходимого для запуска электроники устройства (300 мВ на расстоянии 3 м).

Список литературы / References

1. Lu X., Pi Guo (2016) Wireless Charging Technologies: Fundamentals, Standards, and Network Applications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 18 (4), 1413–1452.

2. Lavric A., Petrariu A. (2019) Long Range (LoRa) Low-Power WANs for Internet of Things: A Review. *IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics (AQTR): Conference Proceedings. Cluj-Napoca, Romania*. 1–9. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1155/2019/3502987>.
3. Benini L., Bogliolo A., De Micheli G. (2000) A Survey of Design Techniques for System-Level Dynamic Power Management. *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*. 8 (3).
4. *ESP32 Technical Reference Manual*. Available: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_technical_reference_manual_en.pdf (Accessed 4 November 2025).

Поступила в редакцию 17.12.2025

Принята в печать 30.01.2026

Received: 17 December 2025

Accepted: 30 January 2026

Сведения об авторе

Андрейчук А. О., асп. каф. информационных радиотехнологий, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 33 340-12-20
E-mail: and.sasha@mail.ru
Андрейчук Александр Олегович

Information about the author

Andreichuk A., Postgraduate of the Department of Information Radiotechnologies, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 33 340-12-20
E-mail: and.sasha@mail.ru
Andreichuk Aliaksandr