

Приложение к отчету о выполнении проекта № 19-08-01215 «Теоретические основы двунаправленной беспроводной передачи энергии и алгоритмы построения автоматического перераспределения энергоресурсов в группе роботов» в 2019 году

Согласно утвержденному плану, в 2019 году были выполнены следующие основные задачи проекта:

1. Анализ современного состояния проблемы беспроводной передачи энергии и перераспределения ресурсов между автономными робототехническими средствами, охватывающий существующие на сегодняшний день российские и зарубежные решения.

Применение новых вычислительно эффективных инструментов и методов, нацеленных на улучшение координации работы роя роботов для совместного выполнения задач, является важным направлением исследований в роевой робототехнике. Одним из критериев оценки функционирования роя является его энергоэффективность, которая связана со временем автономной работы как одного робота, так и роя в целом.

В связи с ограниченным энергетическим ресурсом автономных робототехнических средств (АРС) в контексте повышения энергоэффективности роевых систем на сегодняшний день актуальными являются задачи оптимизации процессов распределения и передачи энергоресурсов между АРС, а также задачи оптимизации маршрутов движения АРС при выполнении роевой системой целевых действий.

Решение задачи оптимизации траекторий и маршрутов движения АРС, входящих в состав роевой системы, предполагает разработку управляющих модулей поиска и построения кратчайших маршрутов движения АРС на целевые позиции. Существующие исследования [1], [2] направлены на снижение совокупных энергозатрат роевой системы при выполнении АРС целевых действий за счет оптимизации процессов планирования маршрутов и траекторий движения отдельных АРС. Однако данные методы не предполагают решения проблемы поддержания уровня заряда АРС в процессе выполнения ими поставленных задач. Снижение уровня заряда устройств ниже порогового значения может привести не только к замедлению, но и к полной приостановке деятельности всей роевой системы в целом. Таким образом, для достижения энергоэффективности роевых систем, решения задачи оптимизации траекторий и маршрутов движения АРС должны использоваться совместно с решениями, направленными на оптимизацию процессов распределения и передачи энергии между АРС с целью поддержания уровня их заряда на требуемом уровне.

Согласно результатам проведенного анализа современного состояния исследований в данной области, существует несколько решений проблемы распределения и передачи энергии между компонентами роевой системы (рисунок 1):



Рисунок 1 – Классификация методов распределения ресурсов между компонентами роевой системы

1. замена разряженной аккумуляторной батареи (АКБ) АРС на док-станции [3];
2. замена разряженной АКБ другим агентом роя [4];
3. передача энергии между АРС (подходы, основанные на принципах социального поведения) на проводной и беспроводной основе;
4. передача энергии АРС от док-станции на проводной и беспроводной основе.

Распределение энергии между роботами и управление пополнением энергии АРС может осуществляться на сервере, куда от каждого устройства поступает радиочастотный сигнал, содержащий информацию о текущем уровне энергии и местоположении [5]. В этом случае запас энергии робота описывается вероятностным уравнением. После определения энергетического статуса АРС централизованная система управления определяет варианты обмена АКБ. В случае распределенной системы управления АРС обмениваются информацией между собой. Сервер анализирует полученный сигнал, определяет робота с низким уровнем заряда и рассчитывает координаты места встречи данного робота с полностью заряженным АРС. В случае, если встреча не состоится, сервер направляет разряженного робота на док-станцию для замены батареи при условии, что его уровня заряда достаточно, или переводит его в режим ожидания до прибытия робота с заряженной батареей.

При децентрализованном управлении АРС для распределения задач и пополнения заряда АРС может быть использован пчелиный алгоритм [6]. В этом случае агенты роя разделены на роботов-работников и роботов-фуражиров в зависимости от энергетического статуса. Роботы-работники выполняют назначенные задачи, пока их уровень энергии выше порогового значения, после чего автономно осуществляют поиск док-станции. Информация о местоположении зарядной станции поступает от робота-фуражира и передается другим мобильным роботам посредством локальной сети связи. Результат тестирования показывают, что роботы способны непрерывно работать, перезаряжаться и возвращаться к задачам самостоятельно без участия человека.

Другим подходом к увеличению времени автономной работы АРС на основе принципов социального поведения является использование алгоритма Fish Swarm [7]. При снижении уровня заряда ниже порогового значения робот переходит в режим поиска зарядной станции или получает энергию от другого участника роя, уровень энергии которого выше порогового значения. Альтруистический подход к распределению энергии между роботами позволяет уменьшить общее количество потребляемой роем энергии [8], [9]. Данный метод является расширенным вариантом метода роя частиц [10] и предназначен для распределения задач и планирования движением агентов роя с учетом их энергетического состояния. В результате этого более энергоемкие задачи назначаются роботам с более высоким уровнем энергии. Такой метод позволяет выровнять энергетическую нагрузки в рое и повысить количество возможных миссий, который может выполнить рой.

Перспективным решением задачи распределения энергии в группе роботов является использование беспроводных систем передачи энергии (БСПЭ). Технология беспроводной передачи энергии позволяет осуществлять пополнение заряда аккумуляторов роботов во время движения. Так в работе [11] описана беспроводная система питания мобильного сельскохозяйственного робота, работающая в резонансном режиме при напряжении [0,5; 500] кВ и частоте [0,1; 100] кГц. Передача энергии осуществляется через высокочастотный преобразователь и однопроводниковую подземную линию. Для обеспечения бесконтактного пополнения энергии наземного электротранспорта как во время движения, так и во время стоянки авторами работы [12] предложена модель Интернета энергии для координации взаимодействия системы управления транспорта, дорожной инфраструктуры и зарядных устройств.

В [13] БСПЭ используется совместно с манипулятором для замены аккумуляторных батарей (АКБ) мобильных роботов. Результаты экспериментов показали, что пиковый ток

заряда батареи составил 725 мА. Время пополнения заряда АКБ емкостью 4000 мАч составляет около 8 часов при средней эффективности передачи энергии 46,4%.

На основании рассмотренных работ можно выделить два направления исследований, нацеленных на решение проблемы ограниченного времени автономной работы роботов: оптимизация маршрутов движения и разработка подходов перераспределения энергии в группе роботов. Использование метода роя частиц и его вариаций для построения оптимальных с точки зрения энергопотребления траекторий движения позволяет достичь уменьшения энергозатрат всего роя, однако данные методы не акцентированы на решении проблемы пополнения уровня заряда АРС. Подходы, основанные на замене АКБ, решают данную проблему и предполагают введение в рой агентов, выполняющих роль доставщиков, оснащенных манипуляторами, однако в этом случае отсутствует возможность частичного пополнения заряда. Данного недостатка лишены подходы, основанные на принципах социального поведения, предполагающих обмен энергией между агентами. Наиболее перспективными являются те из них, при которых каждый робот способен как отдавать часть заряда, так и принимать. Данная идея может быть реализована при помощи технологии беспроводной передачи энергии. Российские исследования, представленные в обзоре, не рассматривают возможность передачи энергии между роботами, а описывают только методы беспроводного пополнения заряда устройств от док-станции. Таким образом, для решения проблемы перераспределения энергии в рое роботов необходимо разработать систему двунаправленной беспроводной передачи энергии между АРС, которая позволит увеличить время автономной работы агентов без необходимости переназначения задач.

2. Анализ методов, технологий и технических решений перераспределения ресурсов между автономными робототехническими средствами.

Беспроводная передача энергии (БПЭ) – это перспективная технология с растущим числом потенциальных прикладных решений для передачи энергии без использования соединительных проводов. БСПЭ, основанные на явлении электромагнитной индукции, имеют широкие возможности применения. Основными показателями работы таких систем является передаваемая мощность и эффективность передачи энергии. Значение передаваемой мощности влияет на время пополнения заряда элементов питания: чем больше передаваемая мощность, тем меньше время пополнения заряда.

Существует несколько стандартов передачи энергии, основанных на принципе резонанса в электрической цепи. Стандарт беспроводной передачи энергии Rezence [14] позволяет при помощи одной БСПЭ заряжать несколько устройств одновременно. Система работает на частоте 6,78 МГц и позволяет передавать энергию мощностью до 50 Вт. Для коммуникации между передающей и принимающей частями была использована технология Bluetooth Smart на частоте 2,4 ГГц. Эффективность системы составляет 25-50%, что ниже эффективности работы аналогичных стандартов

Система двунаправленной передачи энергии способна обеспечивать непрерывную работу группы АРС без необходимости замены разряженных АКБ. Примером подобной системы служит БСПЭ, представленная в [15]. Активная поверхность передающей стороны данной системы представлена LC-контуром и имеет размеры 60×60 см, что позволяет заряжать одновременно до пяти малогабаритных мобильных роботов. В качестве приемной части БСПЭ использована измерительная катушка индуктивности. Потребляемая мощность каждого робота составляет 200 мВт, средняя плотность передаваемой мощности – 4,1 мВт/см². Аналогичная зарядная площадка имеет размеры 30×40 см и включает в себя 12 катушек индуктивности, что позволяет малогабаритным АРС не прерывать работу для пополнения запаса энергии [16].

При разработке зарядных площадок, согласно [17], необходимо учитывать следующие требования: возможность пополнения заряда нескольких АРС одновременно,

генерируемое магнитное поле не должно нарушать работу робота, однородность магнитного поля. В работе [18] данные условия выполняются посредством выбора оптимальной относительно размера АРС площади активной поверхности. Для возможности одновременной передачи энергии четырем малогабаритным роботам e-ruck была разработана передающая сторона размером 16,8×16,8 см, при этом приемная катушка имеет квадратную форму и размеры 4,7×4,7 см.

Подобные зарядные площадки могут быть использованы для пополнения уровня заряда БЛА. Авторы [19], [20] разработали зарядные станции на основе матриц интеллектуальных контактов и плоских параллельных электродов, которые могут использоваться совместно с несколькими летательными аппаратами даже при условии неточной посадки.

При использовании док-станции одновременное пополнение заряда нескольких АРС также можно обеспечить за счет применения нескольких передающих катушек индуктивности и расщепления резонансной частоты [21]. В этом случае каждая катушка на первичной стороне БСПЭ будет заряжать своего робота. Расщепление частоты достигается при помощи двух наборов генераторной и передающих катушек. При передаче энергии от первой генераторной катушки, которая соединена с источником питания, к первой передающей катушке резонансная частота расщепляется на три значения. При последующей передаче энергии к вторым генераторной и передающей катушкам добавляется еще две резонансные частоты, что позволяет заряжать до пяти роботов одновременно.

Расширение области применения БСПЭ требует повышения эффективности передачи энергии и передаваемой мощности. Для решения данной задачи могут быть использованы:

1. метод изменения эквивалентного импеданса приемной стороны [22];
2. конструктивные решения катушек индуктивности;
3. различные электрические соединения элементов передающего и приемного контуров;
4. настройка контуров на резонансную частоту;
5. различные схемотехнические решения выпрямителя.

Эффективность передачи энергии БСПЭ зависит от конфигурации, взаимной ориентации катушек индуктивности и расстояния между передающей и приемной частями. Так в работах [23], [24] предложена БСПЭ, приемная часть которой содержит одну, а передающая часть — две катушки индуктивности. Оба колебательных контура представляют собой RLC-цепь. Предложенное схемотехническое решение было протестировано в среде трехмерного электромагнитного моделирования EMPro и в реальных условиях. Эффективность передачи энергии при тестировании в виртуальной среде составила 66,49%, при тестировании в реальных условиях — 61,01%.

Для повышения эффективности работы БСПЭ авторы работы [25] использовали дополнительный колебательный контур. Разработанная ими система передачи энергии U-WPT включает в себя передаточную, промежуточную и приемную катушки. Результаты тестирования показали, что предложенный подход позволил повысить эффективность с 8,27% до 74,83%. В работе [26] показано, что эффективность контуров при использовании катушки с ферритовым сердечником выше, чем в случае с катушкой с металлическим сердечником или катушки без экранирующего материала и составляет 91%.

Применение планарных катушек индуктивности также исследовано в работе [27]. Передающая часть БСПЭ представлена двухканальным передатчиком класса E. Максимальная эффективность передачи энергии составила 75,7% при передаваемой мощности 295 Вт и принудительном охлаждении системы. Максимальная передаваемая мощность при естественном охлаждении составила 69 Вт, а эффективность передачи энергии 74,2%.

На эффективность передачи энергии также влияет тип электрического соединения элементов передающего и приемного контуров. Существует четыре структуры

колебательных контуров, которые представляют собой различные комбинации схем первичных и вторичных сторон с последовательным и параллельным соединением L- и C-элементов. В работе [28] показан сравнительный анализ использования схем, в которых оба контура последовательные (П-П) или первичный контур имеет последовательное соединение, а вторичный – параллельное (П-Пр). В результате исследований было выявлено, что П-П структура более эффективна, чем последовательно-параллельная схема при малых значениях эквивалентного сопротивления нагрузки, и наоборот, при большом сопротивлении нагрузки КПД П-Пр схемы выше, чем при последовательном соединении элементов в колебательных контурах.

Исследование влияния типа соединения электрических элементов в колебательном контуре на эффективность работы БСПЭ также представлено в работе [29]. Разработанное устройство предназначено для пополнения заряда EDLC-конденсатора (ионистора), используемого в качестве источника питания гибридного велосипеда. Для выявления наиболее подходящего варианта соединения элементов контуров было проведено тестирование при следующих параметрах: дальность передачи энергии 50 мм, передаваемая мощность 100 Вт, сопротивление нагрузки равное 50 Ом, внешний диаметр передающей и приемной катушек составлял 200 мм. В процессе исследования было выявлено, что большую эффективность имеет система с параллельным соединением элементов в передающей части (72-73%) по сравнению с последовательным соединением, эффективность которого достигла 70% при частоте 2,3 МГц.

Увеличить дальность и эффективность передачи энергии также позволяет настройка частот передающего и принимающего контуров на резонансную частоту [30]. Для этого в работе [31] использовались цепи согласования комплексных сопротивлений элементов (Impedance Matching) для настройки резонансной частоты пары антенн при различных расстояниях между ними. Такой подход позволяет повысить эффективность работы системы от 50% до 70% в зависимости от расстояния между антеннами. Кроме этого, для настройки контуров на резонансную частоту могут быть использованы сосредоточенные конденсаторы, что также способствует расщеплению резонансной частоты для передач энергии двум приемным сторонам [32].

Общее значение эффективности работы системы передачи энергии также зависят от уровня выходной мощности и определяются потерями в катушке и преобразователе напряжения. Активный выпрямитель на приемной стороне БСПЭ предназначен для регулировки тока заряда АКБ и влияет на эффективность передачи энергии. Так в работе [33] БСПЭ включает в себя высокоэффективный активный выпрямитель и линейный регулятор напряжения с множественной обратной связью для реализации регулирования выходного напряжения, тока и защиты от перенапряжения. По результатам тестирования, максимальная эффективность активного выпрямителя составила 94,2% при токе нагрузки 800 мА.

В работе [34] использование управляемого по току активного выпрямителя позволило достичь эффективности в 77,6%. Другим схемотехническим решением вторичной стороны системы является использование полумостового активного выпрямителя, нижние диоды которого были заменены на синхронные вентили, управляемые ШИМ-сигналом [35]. Проверка работоспособности разработанного выпрямителя проводилась при помощи трансформатора без ферромагнитного сердечника с входным напряжением 120 В и диапазоном выходного напряжения от 0 до 95 В. В ходе проведения экспериментов максимальная эффективность передачи энергии составила 94,4%.

Таким образом, БПЭ позволяет избежать замены разряженных АКБ и прецизионной корректировки положения для возможности соединения APC между собой или с док-станцией. Существуют различные схемотехнические решения передающей и приемной сторон БСПЭ, которые нацелены на повышение эффективности передачи энергии. Общим для всех рассмотренных работ является отсутствие экранирующих электромагнитное поле

элементов, что может негативно повлиять на работу других устройств, расположенных вблизи БСПЭ, также для них характерны такие недостатки, как отсутствие системы безопасности, взаимодействия с пользователем, а также крайне ограниченный функционал системы управления, не предполагающий динамический контроль рабочих параметров и адаптивное управление режимами работы. Представленные БСПЭ предназначены лишь для передачи энергии АРС от док-станции и не могут быть использованы для обмена энергией между роботами. Недостатком такого подхода является необходимость прерывания рабочего процесса, для перемещения АРС на док-станцию и последующего его возвращения обратно на целевую точку, что увеличивает время выполнения поставленных задач в сравнении с решениями, при которых возможна двунаправленная беспроводная передача энергии напрямую между АРС.

При оценке работы беспроводных зарядных устройств помимо эффективности их работы необходимо учитывать значение передаваемой мощности, так как оно определяет время пополнения заряда элементов питания. Для представленных систем, несмотря на высокую эффективность, передаваемая мощность составляет лишь 50–96 Вт. Таким образом, при разработке БСПЭ важной задачей является не только повышение эффективности работы БСПЭ, но и увеличение передаваемой мощности посредством разработки схемотехнических и конструктивных решений передающей и приемной частей.

3. Разработка технологических основ беспроводной двунаправленной передачи энергии между автономными робототехническими средствами

Поскольку существующие решения имеют ряд значительных недостатков и не предназначены для обмена энергией напрямую между АРС, в рамках данного проекта предполагается разработать собственную двунаправленную БСПЭ. Зачастую БСПЭ включает в себя генератор, колебательный контур на передающей стороне и выпрямитель и колебательный контур на приемной стороне. Так как каждый элемент вносит вклад в эффективность работы устройства в целом, при проектировании БСПЭ, согласно результатам проведенных исследований, следует использовать комплексный подход, который предполагает разработку не только схемотехнических решений передающей части, но и катушек передающего и приемных контуров, выпрямителей, а также соответствующих систем и алгоритмов управления.

В ходе работы над проектом БСПЭ предполагается, что передающая часть системы должна включать в себя колебательный контур, силовой блок и систему управления, а приемная часть – силовой блок и колебательный контур. С целью поддержания резонансной частоты в качестве силового блока передающей части устройства следует использовать резонансный автогенератор. Для обеспечения контроля рабочих параметров, защиты от недопустимых режимов работы и вывода диагностических сообщений на дисплей требуется также разработать соответствующую систему управления. Выбор типа выпрямителя приемной части осуществлен на основе результатов сравнительного исследования синхронного и несинхронных выпрямителей. С целью улучшения настройки приемного и передающего контуров и упрощения процесса производства и сборки БСПЭ в целом предлагается использовать идентичные колебательные контуры. В совокупности такие решения позволят повысить эффективность и устойчивость работы беспроводного зарядного устройства во всех режимах эксплуатации.

Технологические основы передающей части БСПЭ

Для расширения функциональных возможностей в передающую часть БСПЭ помимо силового блока необходимо включить систему управления. В качестве силового блока предлагается использовать резонансный автогенератор с целью его запуска и контроля рабочей частоты. В соответствии с результатами проведенного анализа, опираясь, в частности, на исследование [35], предполагается использовать резонансный

автогенератор с переключением транзисторов при напряжении к нулю (Zero Voltage Switching, ZVS) с целью повышения эффективности работы беспроводного зарядного устройства в целом. В этом случае при изменении индуктивности катушки резонансная частота в передающем контуре будет поддерживаться резонансным автогенератором, частото задающим контуром которого является сам передающий контур. Такое решение позволит избежать разработки дополнительных систем подстройки частоты контура. Резонанс в передающем контуре предоставит возможность передавать в приемную часть максимально возможную мощность.

В рамках проекта в контексте разрабатываемой БСПЭ предполагается реализовать специализированную систему управления, которая будет обеспечивать взаимодействие с пользователем, контроль рабочих параметров и защиту от недопустимых режимов работы. В данном случае контролируемые параметрами являются: сила тока, потребляемого силовой частью, уровень питающего напряжения и частота работы автогенератора. В качестве центрального элемента системы управления предлагается использовать микроконтроллер Atmel ATmega328P [37]. При помощи микроконтроллера будет осуществляться управление силовым блоком, контроль работы алгоритмов защиты системы, а также вывод на дисплей текущих рабочих параметров и диагностических сообщений.

Технологические основы приемной части БСПЭ

Приемная часть разрабатываемой БСПЭ включает в себя колебательный контур и силовой блок. Переменный ток, индуцированный в приемном колебательном контуре, детектируется выпрямителем и питает нагрузку. Силовой блок приемной части представлен синхронным выпрямителем и цепью плавного подключения нагрузки (рисунок 2).

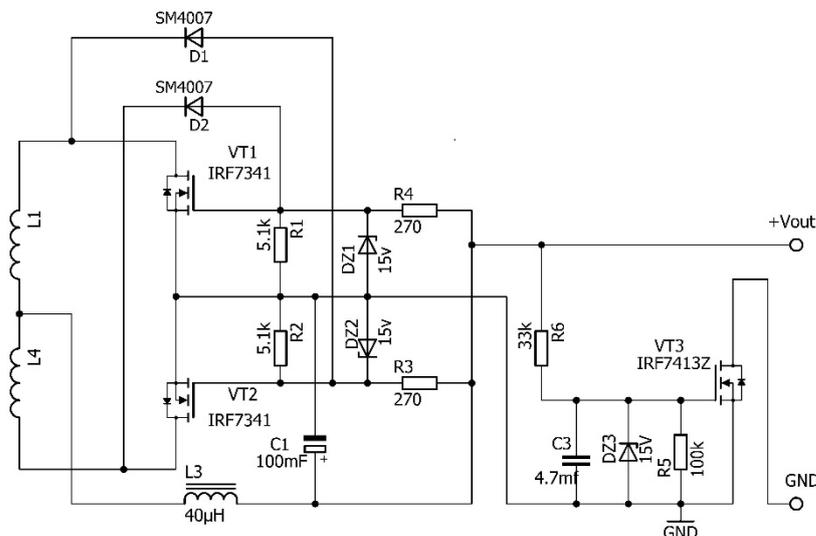


Рисунок 2 – Принципиальная схема приемной части

Синхронный выпрямитель реализован на транзисторах VT1 и VT2, а цепь плавного подключения нагрузки работает по принципу затягивания фронта открытия транзистора VT3.

Для обеспечения устойчивости работы вторичной стороны во всех режимах эксплуатации было проведено сравнительное исследование различных типов выпрямителей с целью выявления наиболее подходящего варианта для БСПЭ. Были исследованы синхронный выпрямитель на MOSFET-транзисторах, а также несинхронные выпрямители на диодах Шоттки и выпрямителя на Fast Recovery диодах. Силовая часть синхронного выпрямителя была выполнена по схеме инверсного включения транзисторов, при которой две противофазных обмотки создают двухфазный переменный ток со сдвигом между фазами 180° . Для выпрямления двухфазного переменного тока были использованы

два однополупериодных выпрямителя, включенных параллельно и работающих на общую нагрузку. Во время одного полупериода ток в нагрузку проходит с одной половины вторичной обмотки через внутренний диод транзистора, шунтированный открытым каналом транзистора. Система управления транзисторами отслеживает переходы фазного напряжения через нуль, и в заданные моменты времени производит отпирание перехода транзистора, тем самым шунтируя внутренний диод, так как сопротивление перехода исток-сток транзистора в состоянии насыщения меньше, чем дифференциальное сопротивление внутреннего диода.

Для сравнения потерь в синхронном выпрямителе и несинхронных выпрямителях на неуправляемых вентилях был проведен анализ внешних характеристик источника с различными выпрямителями. В качестве источника питания для проведения эксперимента использовался сетевой трансформатор мощностью 60 Вт со вторичной обмоткой, имеющей отвод от середины.

Результаты проведенных экспериментов позволяют сделать вывод о том, что с увеличением тока нагрузки разность между выходным напряжением различных выпрямителей изменяется незначительно. Это говорит о том, что кривые внешних характеристик на данном интервале значений тока нагрузки будут практически параллельными. Меньшее значение напряжения тока холостого хода синхронного выпрямителя по сравнению с несинхронными аналогами обусловлено током потребления схемы управления силовыми транзисторами и измерением выходного напряжения по его амплитудному значению. На основе полученных данных были проведены расчеты разности потерь мощности в выпрямителях различного типа. При выпрямленном токе от 6 до 8 А потери мощности на диодах с барьером Шоттки в среднем выше на 2,73 Вт, а в выпрямителе с Fast Recovery диодами – на 4,2 Вт, чем у синхронного выпрямителя. Меньшие потери мощности в синхронных выпрямителях являются следствием меньшего значения сопротивления канала открытого MOSFET-транзистора, по сравнению с дифференциальным сопротивлением p-n перехода диодов.

Для сравнения статических потерь на вентиле выпрямителя были сняты зависимости падения напряжения на вентиле от прямого тока через вентиль. Полученные результаты показывают более низкое падение напряжения на ключе синхронного выпрямителя по сравнению с несинхронными аналогами. С ростом прямого тока через вентиль отношение потерь несинхронных выпрямителей к потерям в синхронном выпрямителе снижается. Так, при токе 1 А мощность потерь на диоде с барьером Шоттки в 97 раз больше, чем на вентиле синхронного выпрямителя, а при токе 14 А – в 8 раз. Для Fast Recovery диода при токе 1 А потери больше в 197 раз, а для тока 14 А – больше в 13 раз. Таким образом, синхронный выпрямитель имеет меньшие потери мощности, меньшие габариты и массу по сравнению с выпрямителями на диодах Шоттки и на Fast Recovery диодах. Его применение целесообразно для сокращения размеров приемной части беспроводного зарядного устройства, увеличения КПД, снижения тепловыделения. Использование синхронного выпрямителя позволит отказаться от радиаторов охлаждения для вентилях, что значительно уменьшит габариты устройства.

Предполагается, что приемная и передающая части БСПЭ будут иметь идентичные колебательные контуры, что позволит избавиться от дополнительных систем подстройки приемного контура для поддержания в нем резонансной частоты. Поскольку взаимное расположение приемной и передающей частей устройства в одинаковой мере влияет на индуктивность и добротность колебательных контуров приемной и передающей частях, а передающий контур является частотоподающим, то оба контура системы передатчик – приемник будут находиться в резонансе. Это позволит добиться наилучших показателей эффективности и передаваемой мощности при любом взаимном расположении приемной и передающей частей устройства. Для упрощения процесса сборки устройства емкостные и индуктивные элементы обоих колебательных контуров следует соединять параллельно.

Повышение передаваемой мощности может сопровождаться значительным нагревом передающей контурной катушки, что является следствием высокого значения реактивного тока в колебательном контуре в совокупности с поверхностным эффектом [38], [39]. Для снижения влияния поверхностного эффекта необходимо провести исследование катушек, изготовленных из проводников различных форм и материалов: плоские медные, плоские из фольгированного стеклотекстолита и изолированные медные.

Для экранирования электромагнитных полей колебательных контуров системы корпуса обеих частей БСПЭ предлагается изготовить из алюминиевого сплава. Такое конструктивное решение позволит исключить негативное влияние на работу устройств, расположенных рядом с зарядным устройством. С целью предотвращения образования замкнутого контура тока предлагается разделить боковые экранирующие панели корпусов пластиковым изолятором. Использование идентичных материалов корпуса и электронных компонентов в передающей и приемной частях приведет к упрощению производства БСПЭ в целом.

Таким образом, в рамках проекта были определены технологические основы двунаправленной БСПЭ, которые позволят разработать решение, отличающееся повышенной эффективностью работы и уровнем передаваемой мощности по сравнению с аналогичными устройствами. Для обеспечения безопасной работы системы, контроля рабочих параметров, взаимодействия с пользователями в БСПЭ будет включена система управления на передающей стороне, основным элементом которой является микроконтроллер, соответствующие возможности качественно отличают разрабатываемую систему от аналогов. По результатам проведенного сравнительного исследования синхронного и несинхронных выпрямителей, для дальнейших работ было принято решение использовать синхронный выпрямитель. Использование синхронного выпрямителя в сравнении с несинхронными аналогами позволит обеспечить наибольшую эффективность работы за счет пониженных тепловых потерь и потерь мощности на открытом вентиле. Кроме того, его применение позволит частично решить проблему больших габаритов приемного модуля зарядного устройства. Также к преимуществам разрабатываемой системы можно отнести наличие экранирующих электромагнитное поле конструкций, которые позволят исключить негативное влияние на работу устройств, расположенных рядом с зарядным устройством, а использование идентичных материалов корпуса и электронных компонентов в передающей и приемной частях позволит упростить производство БСПЭ в целом.

Разрабатываемая БСПЭ является двунаправленной и предназначена для передачи энергии напрямую между агентами роя, что позволит: повысить качество решения задач роевыми системами за счет сокращения времени выполнения заданий; покрыть рою большие площади при выполнении работ благодаря снижению привязки к стационарным док-станциям. Предлагаемая БСПЭ будет интегрирована в роевую робототехническую систему путем установки ее компонентов непосредственно на отдельные АРС.

Перечень публикаций за 2019 год по результатам проекта

Подготовлено и опубликовано 3 статьи в высокорейтинговых изданиях, индексируемых в РИНЦ и SCOPUS/WoS:

1. Krestovnikov K., Cherskikh E., Ronzhin A. Mathematical Model of a Swarm Robotic System with Wireless Bi-directional Energy Transfer. Robotics: Industry 4.0 Issues & New Intelligent Control Paradigms. A. G. Kravets (ed.). Studies in Systems, Decision and Control, vol. 272, pp.13-23. DOI: 10.1007/978-3-030-37841-7_2 (Scopus, SJR = 0.13, Q4).

2. Krestovnikov K., Cherskikh E., Pavliuk N. Concept of a synchronous rectifier for wireless power transfer system // IEEE EUROCON 2019 -18th International Conference on Smart Technologies. IEEE. 2019. 5 p. DOI: 10.1109/EUROCON.2019.8861856. (WoS, Scopus).

3. Krestovnikov K., Saveliev A., Shabanova A., Vatamaniuk I. Comparative Study of Synchronous and Non-Synchronous Rectifiers for Use in the Receiving Part of a Wireless

Список литературы

1. Carrillo, M., Gallardo, I., Del Ser, J., Osaba, E., Sanchez-Cubillo, J., Bilbao, M. N., ... & Iglesias, A. (2018, May). A bio-inspired approach for collaborative exploration with mobile battery recharging in swarm robotics. In *International Conference on Bioinspired Methods and Their Applications* (pp. 75-87). Springer, Cham.
2. Mostaghim S., Steup C., Witt F. Energy aware particle swarm optimization as search mechanism for aerial micro-robots //2016 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI). – IEEE, 2016. – С. 1-7.
3. Ismail, A. R., Desia, R., & Zuhri, M. F. R. (2015). The initial investigation of the design and energy sharing algorithm using two-ways communication mechanism for swarm robotic systems. In *Computational Intelligence in Information Systems* (pp. 61-71). Springer, Cham.
4. Ngo, T. D., & Schioeler, H. (2006, June). Probabilistic distributed energy for long-lived group of mobile robots. In *2006 IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics* (pp. 1-6). IEEE.
5. Ngo, T. D., & Schioeler, H. (2006, June). Probabilistic distributed energy for long-lived group of mobile robots. In *2006 IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics* (pp. 1-6). IEEE.
6. Arif, A. F., Ramli, A. R., Samsudin, K., & Hashim, S. J. (2011, December). Energy management in mobile robotics system based on biologically inspired honeybees behavior. In *2011 IEEE International Conference on Computer Applications and Industrial Electronics (ICCAIE)* (pp. 32-35). IEEE.
7. Shen, Y., Jie, Z., Guo, B., & Hao, S. (2015, July). Energy-saving task assignment for robotic fish sensor network based on artificial fish swarm algorithm. In *2015 12th IEEE International Conference on Electronic Measurement & Instruments (ICEMI)* (Vol. 1, pp. 536-540). IEEE.
8. Shamsuddin, A. Z. M., Ahsan, T., Rahman, I., & Momen, S. (2016, December). Trophallaxis and energy optimization in swarms of robots. In *2016 19th International Conference on Computer and Information Technology (ICCIT)* (pp. 490-495). IEEE.
9. Zhou, X., & Kinny, D. (2013, November). Energy-Based Particle Swarm Optimization: Collective Energy Homeostasis in Social Autonomous Robots. In *Proceedings of the 2013 IEEE/WIC/ACM International Joint Conferences on Web Intelligence (WI) and Intelligent Agent Technologies (IAT)-Volume 02* (pp. 31-37). IEEE Computer Society.
10. Eberhart R., Kennedy J. Particle swarm optimization //Proceedings of the IEEE international conference on neural networks. – 1995. – Т. 4. – С. 1942-1948.
11. СТРЕБКОВ Д. С., БАШИЛОВ А. М., КОРОЛЕВ В. А. ЭЛЕКТРОМОБИЛЬНЫЕ РОБОТЫ В РАСТЕНИЕВОДСТВЕ //Международный научный журнал. – 2010. – №. 4. – С. 100-103.
12. Мещерякова О. В. и др. ПЕРСПЕКТИВЫ И ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТА С БЕСКОНТАКТНОЙ СИСТЕМОЙ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ //Инфокоммуникационные и интеллектуальные технологии на транспорте. – 2018. – С. 235-241.
13. Zhang, J., Song, G., Li, Y., Qiao, G., & Li, Z. (2013). Battery swapping and wireless charging for a home robot system with remote human assistance. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 59(4), 747–755. doi:10.1109/tce.2013.6689685
14. Dubal P. Rezenec: wireless charging standard based on magnetic resonance //International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering. – 2015. – Т. 4. – №. 12. – С. 198-200.

15. Deyle T., Reynolds M. Surface based wireless power transmission and bidirectional communication for autonomous robot swarms //2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation. – IEEE, 2008. – С. 1036-1041.
16. Arvin F. et al. Perpetual robot swarm: long-term autonomy of mobile robots using on-the-fly inductive charging //Journal of Intelligent & Robotic Systems. – 2018. – Т. 92. – №. 3-4. – С. 395-412.
17. Chen, L. J., Tong, W. I. S., Meyer, B., Abdolkhani, A., & Hu, A. P. (2011, November). A contactless charging platform for swarm robots. In IECON 2011-37th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (pp. 4088-4093). IEEE.
18. Chen, L. J., Tong, W. I. S., Meyer, B., Abdolkhani, A., & Hu, A. P. (2011, November). A contactless charging platform for swarm robots. In IECON 2011-37th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (pp. 4088-4093). IEEE.
19. Фетисов В. С. и др. Наземные станции подзарядки электрических беспилотных летательных аппаратов на основе открытых контактных площадок //Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2014. – Т. 10. – №. 2.
20. Фетисов В. С., Ахмеров Ш. Р., Сизоненко Р. В. Оценка схем построения контактных устройств в посадочных платформах для подзарядки электрических БПЛА с вертикальным взлетом-посадкой //Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2015. – Т. 19. – №. 2 (68).
21. Narayanamoorthi R., Juliet A. V., Chokkalingam B. Frequency splitting-based wireless power transfer and simultaneous propulsion generation to multiple micro-robots //IEEE Sensors Journal. – 2018. – Т. 18. – №. 13. – С. 5566-5575.
22. Berger A. et al. A wireless charging system applying phase-shift and amplitude control to maximize efficiency and extractable power //IEEE Transactions on Power Electronics. – 2015. – Т. 30. – №. 11. – С. 6338-6348.
23. Skaik T. F., AlWadiya B. O. Design of wireless power transfer system with triplet coil configuration based on magnetic resonance // Istanbul University-Journal of Electrical & Electronics Engineering. – 2017. – Т. 17. – №. 1. – С. 3193-3199.
24. Yu C. et al. Research on resonance based wireless energy transfer device for small mobile equipments //2011 International Conference on Electrical Machines and Systems. – IEEE, 2011. – С. 1-3.
25. Sun Y., Ye Z. H. Power transfer efficiency analysis of U-WPT system //2016 Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility (AP EMC). – IEEE, 2016. – Т. 1. – С. 858-861.
26. Kim J. et al. Coil design and shielding methods for a magnetic resonant wireless power transfer system //Proceedings of the IEEE. – 2013. – Т. 101. – №. 6. – С. 1332-1342.
27. Low Z. N. et al. Design and test of a high-power high-efficiency loosely coupled planar wireless power transfer system //IEEE transactions on industrial electronics. – 2008. – Т. 56. – №. 5. – С. 1801-1812.
28. Chen H. X. et al. Study on High Efficient Electric Vehicle Wireless Charging System //IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – IOP Publishing, 2016. – Т. 40. – №. 1. – С. 012009.
29. Itoh J., Noguchi K., Orikawa K. System design of electric assisted bicycle using EDLCs and wireless charger //2014 International Power Electronics Conference (IPEC-Hiroshima 2014-ECCE ASIA). – IEEE, 2014. – С. 2277-2284.
30. Schuetz M. et al. A particle swarm optimizer for tuning a software-defined, highly configurable wireless power transfer platform //2015 IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTC). – IEEE, 2015. – С. 1-4.
31. Beh T. C. et al. Basic study of improving efficiency of wireless power transfer via magnetic resonance coupling based on impedance matching //2010 IEEE International Symposium on Industrial Electronics. – IEEE, 2010. – С. 2011-2016.

32. Cannon B. L. et al. Magnetic resonant coupling as a potential means for wireless power transfer to multiple small receivers. – Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2009.
33. Park Y. J. et al. A design of inductive coupling wireless power receiver with high efficiency Active Rectifier and multi feedback LDO regulator //2016 IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTC). – IEEE, 2016. – С. 1-4.
34. Gürbüz F., Sürgevil T., Boztepe M. Analysis and design of a secondary-side controlled active rectifier for wireless battery charging application //2017 10th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO). – IEEE. – С. 406-410.
35. Asa E. et al. A novel phase control of semi bridgeless active rectifier for wireless power transfer applications //2015 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). – IEEE, 2015. – С. 3225-3231.
36. Low Z. N. et al. Design and test of a high-power high-efficiency loosely coupled planar wireless power transfer system //IEEE transactions on industrial electronics. – 2008. – Т. 56. – №. 5. – С. 1801-1812.
37. Atmel ATmega328P DATASHEET, Rev.: 7810D–AVR–01/15. Atmel Corporation, 2015.
38. Китаев А. В. Магнитное поле проводников и их поверхностный эффект. – 2010.
39. Miller J. M. et al. Wireless power transfer //Oak ridge National Laboratory's Power Electronics Symposium. – 2011.