

РАДИОТЕХНИКА, РАДИОЛОКАЦИЯ И СИСТЕМЫ СВЯЗИ

УДК 621.396.49

**АНАЛИЗ МЕТОДОВ И АЛГОРИТМОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ
ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ БЕСПРОВОДНЫХ СЕНСОРОВ
ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ****М. В. Грачев**, к.т.н., доцент кафедры РТУ РГРТУ, Рязань, Россия;

orcid.org/0000-0003-1725-9257, e-mail: grachev.m.v@rsreu.ru

А. А. Титов, магистрант каф. РТС РГРТУ, Рязань, Россия;

orcid.org/0009-0004-1853-6150, e-mail: andrey.titov75@mail.ru

Рассматривается проблема повышения энергоэффективности беспроводных сенсоров IoT. Ставится задача нахождения оптимального сочетания режимов работы беспроводного сенсора IoT для обеспечения наибольшей энергетической эффективности. Целью работы является повышение энергоэффективности автономных беспроводных сенсоров IoT путем оптимизации режимов работы его приемопередающего модуля. С целью выявления режимов работы беспроводного сенсора IoT, а также оценки уровня потребляемой мощности в различных режимах работы проведено исследование беспроводной IoT Bluetooth метки. Проведен сравнительный анализ режимов работы, а также потребляемых мощностей IoT меток с версиями Bluetooth 4.0 и 5.2. Полученные результаты имеют практическую значимость для проектирования и эксплуатации энергоэффективных систем передачи информации сети Интернета вещей.

Ключевые слова: система передачи информации, энергоэффективность, IoT, Bluetooth Low Energy, потребляемая мощность.

DOI: 10.21667/1995-4565-2024-90-3-13**Введение**

В следующем десятилетии ожидается значительный рост объема данных, связанный с Интернетом вещей (IoT), который будет способствовать формированию новых рынков и технологий. Использование программно-аппаратных средств IoT является одним из перспективных направлений в области технологий сбора, обработки и передачи информации. Наблюдается тенденция к отказу от проприетарных решений в пользу открытого взаимодействия между узлами и подсетями, принадлежащими различным службам и компаниям [1]. Как показано в [2], к системам передачи информации IoT предъявляются высокие требования по надежности передачи информации, энергоэффективности, времени работы от автономных источников электропитания, работе в условиях внешних и внутрисистемных помех, сильной многолучевости при распространении радиоволн и значительном затухании радиосигнала.

Энергоэффективность беспроводных сенсоров IoT является важным фактором, поскольку распространение этих сенсоров может привести к значительному увеличению потребления энергии. Существует ряд факторов, которые могут повлиять на энергоэффективность сенсоров IoT, включая тип устройства, режим питания и протокол связи [2]. Некоторые сенсоры IoT потребляют больше энергии в режиме приема, чем в режиме передачи. Это связано с тем, что сенсоры должны быть постоянно включены, чтобы получать данные из окружающей среды. Сенсоры IoT могут потреблять меньше энергии за счет использования энергоэффективных протоколов связи, энергосберегающих режимов, например спящего режима. Выбор оптимальных режимов работы, сигналов, используемых в беспроводных сенсорах IoT по совокупности показателей

качества, является сложной задачей, решению которой посвящено большое количество работ [3-5]. Некоторые из наиболее энергоэффективных протоколов IoT, применяемых в автономных беспроводных сенсорах сбора данных: ZigBee, Z-Wave, LoRaWAN, Bluetooth Low Energy.

Проблемы, которые необходимо решить для дальнейшего повышения энергоэффективности сенсоров IoT, включают потребность в новых стандартах, в инновационных материалах и в актуальных методах проектирования. В рамках данной статьи ставится задача найти оптимальное сочетание режимов работы беспроводного сенсора IoT для обеспечения наибольшей энергетической эффективности.

Целью работы является повышение энергоэффективности автономных беспроводных сенсоров IoT путем оптимизации режимов работы его приемопередающего модуля.

Постановка задачи

Уменьшение размеров интегральных микросхем, используемых в автономных беспроводных сенсорах IoT, приводит к изменению их энергопотребления. Переход к новым технологиям, топологиям проектируемых устройств и интегральных микросхем приводит к существенному уменьшению динамического энергопотребления, которое долгое время считалось основной частью потребляемой энергии. В статическом режиме микросхемы КМОП практически не потребляют ток, а основная часть энергии источника питания в данном случае расходуется на токи утечки затворов транзисторов [6]. Как правило, производители интегральных микросхем гарантируют определенный уровень статического энергопотребления, основываясь на графике распределения для наихудшего случая. Тем не менее, типичная кривая распределения статической мощности для дискретных микросхем отражает вероятное статическое энергопотребление устройства. Динамическая мощность представляет собой дополнительное потребление энергии, возникающее из-за переключений вентилях и зарядки/разрядки емкостных нагрузок. Точность оценки энергопотребления проектируемого беспроводного устройства зависит от правильного определения значений передаваемых сигналов и модели энергопотребления. Динамическое энергопотребление играет важную роль и влияет на развитие архитектуры беспроводных устройств. При преобладании динамического энергопотребления предпочтительнее параллельное включение логики по сравнению с использованием конвейерного принципа построения для уменьшения количества переключаемой логики. В беспроводных радиосистемах снижение потребляемой мощности является важной задачей, и для ее решения необходимо развитие архитектуры трансиверов, а также используемых протоколов связи. Для оценки полной мощности, потребляемой от источника питания беспроводным сенсором IoT, используется выражение [7]:

$$P_{\text{пит}} = \frac{P_{\text{прд}}}{\eta} + P_{\text{стат}} + P_{\text{цп}} N_A, \quad (1)$$

где $P_{\text{прд}}$ – суммарная мощность, излучаемая всеми передающими антеннами, $P_{\text{стат}}$ – мощность, потребляемая цифровым процессором в статическом режиме, $P_{\text{цп}}$ – мощность, потребляемая цифровым устройством формирования и обработки сигнала одной антенны, N_A – число приемных и передающих антенн в случае многоканальной системы передачи информации. При этом увеличение числа антенн требует пропорционального повышения скорости обработки сигнала и соответственно тактовой частоты цифрового процессора.

Так как скорость передачи и обработки данных в системах IoT невелика, то можно повысить энергоэффективность системы передачи информации путем рационального выбора мощности передатчика и тактовой частоты цифрового процессора. Статическая составляющая потребляемой мощности $P_{\text{стат}}$ не зависит от тактовой частоты и не уменьшается при изменении напряжения питания [8]:

$$P_{\text{стат}} = Ae^{BT} + C, \quad (2)$$

где A, B, C – константы, T – температура перехода в кристалле цифрового процессора. Динамический компонент мощности $P_{\text{ДП}} = P_{\text{ПРМ}} N_A = \beta f_T$, потребляемой цифровым процессором, линейно зависит от тактовой частоты, а коэффициент пропорциональности равен [9]:

$$\beta = n_A C_3 V^2, \quad (3)$$

где C_3 – общая емкость затворов цифрового процессора, V – разность переключаемых уровней напряжения, n_A – число переключаемых цепей в цифровом процессоре.

Сравнительный анализ технологий Bluetooth Classic и Bluetooth Low Energy

Развитие технологии Bluetooth привело к появлению разных версий и спецификаций, которые можно разделить на два типа. Все версии до 3-й включительно называются Bluetooth Classic, а начиная с версии 4 – Bluetooth Low Energy. Эта последняя итерация была разработана для удовлетворения строгих требований к энергоэффективности беспроводных устройств. В последующих версиях 4.1 и 4.2 реализованы небольшие улучшения. Основной отличительной особенностью технологии Bluetooth Low Energy является ее акцент на минимизации потребляемой устройством энергии. Это достигается путем перевода устройства в спящий режим в течение значительной части операционного времени, что существенно уменьшает расход энергии. Версия Bluetooth 5 [9] принесла значительные улучшения в производительность. Скорость передачи данных увеличилась почти в два раза, дальность действия – в 4 раза, увеличилась пропускная способность сети [10]. Стоит отметить, что Bluetooth Classic и Bluetooth Low Energy несовместимы друг с другом.

Bluetooth Classic работает в нелицензионном диапазоне частот 2,4 ГГц и содержит 79 каналов шириной 1 МГц. Чтобы эффективно использовать этот спектр и избежать попадания в спектр помеховых сигналов от других устройств, применяется случайная перестройка частоты со скоростью 1600 переключений в секунду. При этом последовательность переключения зависит от адреса устройства Bluetooth, поэтому каждое устройство использует свою уникальную последовательность. Для базовой скорости передачи данных, равной 1 Мбит/с, используется гауссовская частотная манипуляция (GFSK), а для повышения скорости до 2 Мбит/с и 3 Мбит/с используются дифференциальная квадратурная фазовая манипуляция со сдвигом символов $\pi/4$ ($\pi/4$ -DQPSK) и дифференциальное фазовое сдвиговое манипулирование с использованием 8 различных фазовых состояний (8DPSK) соответственно.

Bluetooth Low Energy работает в том же диапазоне частот, однако содержит 40 каналов. Переключение каналов происходит только при установлении соединения между устройствами, при этом время соединения составляет 6 мс [9]. Bluetooth Low Energy обеспечивает эффективную работу, используя единственный метод модуляции – GFSK. Максимальная выходная мощность передатчика Bluetooth Low Energy может варьироваться в широком диапазоне значений, от относительно низких до относительно высоких уровней в зависимости от требований к приложению, типа устройства и других особенностей. Для снижения энергопотребления в устройстве может быть независимо реализован регулятор мощности, в котором определены следующие классы выходной мощности передатчика: класс 1 (20 дБм), класс 1,5 (10 дБм), класс 2 (4 дБм), класс 3 (0 дБм). [10]. Bluetooth Low Energy поддерживает симплексный, полудуплексный и дуплексный режимы работы. В таблице 1 приведены сравнительные характеристики технологий Bluetooth Classic и Bluetooth Low Energy [10]. Таким образом, для повышения энергоэффективности беспроводных сенсоров IoT на этапе проектирования используется Bluetooth Low Energy. Bluetooth Classic лучше подходит для задач, требующих высокой скорости передачи данных.

Для исследования энергоэффективности беспроводного сенсора IoT выбрана метка в виде Bluetooth-брелка PALMEXX iTag Bluetooth Key Finder, которая представляет собой небольшое беспроводное устройство для определения местоположения предметов посредством звуковой сигнализации. Исследуемая метка оснащена высокопроизводительным 32-разрядным модемом

ST17H66T, который отличается энергоэффективностью и оптимизирован для Bluetooth Low Energy приложений. Этот модем обладает рядом важных характеристик, включая программируемые выводы, что позволяет гибко настраивать его для выполнения специфических задач. Данный модем оснащен 11-ю программируемыми выводами ввода-вывода общего назначения (GPIO), каждый из которых может быть настроен для выполнения различных функций, включая пробуждение устройства и запуск прерываний. Это обеспечивает высокую гибкость в настройке периферийных устройств и взаимодействии с внешними компонентами. Возможности связи расширяются за счет доступных интерфейсов передачи данных PDM, I2C, SPI, UART, что делает ST17H66T универсальным решением для различных протоколов передачи данных. Поддерживаемая скорость передачи данных до 2 Мбит/с. Гибкое управление питанием и диапазон рабочих напряжений от 1,8 В до 3,6 В. Встроенный в IoT метку Bluetooth Low Energy радиомодуль с рабочей частотой 2,4 ГГц совместим с Bluetooth 5.2 и обеспечивает высокую чувствительность приема сигнала -97 дБм при скорости передачи данных 1 Мбит/с. Особенностью является одноконтakтная антенна, которая упрощает процесс проектирования и снижает требования к ВЧ-согласованию.

Таблица 1 – Сравнение характеристик Bluetooth Classic и Bluetooth Low Energy
Table 1 – Comparison of Bluetooth Classic and Bluetooth Low Energy characteristics

Характеристика	Версия	
	Bluetooth Low Energy	Bluetooth Classic
Частотный диапазон	2,4 ГГц	2,4 ГГц
Радиочастотные каналы	40 с интервалом в 2 МГц	79 с интервалом в 1 МГц
Скорость передачи данных	1...2 Мбит/с	1...3 Мбит/с
Время подключения	6 мс	100 мс
Модуляция	GFSK	GFSK, $\pi/4$ -DQPSK, 8DPSK
Максимальная мощность передатчика	20 дБм, 10 дБм, 4 дБм, 0 дБм	20 дБм, 4 дБм, 0 дБм
Режим соединения	Подключение только при необходимости, затем переход в спящий режим	Постоянное

Экспериментальные исследования

Проведено исследование энергопотребления беспроводного сенсора IoT в различных режимах работы. Исследуемая IoT метка PALMEXX iTag Bluetooth Key Finder использует в качестве источника электроэнергии литиевый элемент питания CR2032 с номинальным напряжением 3 В. Для управления и контроля работы метки IoT использовалось мобильное приложение iSearching. На рисунке 1 показан внешний вид печатной платы исследуемой IoT метки, цифрами показаны ее основные элементы: 1 – антенна для работы в диапазоне 2,4 ГГц; 2 – кварцевый генератор, работающий на частоте 16 МГц; 3 – Bluetooth модем с высокопроизводительным 32-разрядным процессором и низким энергопотреблением (ST17H66T); 4 – SMD светодиод синего цвета; 5 – пьезоизлучатель звука; 6 – кнопка; 7 – контакты для элемента питания типа CR2032.

Для измерения энергоэффективности IoT метки был собран исследовательский стенд, структурная схема которого показана на рисунке 2. Основными элементами данного стенда являются IoT метка, персональный компьютер и плата сбора данных L-CARD E14-440, которая обеспечивает запись данных с высокой точностью. Плата сбора данных через переходник последовательно подключается к элементу питания метки. Для детального исследования энергопотребления метки IoT во всех режимах работы используется косвенный метод измерения потребляемого тока. Для этого в цепь питания включен резистор номиналом 2,7 Ом с

допуском 1 %. Его значение выбрано таким образом, чтобы обеспечить измерение потребляемого тока в необходимом диапазоне. Для развязки переменных сигнальных и постоянного токов используется конденсатор емкостью 1 мкФ.

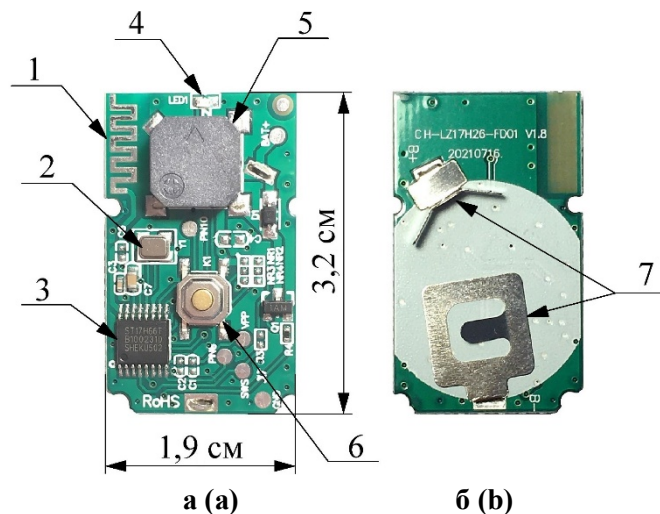


Рисунок 1 – Внешний вид печатной платы Bluetooth IoT метки:
а – верхняя сторона печатной платы; б – нижняя сторона печатной платы
Figure 1 – Bluetooth IoT tag circuit board exterior:
а –upper side of printed circuit board; б –lower side of printed circuit board

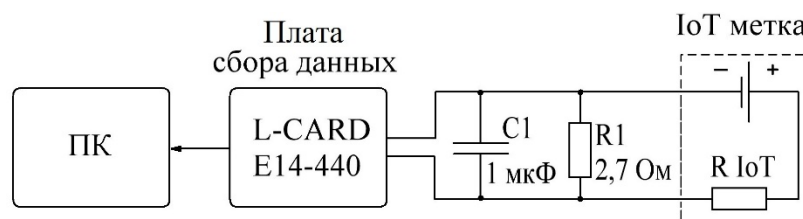


Рисунок 2 – Структурная схема экспериментальной установки
Figure 2 – Block diagram of experimental installation

В результате эксплуатации метки IoT выявлены следующие режимы работы: режим поиска доступных соединений, режим ожидания, режим обмена пользовательскими сообщениями (прием и передача) и статический режим. На рисунке 3 показана зависимость потребляемой мощности от режима работы IoT метки.

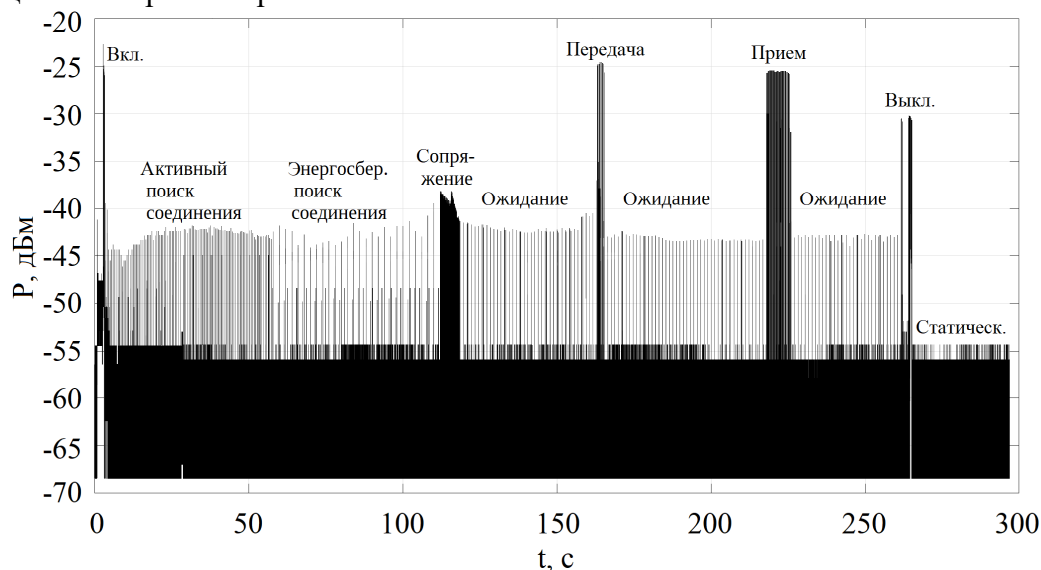


Рисунок 3 – Зависимость потребляемой мощности от режима работы IoT метки
Figure 3 – Dependence of power consumption on IoT tag operation mode

Анализ полученных данных свидетельствует о том, что энергопотребление метки IoT в активных режимах значительно возрастает по сравнению с режимом покоя. Это увеличение энергопотребления обусловлено не только приемом и передачей сигнала, но и расходом энергии на звуковую и световую индикацию. Для оценки эффективности потребления энергии приемопередающей частью необходимо оценить затраты энергии на индикацию. Для этого исследуется величина падения напряжения на резисторе в режиме возобновления активного поиска соединения. В этом случае метка IoT в течение 0,5 секунды осуществляет звуковую индикацию, а затем в течение определенного времени работает световая индикация. Зависимость потребляемой мощности в режиме поиска доступных соединений представлена на рисунке 4. Сразу после включения метка находится в активном режиме, что подразумевает поиск доступных соединений. По истечении определенного промежутка времени она переходит в режим энергосберегающего поиска, в котором потребляемая мощность уменьшается в четыре раза. Это обусловлено снижением периода включения передатчика и приемника. В активном режиме интервал времени между отдельными пиками потребляемой мощности составляет 0,5 секунды, тогда как в энергосберегающем режиме поиска этот интервал увеличивается до 2 секунд.

Мигающий светодиод сигнализирует о том, что метка находится в состоянии поиска доступных соединений. Потребляемая мощность светодиода равна $-47,5$ дБм. После отключения светодиода, через 96 секунд с момента включения устройства, оно переходит в режим умеренного потребления энергии. В этом режиме передатчик и приемник продолжают функционировать с той же периодичностью, что обеспечивает непрерывный процесс поиска соединений. Потребляемая мощность передатчика достигает значения $-42,3$ дБм, в то время как уровень мощности потребления приемника составляет $-49,2$ дБм, цифровой процессор модема демонстрирует минимальное потребление мощности на уровне $-52,7$ дБм. Выход из режима энергоэффективности осуществляется путем активации кнопки на IoT метке, что инициирует звуковую и световую индикацию, после чего цикл, описанный ранее, повторяется. Для звуковой индикации используется пьезоизлучатель, потребляемая мощность которого составляет $-23,1$ дБм.

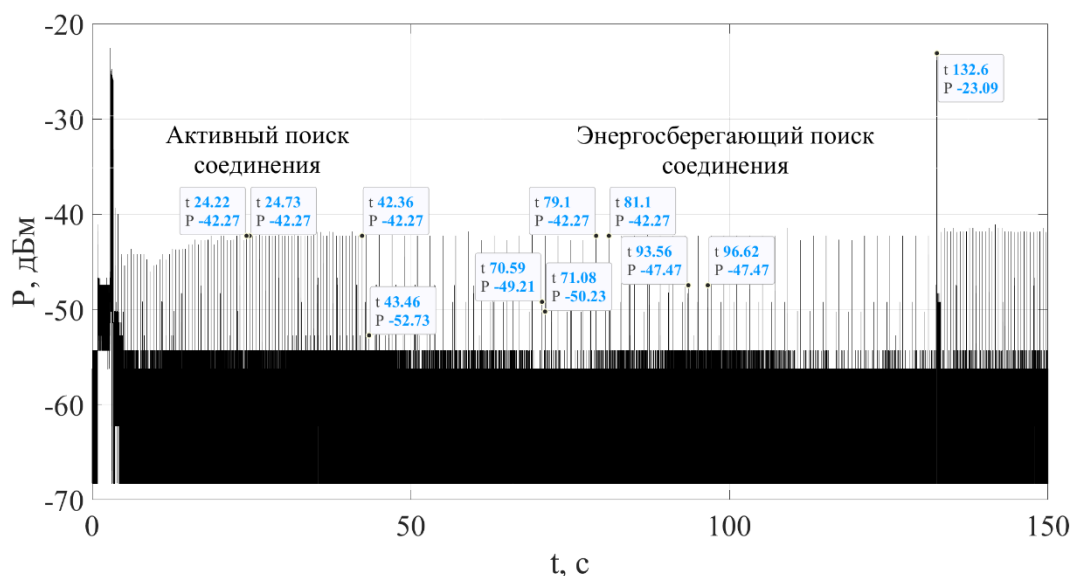


Рисунок 4 – Зависимость потребляемой мощности в режиме поиска доступных соединений

Figure 4 – Dependence of power consumption in search mode for available connections

При обнаружении доступного соединения IoT метка осуществляет сопряжение с устройством пользователя. На рисунке 5 представлена зависимость потребляемой мощности в режиме сопряжения и ожидания. Процесс сопряжения длится 6,1 секунды, в течение которого потребляемая мощность составляет $-42,7$ дБм. Следует отметить, что во время сопряжения временные интервалы между отдельными максимумами потребляемой мощности минималь-

ны, что указывает на повышенное энергопотребление. После завершения сопряжения устройство переходит в режим ожидания, в котором осуществляется периодический обмен сообщениями между IoT меткой и устройством пользователя. Потребляемая мощность цифрового процессора снижается по сравнению с режимом поиска доступных соединений и составляет $-54,3$ дБм. Потребляемая мощность передатчика в данном режиме составляет $-42,7$ дБм. Это значение ниже, чем в режиме поиска доступных соединений, и остается стабильным на протяжении всего времени анализа. Потребляемая приемником мощность находится на уровне $-49,2$ дБм.

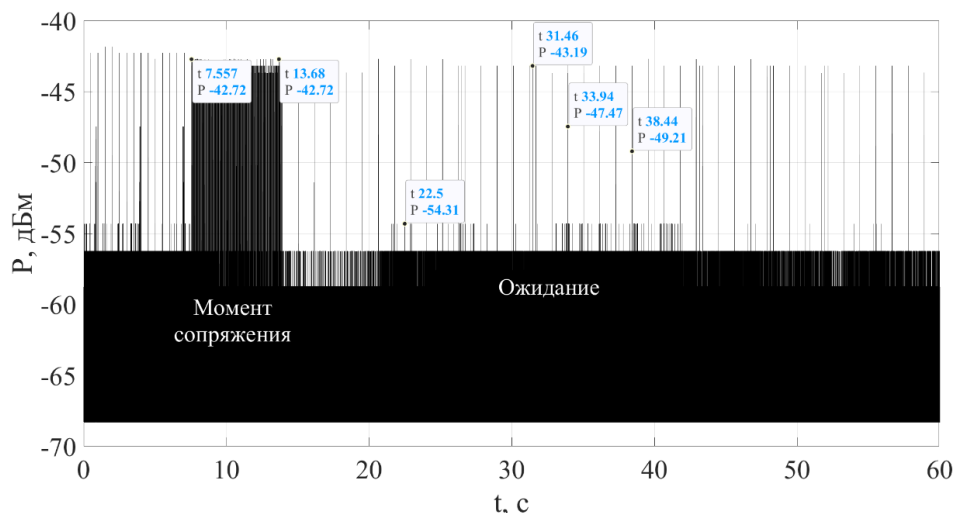


Рисунок 5 – Зависимость потребляемой мощности в режиме сопряжения и ожидания
Figure 5 – Dependence of power consumption in pairing and standby mode

Выявлено два режима работы IoT метки, когда она выходит из режима ожидания и отправляет или принимает пользовательское сообщение. На рисунке 6 представлена зависимость потребляемой мощности в режиме обмена пользовательскими сообщениями для обоих случаев. Первый случай – это отправка пользовательского сообщения с IoT метки на устройство пользователя. Здесь активно работает передатчик, потребляемая мощность которого составляет $-42,3$ дБм, что примерно соответствует потреблению в режиме ожидания. Однако временной интервал между отдельными пиками потребляемой мощности уменьшается с 2 секунд до 0,5 секунд. При этом также функционирует приемник, который принимает ответные сигналы о получении сообщения телефоном, его потребляемая мощность равна $-49,2$ дБм.

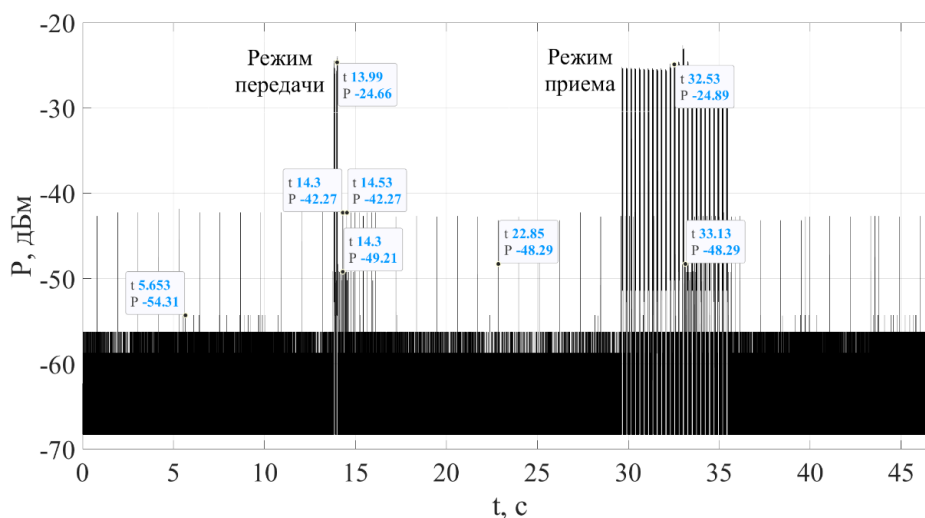


Рисунок 6 – Зависимость потребляемой мощности в режиме обмена пользовательскими сообщениями
Figure 6 – Dependence of power consumption in user messaging mode

Второй режим характеризует прием сообщения меткой, при котором, аналогично первому случаю, активно работают как приемник, так и передатчик. Потребляемая мощность приемника составляет в этом режиме $-48,3$ дБм, а мощность передатчика остается на уровне, аналогичном первому режиму. Однако при приеме сообщения значительная часть энергии расходуется на звуковую и световую индикацию. При этом изменения потребляемой мощности цифрового процессора не наблюдается. На рисунке 3 можно заметить, что в статическом режиме, то есть, когда IoT метка выключена, также наблюдается потребление энергии на уровне $-56,39$ дБм. Средняя потребляемая мощность составляет -60 дБм.

В таблице 2 представлена потребляемая мощность основных компонентов IoT метки. Из анализа экспериментальных данных следует, что потребляемая мощность в разных режимах для каждого компонента IoT метки изменяется в небольших пределах. Произведена оценка потребляемой мощности передатчика и приемника: $-42,4$ дБм и $-48,9$ дБм соответственно. Потребляемая цифровым процессором мощность на уровне $-53,9$ дБм, а светоизлучающего диода на уровне $-47,5$ дБм. Наибольшую потребляемую мощность, равную $-23,1$ дБм, имеет пьезоизлучатель.

Таблица 2 – Потребляемая мощность основных компонентов IoT метки

Table 2 – Power consumption of IoT tag main components

Название компонента	Потребляемая мощность, дБм				Средняя потребляемая мощность, дБм
	Поиск соединения	Ожидание	Обмен сообщениями		
			Передача	Прием	
Передатчик	−42,3	−42,7	−42,3	−42,3	−42,4
Приемник	−49,2	−49,2	−49,2	−48,3	−48,9
CPU	−53,7	−54,3	−54,3	−54,3	−53,9
Пьезоизлучатель звука	−23,1				
Светодиод	−47,5				

Произведена оценка средней потребляемой мощности в различных режимах работы. Результаты измерений показали, что в режиме ожидания средняя потребляемая мощность равна $-48,7$ дБм, что является наименьшим значением среди активных режимов работы. Это обусловлено тем, что в этом режиме IoT метка находится в состоянии пониженного энергопотребления. В режиме поиска доступных соединений потребляемая мощность равна $-48,2$ дБм. Максимальное значение средней потребляемой мощности наблюдается в режиме обмена пользовательскими сообщениями, где она достигает значения $-43,2$ дБм. Стоит отметить, что в режиме обмена пользовательскими сообщениями происходит увеличение энергопотребления также из-за работы световой и звуковой индикации, что является дополнительным фактором, влияющим на энергопотребление IoT метки.

Полученные в результате эксперимента данные позволяют рассчитать потребляемую в различных режимах работы мощность, используя формулу (1). Положим, коэффициент полезного действия передатчика равен $\eta = 0,6$. Как следует из экспериментальных данных, $P_{\text{ПРД}} = -42,4$ дБм, $P_{\text{ПРМ}} = -48,9$ дБм, а $P_{\text{СТАТ}} = -60$ дБм, $N_A = 1$. Измеренные значения мощности позволяют рассчитать потребляемую мощность от источника питания $P_{\text{ПИТ}} = -39,6$ дБм. Аналогичное исследование энергоэффективности было проведено для IoT метки, оснащенной встроенным модемом с версией Bluetooth 4.0. В таблице 3 представлена сравнительная характеристика средней потребляемой мощности в различных режимах работы IoT метки с Bluetooth 5.2 и IoT метки с Bluetooth 4.0. Потребляемая мощность от источника питания для IoT метки с Bluetooth 4.0 при $P_{\text{ПРД}} = -39,4$ дБм, $P_{\text{ПРМ}} = -44$ дБм, $P_{\text{СТАТ}} = -50$ дБм равна $P_{\text{ПИТ}} = -36,2$.

Таблица 3 – Средняя потребляемая мощность IoT меток
Table 3 – Average power consumption of IoT tags

Режим работы IoT метки	Средняя потребляемая мощность, дБм	
	Bluetooth 4.0	Bluetooth 5.2
Режим обмена пользовательскими сообщениями	–35	–43,2
Режим поиска доступных соединений	–40,5	–48,2
Режим ожидания	–44	–48,7
Статический режим	–50	–60

Из проведенного сравнительного анализа потребляемой мощности IoT меток с версиями Bluetooth 4.0 и 5.2 можно сделать вывод, что устройство с версией 5.2 демонстрирует снижение потребления энергии от источника питания на 9 % по сравнению с устройством, использующим Bluetooth 4.0. Потребляемая мощность для версии 4.0 составляет –36,2 дБм, тогда как для устройства с версией 5.2 этот показатель равен –39,6 дБм. Выигрыш на 3,4 дБм в значении потребляемой от источника питания мощности позволяет говорить об увеличении срока службы одной батареи более чем в 2 раза при длительном использовании устройства, что подчеркивает важность выбора более энергоэффективных технологий в процессе проектирования и разработки устройств для Интернета вещей.

Заключение

Результаты экспериментальных исследований продемонстрировали, что энергоэффективность Bluetooth систем передачи информации в беспроводных сетях IoT напрямую зависит от режима работы беспроводного IoT сенсора. В разных режимах работы наблюдаются отличия в потреблении мощности. Сравнение беспроводного IoT сенсора на базе Bluetooth 4.0 продемонстрировало преимущество новой версии протокола Bluetooth 5.2 с точки зрения энергопотребления. Беспроводной IoT сенсор с Bluetooth 5.2 потребляет на 9 % меньше энергии, что способствует увеличению времени автономной работы устройств IoT и снижению их эксплуатационных расходов. При длительной работе беспроводных сенсоров в сетях IoT для повышения энергоэффективности требуется уменьшение времени пребывания сенсора в активном режиме работы, так как в данном случае средняя потребляемая мощность увеличивается на 5...9 дБм по сравнению со средней потребляемой мощностью как в режиме ожидания, так и в режиме поиска доступных соединений. Полученные результаты имеют практическую значимость для проектирования и эксплуатации энергоэффективных систем передачи информации в сетях Интернета вещей.

Одними из ключевых моментов при проектировании беспроводных сенсоров IoT являются адаптация методов кодирования данных, уменьшение частоты передачи и приема информации, а также уменьшение частоты обмена информацией между узлами сети. Уменьшение объема данных возможно путем изменения протокола передачи, а также выбора передаваемых параметров. Например, можно использовать бинарный протокол вместо текстового и избегать передачи неизменных идентификаторов устройства в каждом сообщении. Еще одним параметром, влияющим на энергоэффективность беспроводных сенсоров IoT, является размер передаваемых пакетов данных, который целесообразно выбирать в зависимости от сложности условий радиосвязи всех элементов сети, участвующих в передаче данных.

Оптимизация режимов работы, а также выбор компонентов с низким энергопотреблением позволяют существенно повысить автономность и надежность функционирования устройств. В дальнейшем может возникнуть необходимость в разработке новых или оптимизации существующих методов модуляции, а также в создании новых подходов к архитектуре приемопередающего тракта и алгоритмам управления цифровыми радиопередающими

устройствами. Это позволит достичь максимального времени работы от автономных источников питания. Реализация предложенных архитектур будет поддерживаться современной элементной базой радиоэлектроники, что создаст условия для дальнейшего повышения энергоэффективности IoT устройств.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (FSSN-2020-0003).

Библиографический список

1. **Карабанов С.М., Суворов Д.В., Сливкин Е.В., Лобан О.В., Безруких П.П., Белых С.С.** Исследование возможности использования технологии Интернета вещей в микрогрид на основе возобновляемых источников энергии // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2021. № 78. С. 162-170. DOI: 10.21667/1995-4565-2021-78-162-170.
2. **Singh U., Chana I.** Energy Efficient Solutions for IoT Based Applications, 2019 2nd International Conference on Intelligent Computing, Instrumentation and Control Technologies (ICICICT), Kannur, India, 2019, pp. 1287-1292.
3. **Штойфер Р.** Многокритериальная оптимизация. Теория, вычисления и приложения. М.: Радио и связь, 1992. 504 с.
4. **Паршин Ю.Н., Грачев М.В.** Сравнительный анализ алгоритмов поиска оптимального значения нагрузочных импедансов многоканальных радиосистем с взаимным влиянием // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2020. № 73. С. 10-18. DOI: 10.21667/1995-4565-2020-73-10-18.
5. **Кириллов С.Н., Лисничук А.А.** Многокритериальный синтез сигнально-кодовых конструкций на основе зависимых сигналов для адаптации радиосистем передачи информации к действию узкополосных помех // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2017. № 62. С. 3-12. DOI: 10.21667/1995-4565-2017-62-4-3-12.
6. **Kim N. S. et al.** Leakage current: Moore's law meets static power, IEEE Computer, December 2003, vol. 36, no. 12, pp. 68-75. DOI: 10.1109/ MC.2003.1250885
7. **Паршин Ю.Н., Паршин А.Ю., Грачев М.В.** Таксономический анализ энергоэффективной системы передачи информации IoT // Цифровая обработка сигналов. 2022. № 4. С. 45-49.
8. **Вычужанин В.В.** Минимизация энергопотребления проектируемых устройств на ПЛИС типа FPGA // Современная электроника. 2011. №4. С. 58-61.
9. **Magdy A., Ibrahim S., Khalil A. H., Mostafa H.** Low Power, Dual Mode Bluetooth 5.1/Bluetooth Low Energy Receiver Design, 2021 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), Daejeon, Korea, 2021, pp. 1-5.
10. **Townsend K., Cufi C., Akiba, Davidson R.** Getting Started with Bluetooth Low Energy. USA: O'Reilly Media. 2014. 272 p. ISBN: 978-1-491-94951-1.

UDC 621.396.49

ANALYSIS OF METHODS AND ALGORITHMS FOR DESIGNING ENERGY-EFFICIENT WIRELESS IOT SENSORS

M. V. Grachev, Ph.D. (Tech), associate professor, department of radio engineering devices, RSREU, Ryazan, Russia;

orcid.org/0000-0003-1725-9257, e-mail: grachev.m.v@rsrue.ru

A. A. Titov, master's degree student, RSREU, Ryazan, Russia;

orcid.org/0009-0004-1853-6150, e-mail: andrey.titov75@mail.ru

The problem of increasing the energy efficiency of wireless IoT sensors is considered. The task is to find the optimal combination of operating modes of wireless IoT sensor to ensure the highest energy efficiency. The aim of the work is to increase energy efficiency of autonomous wireless IoT sensors by optimizing the operating modes of its receiving and transmitting module. In order to identify the operating modes of RIoT wireless sensor, as well as to assess the level of power consumption in various operating modes, the study of

wireless IoT Bluetooth tag is conducted. A comparative analysis of operating modes, as well as power consumption of IoT tags with Bluetooth 4.0 and 5.2 versions is carried out. The results obtained are of practical importance for the design and operation of energy-efficient information transmission systems of the Internet of Things network.

Keywords: information transmission system, energy efficiency, IoT, Bluetooth Low Energy, power consumption.

DOI: 10.21667/1995-4565-2024-90-3-13

References

1. Karabanov S.M., Suvorov D.V., Slivkin E.V., Loban O.V., Bezrukikh P.P., Belykh S.S. Investigation of the possibility of using Internet of Things technology in microgrid based on renewable energy sources. *Vestnik Rjazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2021, no. 78, pp. 162-170 (in Russian). DOI: 10.21667/1995-4565-2021-78-162-170.
2. Singh U., Chana I. Energy Efficient Solutions for IoT Based Applications, 2019 2nd International Conference on Intelligent Computing, Instrumentation and Control Technologies (ICICT), Kannur, India, 2019, pp. 1287-1292.
3. Steuffer R. *Multi-criteria optimization. Theory, calculations and applications*. Moscow: Radio and communications. 1992. 504 p. (in Russian).
4. Parshin Yu.N., Grachev M.V. Comparative analysis of algorithms for finding the optimal value of load impedances of multichannel radio systems with mutual influence. *Vestnik Rjazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2020, no. 73, pp. 10-18 (in Russian). DOI: 10.21667/1995-4565-2020-73-10-18.
5. Kirillov S.N., Lisnichuk A.A. Multicriteria synthesis of signal-code structures based on dependent signals for the adaptation of radio information transmission systems to the action of narrowband interference. *Vestnik Rjazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2017, no. 62, pp. 3-12 (in Russian). DOI: 10.21667/1995-4565-2017-62-4-3-12.
6. Kim N.S. et al. Leakage current: Moore's law meets static power, *IEEE Computer*, December 2003, vol. 36, no. 12, pp. 68-75. DOI: 10.1109/MC.2003.1250885
7. Parshin Yu.N., Parshin A.Yu., Grachev M.V. Taxonomic analysis of an energy efficient IoT information transmission system. *Digital signal processing*. 2022, no. 4, pp. 45-49 (in Russian).
8. Vyshuzhanin V.V. Minimization of power consumption of the designed devices on PLIC type FPGAs. *Modern electronics*. 2011, no. 4, pp. 58-61. (in Russian).
9. Magdy A., Ibrahim S., Khalil A. H., Mostafa H. Low Power, Dual Mode Bluetooth 5.1/Bluetooth Low Energy Receiver Design, 2021 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), Dae-gu, Korea, 2021, pp. 1-5.
10. Townsend K., Cufi C., Akiba, Davidson R. *Getting Started with Bluetooth Low Energy*. USA: O'Reilly Media. 2014. 272 p. ISBN: 978-1-491-94951-1.