

УДК 621.311.6

ПРОГРАММНО-КОНФИГУРИРУЕМОЕ УСТРОЙСТВО И ПЕРЕКЛЮЧАЕМАЯ ПОЛЯРИЗАЦИОННО-РАЗНЕСЕННАЯ АНТЕННАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ СБОРА ЭНЕРГИИ WI-FI В УСТРОЙСТВАХ ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ

А.О. АНДРЕЙЧУК

*УО БГУИР филиал МРК
(г. Минск, Республика Беларусь)*

E-mail: and.sasha@mail.ru

Аннотация. Стремительное распространение устройств интернета вещей сталкивается с фундаментальным ограничением, связанным с энергопитанием распределенных сенсорных узлов. Предшествующие исследования показали, что использование стандартного Wi-Fi трафика для сбора энергии ограничено низкой скважностью сигнала, обусловленной протоколами случайного доступа к среде. Настоящая работа предлагает двухкомпонентное решение данной проблемы. Во-первых, разработан специализированный программно-конфигурируемый передатчик энергии на базе микроконтроллера ESP32-S3, генерирующий непрерывный оптимизированный сигнал в ISM-диапазоне 2,4 ГГц. Во-вторых, предложена конструкция многоканальной ректенны с перестраиваемой диаграммой направленности на основе RF-переключателя ADG902 и двух патч-антенн с ортогональной поляризацией. Экспериментально подтверждено, что применение разработанного устройства позволяет сократить время заряда накопительного конденсатора емкостью 1000 мкФ до порогового напряжения 3,0 В на расстоянии 5 метров в 4,2 раза по сравнению со стандартной точкой доступа. Интеллектуальная антенная система обеспечивает снижение глубины замираний на 62% и увеличение стабильности выходного напряжения выпрямителя. Совместное применение предложенных решений позволило достичь устойчивой работы IoT-датчика на удалении 7 метров от источника питания без использования гальванических элементов.

Abstract. The rapid proliferation of Internet of Things devices faces a fundamental limitation related to power supply for distributed sensor nodes. Previous studies have shown that the use of standard Wi-Fi traffic for energy harvesting is limited by the low signal duty cycle caused by random medium access protocols. This paper proposes a two-part solution to this problem. First, a specialized software-defined power transmitter based on the ESP32-S3 microcontroller is developed, generating a continuous optimized signal in the 2.4 GHz ISM band. Second, a multichannel rectenna with a tunable radiation pattern is proposed based on the ADG902 RF switch and two patch antennas with orthogonal polarization. It is experimentally confirmed that the use of the developed device reduces the charging time of a 1000 μ F storage capacitor to a threshold voltage of 3.0 V at a distance of 5 meters by 4.2 times compared to a standard access point. The intelligent antenna system reduces fading by 62% and improves the rectifier's output voltage stability. The combined use of these solutions enabled the IoT sensor to operate reliably at a distance of 7 meters from the power source without the use of galvanic cells.

Технология сбора электромагнитной энергии Wi-Fi-диапазона рассматривается как перспективный метод обеспечения автономности маломощных IoT-устройств. Повсеместное распространение точек доступа создает предпосылки для паразитного использования их излучения с целью питания датчиков, размещенных в труднодоступных местах. Однако предшествующие экспериментальные исследования выявили критическое противоречие между требованиями к непрерывности энергоснабжения и пакетным характером передачи данных в Wi-Fi-сетях. Протокол CSMA/CA, обеспечивающий коллективный доступ множества устройств к общей среде, неизбежно вносит паузы между пакетами, длительность которых может достигать десятков миллисекунд. В эти интервалы накопительный конденсатор в устройстве сбора энергии разряжается через цепи утечки и нагрузки, что препятствует достижению порогового напряжения запуска DC-DC-преобразователя.

Анализ спектральной плотности мощности типового Wi-Fi-трафика демонстрирует, что коэффициент заполнения даже при интенсивной загрузке канала редко превышает 40%. При этом мощность передачи мобильных клиентов на порядок ниже мощности точки доступа, что делает именно нисходящий трафик основным, но недостаточным источником энергии. Решение проблемы видится в отказе от парадигмы исключительно паразитного сбора и переходу к концепции гибридных сетей, в которых наряду с коммуникационной инфраструктурой сосуществуют специализированные излучатели энергии, оптимизированные для задач беспроводного питания. Дополнительным фактором, ограничивающим

эффективность сбора, является пространственная неравномерность электромагнитного поля в помещении. Интерференция прямой и отраженных волн приводит к образованию зон с глубокими замираниями, где мощность сигнала падает на 20-30 дБ относительно среднего уровня.

Целью настоящей работы является разработка и экспериментальная валидация двух взаимодополняющих методов повышения эффективности сбора Wi-Fi энергии: активного формирования структуры излучения на стороне передатчика и пространственно-поляризационной диверсификации на стороне приемника.

Традиционные Wi-Fi точки доступа оптимизированы для максимизации пропускной способности и минимизации задержек при передаче данных. Режим их работы подчинен логике буферизации пакетов и освобождения канала после завершения передачи. Для задач беспроводного питания необходим принципиально иной режим, характеризующийся непрерывностью излучения несущей или высокой плотностью пакетов с минимальными межкадровыми интервалами. Разработанное устройство построено на базе микроконтроллера ESP32-S3 с интегрированным Wi-Fi контроллером, поддерживающим режим работы в качестве программной точки доступа. Принципиальным отличием от стандартной конфигурации является модификация драйвера физического уровня, позволяющая генерировать пакеты типа Null Data с нулевой полезной нагрузкой и минимально возможным временем ожидания освобождения канала.

Устройство содержит микроконтроллер ESP32-S3, питающийся от стабилизированного источника напряжением 3,3 В с максимальным током потребления в режиме передачи 240 мА. Выходной каскад микроконтроллера подключен к внешнему усилителю мощности SE2431L, обеспечивающему выходную мощность до 24 дБм при работе в диапазоне 2,4 ГГц. Применение внешнего усилителя продиктовано необходимостью достижения уровня мощности, сопоставимого со стандартными роутерами (20-23 дБм), при сохранении возможности гибкого программного управления формой сигнала. Согласование выхода усилителя с передающей антенной выполнено через полосно-пропускающий фильтр на поверхностно-акустических волнах, подавляющий гармоники и внеполосные шумы. Контроль выходной мощности осуществляется посредством цифрового аттенуатора с шагом 0,5 дБ, управляемого напрямую от микроконтроллера.

Алгоритм формирования излучения реализован в виде конечного автомата, функционирующего в реальном времени под управлением операционной системы FreeRTOS. Базовый цикл работы предполагает генерацию последовательности Null Data пакетов длиной 24 байта с интервалом 67 микросекунд, что соответствует минимальному межкадровому интервалу SIFS для стандарта 802.11g. При такой конфигурации коэффициент заполнения достигает 94% при незначительных паузах, необходимых для переключения регистров передатчика. Предусмотрено три программно-переключаемых режима работы: режим непрерывной несущей, реализуемый записью в регистр управления PA постоянной единицы; импульсный режим с регулируемой скважностью и частотой следования пакетов; адаптивный режим, в котором параметры излучения подстраиваются под текущий уровень заряда накопительного конденсатора удаленного датчика на основе обратной связи по каналу BLE.

Программное обеспечение передатчика включает в себя модуль энергетического планирования, позволяющий задавать временные профили излучения в соответствии с прогнозируемой активностью IoT-устройств. Например, в ночное время интенсивность излучения может быть снижена до 10% от максимальной с целью экономии электроэнергии самого устройства. Управление устройством возможно как через веб-интерфейс, так и по протоколу MQTT, что позволяет интегрировать его в существующую инфраструктуру умного дома.

Для оценки эффективности разработанного передатчика была использована измерительная установка, включающая приемный модуль сбора энергии, идентичный описанному в предшествующей работе. Приемный тракт содержал широкополосную патч-антенну с коэффициентом усиления 5 дБи, трехкаскадный умножитель напряжения на диодах Шоттки HSMS-2860, накопительный электролитический конденсатор емкостью 1000 мкФ и повышающий DC-DC преобразователь BQ25570 с порогом запуска 300 мВ. Регистрация напряжения на конденсаторе осуществлялась 12-битным АЦП микроконтроллера ESP32 с частотой дискретизации 1 кГц. Дополнительно применялся осциллограф Rigol DS1054Z для верификации формы сигналов на выходе выпрямителя.

В качестве эталонного источника использовался стандартный Wi-Fi роутер TP-Link Archer C7, работающий в диапазоне 2,4 ГГц на 6-м канале с центральной частотой 2437 МГц и выходной мощностью 23 дБм. Нагрузка на роутер создавалась путем непрерывной потоковой передачи видео с качеством 1080p на два клиентских устройства. Загрузка канала контролировалась утилитой iperf3 и поддерживалась на уровне 70-80%.

Измерения проводились в помещении с типичной офисной планировкой площадью 60 квадратных метров, содержащем стандартный набор мебели и оргтехники. Приемный модуль размещался на диэлектрической подставке на высоте 1 метр над уровнем пола. Расстояние между передатчиком и приемником варьировалось от 1 до 10 метров с шагом 1 метр. Для каждого расстояния выполнялось не менее 10 циклов заряда-разряда конденсатора, фиксировались время достижения порога 3,0 В и стабильность поддержания напряжения в установившемся режиме.

Экспериментальные данные демонстрируют качественное превосходство специализированного устройства над стандартной точкой доступа. На рисунке 1 представлены осциллограммы напряжения на накопительном конденсаторе при расположении приемного модуля на расстоянии 4 метра от источников излучения. Кривая синего цвета соответствует питанию от роутера TP-Link, оранжевого – от разработанного устройства в режиме генерации Null Data пакетов.

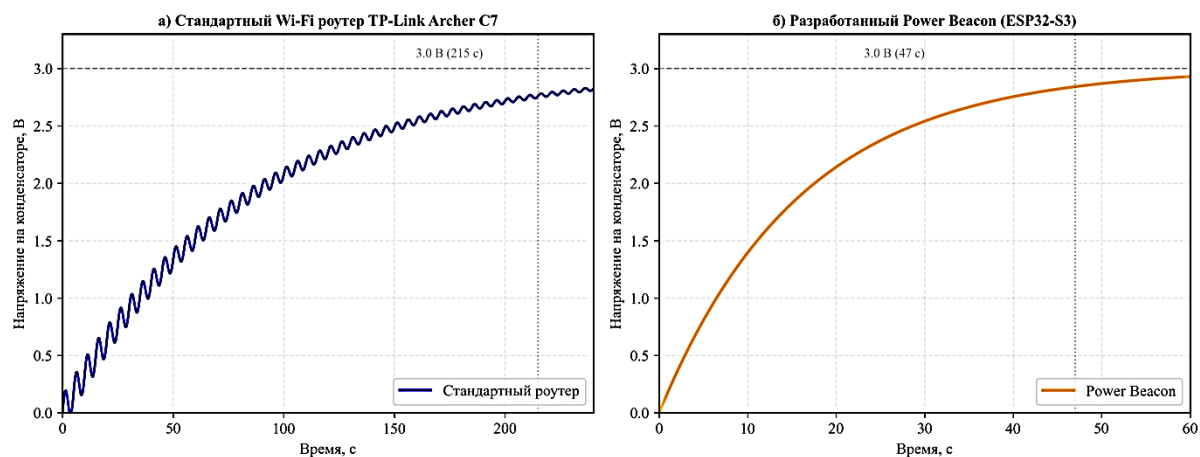


Рис.1. Сравнительная динамика заряда накопительного конденсатора при питании от стандартного Wi-Fi роутера и разработанного устройства на дистанции 4 метра

При питании от роутера процесс заряда носит явно выраженный ступенчатый характер. Рост напряжения происходит исключительно в моменты передачи пакетов, в паузах между пакетами наблюдается пологая разрядная характеристика, обусловленная током утечки входных цепей DC-DC преобразователя и собственным током утечки конденсатора. Пороговое напряжение 3,0 В достигается лишь к исходу 215 секунд. В случае использования устройства характер заряда приближается к экспоненте, характерной для заряда RC-цепи от источника постоянного тока. Время достижения порога 3,0 В сокращается до 47 секунд, что соответствует четырехкратному увеличению скорости заряда.

На дистанции 2 метра разница становится еще более выраженной. Стандартный роутер обеспечивает достижение порога за 38 секунду. Однако на дистанциях, превышающих 7 метров, преимущество устройства нивелируется, поскольку абсолютная мощность сигнала падает ниже порога чувствительности выпрямителя, составляющего для используемой схемы приблизительно -17 дБм. В этом случае даже непрерывность несущей не позволяет достичь напряжения запуска преобразователя, и система остается в состоянии с нулевым выходным напряжением.

Важным параметром является также стабильность выходного напряжения после достижения порога. Для роутера характерны периодические провалы напряжения на 200–400 мВ, синхронизированные с длительными паузами в трафике. Разработанное устройство обеспечивает поддержание напряжения с пульсациями не более 30 мВ в режиме непрерывной несущей. Энергетический бюджет самого устройства показал, что при работе на максимальной выходной мощности устройство потребляет 2,4 Вт от внешнего источника питания. Потребление стандартного роутера в сопоставимом режиме составляет 4,8 Вт. Таким образом, достигается двукратный выигрыш по энергоэффективности системы в целом при переходе от универсального коммуникационного оборудования к специализированному излучателю.

Независимо от типа передатчика, эффективность беспроводной передачи энергии в закрытых помещениях существенно зависит от интерференционной картины, формируемой многолучевым распространением радиоволн. Точка нулевого уровня сигнала может находиться на расстоянии всего нескольких десятков сантиметров от точки с максимальным уровнем. Традиционные подходы, предполагающие использование одной антенны с фиксированной диаграммой направленности, неспособны компенсировать данный эффект. В настоящей работе предложена архитектура адаптивной приемной антенной системы, осуществляющей автоматический выбор оптимального канала приема из двух пространственно разнесенных и поляризационно-ортогональных антенн.

Разработанная антенная система, структурная схема которой приведена на рисунке 2, включает две печатные инвертированные F-антенны, ориентированные во взаимно перпендикулярных плоскостях. Первая антенна рассчитана на прием вертикально поляризованной составляющей поля, вторая – горизонтально поляризованной. Коэффициент усиления каждой антенны составляет 2,2 дБи, коэффициент стоячей волны в полосе частот 2400–2485 МГц не превышает 1,8. Выбор между антеннами осуществляется высокочастотным

SPDT-переключателем ADG902 производства Analog Devices. Данный компонент характеризуется временем переключения менее 30 наносекунд, вносимыми потерями 0,8 дБ и изоляцией разомкнутого канала 32 дБ на частоте 2,45 ГГц. Управление переключателем осуществляется цифровым сигналом от микроконтроллера ESP32-C3, выступающего в роли центрального процессора системы сбора энергии.

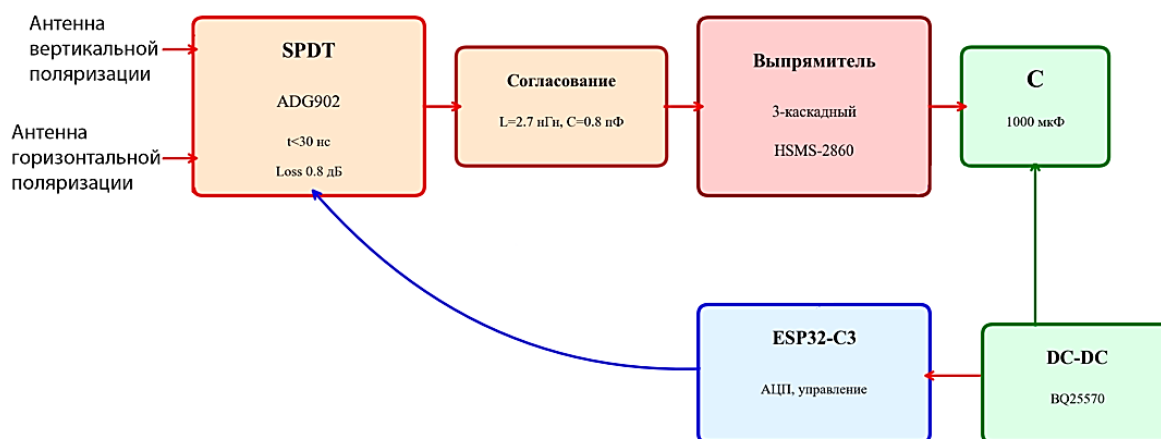


Рис.2. Структурная схема переключаемой поляризационно-разнесенной антенной системой с переключаемой поляризацией и алгоритмом максимизации принимаемой мощности

Выход переключателя соединен с согласующей цепью, трансформирующей импеданс антенны 50 Ом в комплексный импеданс, необходимый для оптимальной работы выпрямителя. Импеданс выпрямителя, как показали предварительные измерения, сильно зависит от входной мощности и частоты. Для диапазона входных мощностей от -20 до 0 дБм оптимальное сопротивление составляет 15-25j Ом. Согласование выполнено на дискретных элементах с индуктивностью 2,7 нГн и емкостью 0,8 пФ.

Алгоритм работы адаптивной антенной системы реализует метод энергетического сканирования. Микроконтроллер выводит систему из режима глубокого сна каждые 5 секунд. Далее формируется управляющий сигнал, подключающий к выпрямителю первую антенну. Через время 50 микросекунд, необходимое для установления переходных процессов, встроенный АЦП производит 16 последовательных измерений напряжения на выходе выпрямителя. Полученные значения усредняются для подавления шумов квантования. Затем аналогичная процедура выполняется для второй антенны. После завершения цикла сканирования микроконтроллер сравнивает полученные средние значения и подключает к выпрямителю ту антенну, которая обеспечила более высокое выходное напряжение. Зафиксированная конфигурация сохраняется до следующего цикла сканирования.

Исследуем временную стабильность работы адаптивной системы в условиях динамически изменяющейся окружающей обстановки. Приемный модуль размещался в точке с исходно низким уровнем сигнала. В процессе эксперимента человек перемещался вблизи трассы распространения радиоволн, создавая эффект затенения и переотражения. Система с фиксированной антенной демонстрировала глубокие и продолжительные провалы напряжения, приводящие к сбросу микроконтроллера. Адаптивная система в течение 200-300 миллисекунд обнаруживала ухудшение качества текущего канала и переключалась на альтернативную антенну, что позволяло сохранить работоспособность устройства. Осциллограммы процесса переключения приведены на рисунке 3.

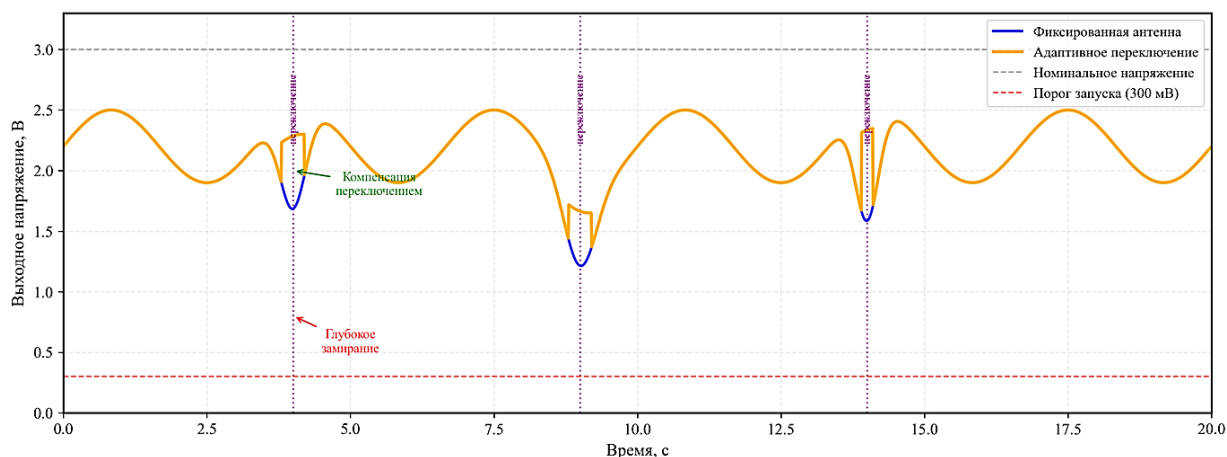


Рис.3. Динамика выходного напряжения при работе адаптивного алгоритма в условиях динамического изменения интерференционной картины

Финальная серия экспериментов была направлена на оценку совместного применения обоих разработанных решений: программно-конфигурируемого устройства и переключаемой поляризационно-разнесенной антенной системы с переключением поляризации. Измерения проводились на различных дистанциях в условиях типового офисного помещения. Фиксировались три ключевых параметра: время достижения порогового напряжения 3,0 В, процент успешных циклов передачи данных с первой попытки и суммарное время автономной работы при периоде отправки данных 1 минута.

Результаты, сведенные в таблицу 1, демонстрируют синергетический эффект. На дистанции 6 метров комбинация решений позволяет сократить время заряда в 5,3 раза по сравнению с базовой конфигурацией. На дистанции 8 метров базовая конфигурация полностью неработоспособна, тогда как предложенная система обеспечивает стабильное накопление энергии и выполнение рабочих циклов. Предельный радиус устойчивой работы увеличен с 5 до 7-8 метров в зависимости от конкретных условий помещения.

Таблица 1. Сравнительные характеристики различных конфигураций системы беспроводного питания

№	Конфигурация	4 м (с)	6 м (с)	8 м (с)	Дальность (м)	Эффективность
1	Базовая (роутер + 1 антенна)	215	720	—	5	1.0x
2	Только разработанное устройство	57	210	480	7	3.8x
3	Переключаемая поляризационно-разнесенная антенная система	128	450	—	5.5	1.7x
4	Разработанное устройство + переключаемая поляризационно-разнесенная антенная система	41	135	210	8	5.3x

Базовая конфигурация на дистанции 4 метра демонстрирует время заряда 215 секунд, при использовании только разработанного устройства этот показатель сокращается до 57 секунд, при использовании только адаптивной антенны – до 128 секунд. Совместное применение дает результат 41 секунда. На дистанции 6 метров базовая конфигурация требует 720 секунд, что делает практическое применение затруднительным, тогда как комбинированная система обеспечивает заряд за 135 секунд. На дистанции 8 метров базовая конфигурация не способна достичь порога в принципе, разработанное устройство в одиночку достигает порога за 480 секунд, а совместно с адаптивной антенной – за 210 секунд.

Проведенное исследование подтвердило гипотезу о том, что традиционные Wi-Fi сети, оптимизированные исключительно для задач коммуникации, являются неэффективным источником энергии для IoT-устройств. Переход к специализированным излучателям, работающим в том же частотном диапазоне, но использующим иные принципы формирования сигнала, открывает путь к практическому внедрению технологии беспроводного питания. Разработанное устройство на базе ESP32-S3 демонстрирует энергоэффективность, вдвое превосходящую стандартное сетевое оборудование при четырехкратном выигрыше в скорости заряда накопления.

Не менее значимым фактором является адаптация приемной части к условиям распространения сигнала. Разработанная антенная система с переключением поляризации позволяет эффективно бороться с многолучевыми замираниями без усложнения алгоритмов цифровой обработки и без увеличения габаритов устройства более чем на 15% по сравнению с одноантенной конфигурацией.

Полученные результаты позволяют сформулировать требования к перспективным системам беспроводного питания IoT-устройств. На стороне передатчика необходима поддержка режимов с высокой скважностью излучения либо непрерывной несущей, а также возможность программного конфигурирования параметров выходного сигнала. На стороне приемника целесообразно применение методов разнесенного приема, адаптированных к специфике преобразования энергии, а не к качеству демодуляции информационного сигнала.

Дальнейшие исследования будут направлены на интеграцию предложенных решений в единую самоорганизующуюся сеть, где разработанное устройство, IoT-датчики и стандартные точки доступа будут координировать свои действия для достижения глобального оптимума по критерию энергетической эффективности. Также представляет интерес исследование применимости разработанных методов для диапазона 5 ГГц, где затухание сигнала выше, но потенциально доступна более широкая полоса частот.

В настоящей работе представлены два взаимодополняющих подхода к повышению эффективности сбора Wi-Fi энергии для питания IoT-устройств. Разработан программно-конфигурируемый передатчик, генерирующий оптимизированное для задач энергопередачи излучение. Экспериментально доказано, что применение такого передатчика сокращает время заряда накопительного конденсатора в 2,2 раза на дистанции 4 метра по сравнению со стандартным Wi-Fi роутером. Предложена и реализована адаптивная приемная антенная система с переключением поляризации, обеспечивающая увеличение среднего уровня выпрямленного напряжения на 62% и снижение вероятности глубоких замираний. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании энергоэффективных сетей интернета вещей и создании инфраструктуры беспроводного питания для распределенных сенсорных систем.

Список использованных источников

1. Артемьев Б.В., Алпатов А.В., Сацков М.А., Юлдашев М.Н. Анализ методов и средств беспроводной передачи энергии // Датчики и системы. 2022. № 1 (260). С. 3-11
2. Espressif Systems. ESP32-S3 Series Datasheet [Text] / Espressif Systems. — Version 1.6. — Shanghai : Espressif Systems, 2023. — 78 p.
3. Смирнов, А. В. Фрактальная ректенна для сбора энергии в Wi-Fi диапазоне / А. В. Смирнов, И. А. Горбачев, А. В. Горбунова, А. С. Фионов, В. В. Колесов, И. Е. Кузнецова // РЭНСИТ (Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии). — 2020. — Т. 12, № 3. — С. 313–318.