

К. Д. Крестовников, мл. науч. сотр., k.krestovnikov@iias.spb.su,

Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук (СПб ФИЦ РАН)

Алгоритмы управления двунаправленной беспроводной системой передачи энергии при перераспределении энергоресурсов в группе наземных роботов*

Возможность перераспределения энергетических ресурсов в группе наземных роботов позволяет увеличить площадь достижимого рабочего пространства и расширить функциональные возможности группы. Применение беспроводной системы передачи энергии (БСПЭ) для обмена энергетическими ресурсами между наземными роботами позволяет снизить требования к точности позиционирования и повысить надежность робототехнической системы. В данной работе рассматриваются алгоритмы мониторинга и управления двунаправленной БСПЭ при эксплуатации в составе наземного робота. Предложена структурная схема модуля двунаправленной БСПЭ для интеграции в систему управления робота, построенную по распределенным принципам. Разработанные алгоритмы учитывают специфику схемотехнических решений двунаправленной БСПЭ, реализованной с применением неуправляемого резонансного автогенератора. Апробация предложенных решений проведена на базе робототехнической платформы. В экспериментах рассматривается процесс пополнения энергетических ресурсов одного из роботов другим роботом. Энергия передается между роботами с одинаковыми Li-ion аккумуляторными батареями, имеющими номинальное напряжение 7,4 В и емкость 5 А·ч. Выполняется заряд батареи робота с уровня 50 % до уровня 90 % при различной точности позиционирования. При смещении 4 мм и расстоянии между приемной и передающей катушками 4 мм время заряда составило 48 мин, что на 5 % больше, чем при заряде проводным способом. Максимальное время заряда составило 57 мин при расстоянии между роботами 15 мм. Применение БСПЭ для энергетического обмена между наземными роботами или для заряда роботов на зарядной станции позволяет повысить автономность функционирования группы, так как даже при низкой точности позиционирования передача энергетических ресурсов выполняется успешно. Предлагаемые решения могут быть использованы для заряда батарей и реализации процессов перераспределения ресурсов в группах наземных и подводных роботов.

Ключевые слова: беспроводная передача энергии, групповое управление, алгоритмы управления, система управления робота, наземные роботы

Введение

Повышение автономности функционирования отдельных роботов и группы в целом является актуальной научно-исследовательской задачей [1–3]. Источником питания наземного робота, как правило, является аккумуляторная батарея. Также можно встретить роботов, на которых помимо аккумуляторной батареи предусмотрен иной источник энергии, например генератор на основе двигателя внутреннего сгорания, или применяются альтернативные источники энергии, такие как солнечные батареи. Перечисленные решения, как правило, устанавливаются на роботах больших размеров с высоким уровнем энергопотребления [4]. В отсутствие упомянутых источников энергии время автономной работы робота определяется его энергопотреблением и характеристиками батареи. Соответственно, время функционирования робота будет конечным. По оконча-

нии заряда батареи роботу необходимо осуществить пополнение энергетических ресурсов. Нередко решение данной задачи происходит либо с помощью человека, либо с использованием зарядных станций с контактными системами передачи энергии. Зарядная станция для робота с применением контактных пар является простым решением, однако ее использование не всегда надежно и возможно. Ранее в ряде работ авторами была представлена разработка двунаправленной беспроводной системы передачи энергии (БСПЭ) [5, 6]. Применение системы предполагалось для эксплуатации в составе робототехнических средств наземного и подводного базирования [7] для обеспечения заряда аккумуляторной батареи (АКБ) от зарядной станции или обмена энергетическими ресурсами между роботами группы. Интеграция БСПЭ в систему управления робота требует разработки соответствующих аппаратных и алгоритмических решений.

Алгоритмы управления приемной частью однонаправленной БСПЭ при заряде аккумуляторной батареи рассматриваются в работе [8]. В работе предлагаются режимы заряда с по-

*Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации № МК-3094.2022.1.6.

стоянным током и постоянным напряжением, основанные на управлении фазовым сдвигом управляемого выпрямителя, и стратегия оптимизации эффективности, основанная на согласовании динамического эквивалентного импеданса. Из результатов экспериментов, проведенных авторами, следует, что применение предлагаемого подхода позволяет повысить общую эффективность системы более чем на 2 %. Аналогичные задачи решаются в работах [9, 10].

Управление передаваемой мощностью БСПЭ рассматривается авторами работы [11]. Предлагаемые решения предназначены для заряда батарей электротранспорта. Суть разработанного подхода состоит в регулировании тока нагрузки и напряжения приемной части системы посредством управления параметрами преобразователя передающей части. Между частями системы реализован обмен данными, на основе которых регулируется передаваемая мощность. Проблема управления мощностью БСПЭ также рассматривается в работах [12, 13].

В статье [14] рассматривается алгоритм контроля мощности БСПЭ для снижения уровня электромагнитных помех. Авторы провели симуляцию в специализированном программном обеспечении, где определили уровень воздействия излучения БСПЭ с передаваемой мощностью 100 Вт на человека. Разработан алгоритм, который регулирует выходную мощность системы на основе информации о месте расположения человека относительно робота.

Подход к адаптивной регулировке частоты для поддержания уровня передаваемой мощности БСПЭ предложен в работе [15]. Авторы решают проблему расщепления частоты, при которой искажается форма кривой ЭДС в приемной катушке. Между приемной и передающей частями системы реализован обмен данными. В подходе применяется улучшенный алгоритм муравьиной колонии с помощью которого определяются параметры для максимизации передаваемой мощности в реальном времени.

На текущий момент исследования в области управления БСПЭ сосредоточены на разработке алгоритмов мониторинга и управления передаваемой мощностью однонаправленных систем. Авторы предлагают различные подходы для повышения эффективности передачи энергии, минимизации электромагнитных помех и увеличения передаваемой мощности. Предлагаемые в исследовательских работах алгоритмы мониторинга и управления БСПЭ не учи-

тывают особенностей эксплуатации системы, реализованной с применением в схемотехнических решениях неуправляемого резонансного автогенератора, частото задающим контуром которого является передающий резонансный контур. Также не рассматриваются вопросы интеграции двунаправленной БСПЭ в основную систему управления объекта эксплуатации. Применение двунаправленной БСПЭ для обмена энергетическими ресурсами между роботами требует разработки соответствующих алгоритмов и аппаратных решений для интеграции в основную систему управления роботом.

Архитектура системы управления и схемотехнические решения двунаправленной БСПЭ

В рамках данной работы эксплуатация двунаправленной БСПЭ рассматривается в составе группы автономных наземных роботов. Каждый робот имеет собственную систему управления (СУ), реализация которой возможна по распределенным принципам [16]. В указанной работе представлена архитектура распределенной централизованной системы управления и обобщенная структура модулей для ее реализации. Предлагаемая архитектура, обладающая свойствами масштабируемости и адаптируемости, состоит из трех уровней и может применяться для автономных робототехнических комплексов различного назначения и беспилотных аппаратов. Таким образом, контроль двунаправленной БСПЭ может осуществляться отдельным аппаратным модулем уровня устройств, структурная схема которого представлена на рис. 1.

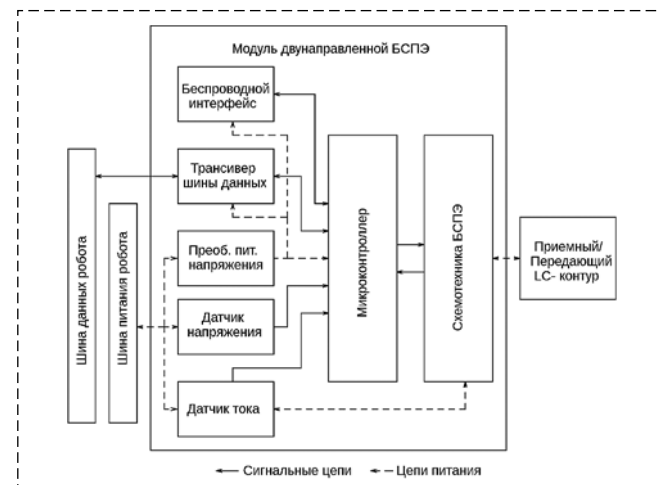


Рис. 1. Структурная схема модуля двунаправленной БСПЭ
Fig. 1. Block diagram of the bidirectional WPT-system module

Модуль двунаправленной БСПЭ имеет подключение к внутрисистемной шине данных робота и общей шине питания. Структурная схема модулей уровня устройств предполагает использование низкоуровневого вычислителя, в качестве которого применяется микроконтроллер. Обмен командами и сообщениями между модулем и высокоуровневым вычислителем системы управления робота осуществляется через внутрисистемную шину данных. Для этого модуль включает блок "трансивер шины данных", который обеспечивает аппаратную реализацию соответствующего интерфейса, а также выполняет функции согласования уровней сигналов и защиты. Блок "беспроводной интерфейс" необходим для реализации обмена рабочей информацией и параметрами между модулями двунаправленной БСПЭ, установленными в разных роботах. Реализация передачи данных между частями двунаправленной БСПЭ принципиально возможна с использованием базовых схемотехнических решений, но осложнена ввиду низкой рабочей частоты и использования неуправляемого резонансного автогенератора. Данная задача актуальна при эксплуатации БСПЭ в составе автономных необитаемых подводных аппаратов, однако для наземных роботов можно использовать существующие решения беспроводных интерфейсов передачи данных. Микроконтроллер, трансивер шины данных и беспроводной интерфейс, как правило, имеют уровни питающего напряжения, значительно отличающиеся от уровня напряжения источника питания робота, ввиду чего требуется использовать блок "Преобразователи питающего напряжения". Данный блок осуществляет формирование всех необходимых уровней напряжения внутри модуля. Датчики тока и напряжения необходимы для измерения рабочих параметров БСПЭ. При этом стоит отметить, что датчик тока должен иметь возможность измерения тока в любом направлении его протекания, так как рассматривается двунаправленная передача энергии.

Блок "схемотехника БСПЭ" представляет собой реализацию принципиальной электрической схемы, представленной в упрощенном виде на рис. 2.

На рис. 2 обозначены следующие блоки и цепи: 1 — приемный/передающий LC-контур; 2 — ключевой элемент; 3 — повышающий DC-DC-преобразователь; ТМ/РМ — электрическая цепь управления режимом работы;

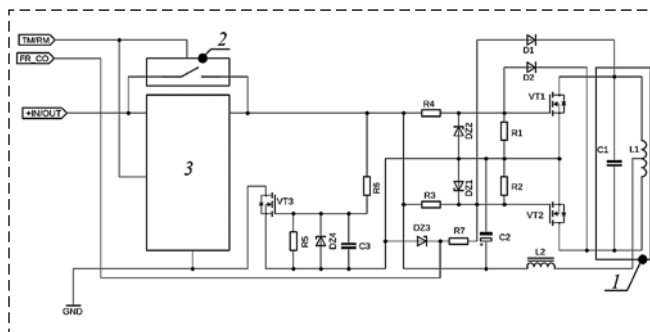


Рис. 2. Принципиальная схема двунаправленной БСПЭ
Fig. 2. Schematic diagram of bidirectional WPT-system

FR_CO — электрическая цепь контроля частоты; + IN/OUT — электрическая цепь питания.

Приемный/передающий LC-контур в соответствии со структурной схемой вынесен за пределы модуля. Цепь питания подключается к датчику тока модуля БСПЭ, а цепи управления режимом работы и контроля частоты — к микроконтроллеру. Микроконтроллер имеет возможность чтения сигнала с цепи контроля частоты и подачи сигнала в цепь выбора режима работы для управления ключевым элементом и повышающим DC-DC-преобразователем. При работе резонансного автогенератора в цепи контроля частоты присутствуют импульсы прямоугольной формы, частота которых пропорциональна рабочей частоте. Цепь выбора режима работы осуществляет переключение системы между передачей и приемом энергии. В режиме передачи энергии ключевой элемент позволяет протекать току от источника питания ко входу резонансного автогенератора, при этом выключается DC-DC-преобразователь. В режиме приема энергии DC-DC-преобразователь включен, а ключевой элемент разомкнут. Ток, выпрямленный резонансным автогенератором, который работает в данном режиме как синхронный выпрямитель, поступает на вход повышающего DC-DC-преобразователя.

Схемотехнические решения двунаправленной БСПЭ и принципы их работы подробно рассмотрены в предыдущих работах авторов [5, 6].

Алгоритмы функционирования модуля БСПЭ

Для описанной выше структурной схемы и принципов работы общий алгоритм функционирования модуля двунаправленной БСПЭ будет иметь вид, представленный на рис. 3. Программное обеспечение микроконтроллера

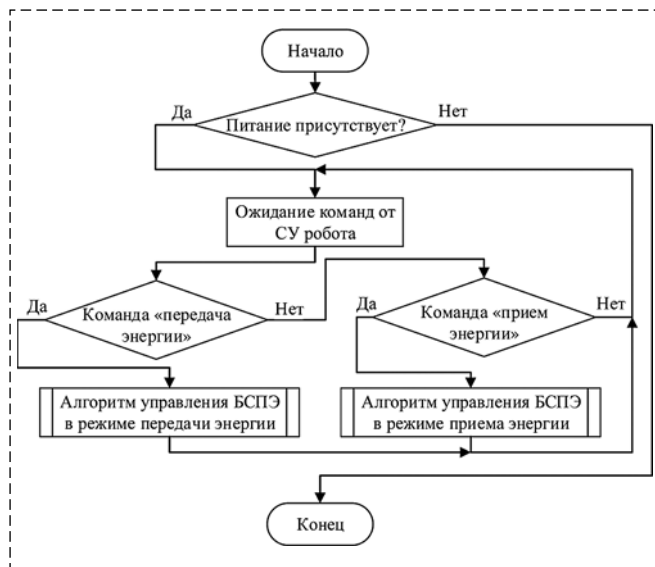


Рис. 3. Общий алгоритм функционирования модуля двунаправленной БСПЭ

Fig. 3. General algorithm for the functioning of the bidirectional WPT-system module

модуля двунаправленной БСПЭ функционирует в условно бесконечном цикле, пока присутствует питание микроконтроллера, что отражено в первом блоке алгоритма.

При наличии питания модуль БСПЭ ожидает команды от СУ робота. В случае поступления команды "передача энергии" функционирование модуля продолжается по алгоритму в режиме передачи энергии, блок-схема которого приведена на рис. 4. В случае поступления команды "прием энергии" модуль осуществляет работу по алгоритму, представленному на рис. 5.

На первом шаге алгоритма управления БСПЭ в режиме передачи энергии осуществляется проверка сигнала контроля частоты. В соответствии с описанием схемотехнических решений сигнал в цепи контроля частоты позволяет определить текущий режим работы части системы, которая установлена в другом роботе и должна принимать энергию. Если до начала передачи энергии в данной цепи присутствует сигнал с импульсами прямоугольной формы и в заданном диапазоне частот, то из этого следует, что часть БСПЭ, установленная в другом роботе, которая должна принимать энергию, в текущий момент осуществляет ее передачу. В данном случае запуск невозможен, так как может вызвать повреждение силовых электронных компонентов БСПЭ. Если запуск невозможен, то СУ робота отправляется соответствующее сообщение, после чего вложенный алгоритм завершает свою работу, а в общем алгоритме

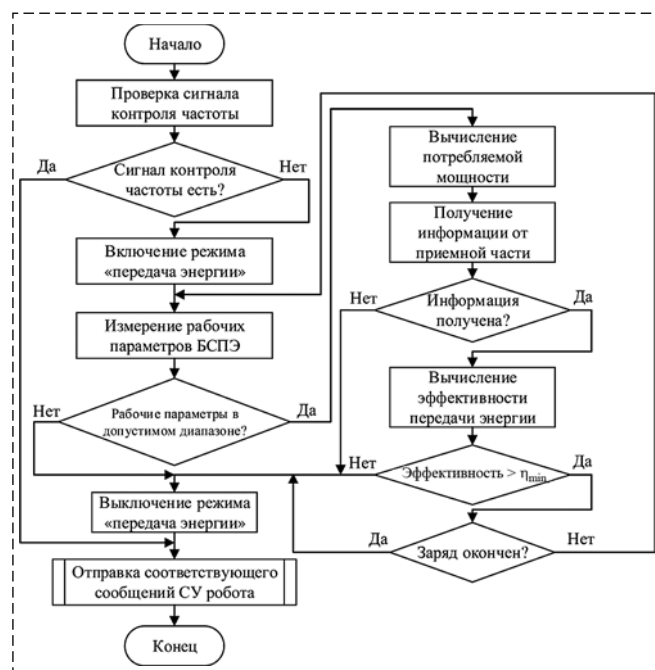


Рис. 4. Алгоритм управления БСПЭ в режиме передачи энергии

Fig. 4. Algorithm for the operation of WPT-system in the power transmission mode

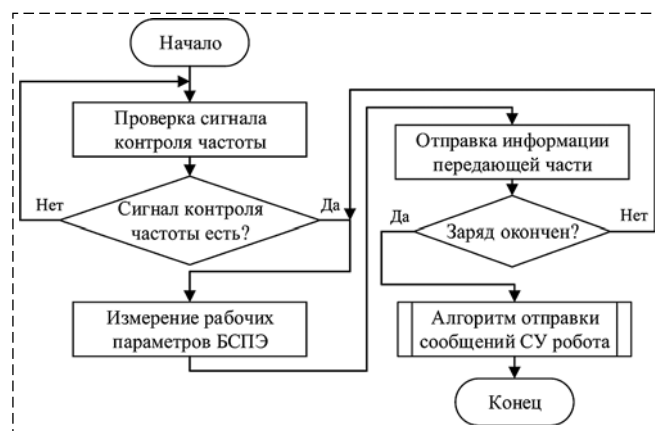


Рис. 5. Алгоритм управления БСПЭ в режиме приема энергии

Fig. 5. Algorithm for the operation of WPT-system in the power receiving mode

происходит переход к ожиданию команд. Сообщения, отправляемые СУ робота от модуля двунаправленной БСПЭ, соответствующие им параметры и условия представлены в табл. 1.

В случае отсутствия соответствующего сигнала в цепи контроля частоты включается режим передачи энергии и происходит измерение рабочих параметров БСПЭ. Если параметры находятся в допустимом диапазоне, то вычисляется потребляемая мощность, для того чтобы осуществить дальнейший расчет эффективности передачи энергии. Для расчета эффективности передачи энергии необходима информация от приемной части системы о значении напряже-

ния и тока нагрузки в текущий момент. В случае, если информация от приемной части не получена, режим передачи энергии выключается, СУ робота отправляется соответствующее сообщение, и происходит переход к ожиданию команд в основном алгоритме. Если эффективность энергии больше минимального заданного значения, то выполняется проверка уровня заряда аккумуляторной батареи, информация о котором предоставляется приемной частью системы. Пока процесс заряда не завершен, а все рабочие параметры и эффективность передачи энергии находятся в допустимом диапазоне, работа системы в режиме передачи продолжается с циклической проверкой данных параметров. По окончании процесса заряда модуль двунаправленной БСПЭ отправляет соответствующее сообщение (табл. 1) СУ робота.

Функционирование модуля осуществляется в режиме приема энергии при получении соответствующей команды от СУ робота.

Основными операциями алгоритма (рис. 5) являются измерение рабочих параметров БСПЭ и отправка этой информации на передающую часть. По окончании заряда модуль информирует СУ робота, а алгоритм управления БСПЭ в режиме приема энергии завершает свою работу.

Параметры в табл. 1 для режима передачи энергии имеют следующие значения: I_{\min} — минимальное значение силы тока потребле-

ния; I_{\max} — максимальное значение силы тока потребления; F_{\max} — максимальное значение рабочей частоты; U_{\min} — минимальное значение напряжения питания; η_{\min} — минимальное значение эффективности передачи энергии.

В представленных алгоритмах подразумевается, что модуль двунаправленной БСПЭ имеет питание от основного уровня напряжения робота, который соответствует напряжению АКБ робота. Критерием для определения окончания заряда может служить уровень напряжения, измеряемый частью БСПЭ, которая функционирует в режиме приема энергии. В гомогенной группе АКБ, а соответственно, и их параметры будут одинаковы. В этом случае оценку уровня заряда батареи робота, которому передается энергия, возможно осуществлять в модуле двунаправленной БСПЭ, который передает энергию.

Экспериментальная проверка

Наземная робототехническая платформа, представленная на рис. 6 (см. третью сторону обложки), предназначена для учебных и исследовательских задач в области группового управления и имеет размеры 220×220×195 мм. Для проведения экспериментов и апробации алгоритмов платформы оборудовались двунаправленной БСПЭ с максимальной передаваемой мощностью 45 Вт.

АКБ имеет номинальное рабочее напряжение 7,4 В и емкость 5 А·ч. Базовая комплектация платформы обеспечивает автономное движение по заранее заданному маршруту, преодоление препятствий, передачу видеопотока с обзорной камеры, распознавание различных маркеров с использованием камеры технического зрения [17].

Проведен ряд экспериментов, направленных на апробацию разработанных аппаратных и программных решений для энергетического обмена между роботами. Роботы функционировали в области рабочего поля, на котором кругами различных цветов были отмечены точки условных задач и точки обмена энергетическими ресурсами (рис. 7, см. третью сторону обложки).

Белыми кругами в области рабочего поля обозначены точки обмена энергетическими ресурсами. Роботы выполняли позиционирование в данных точках, и один из роботов передавал другому энергетические ресурсы по-

Таблица 1
Table 1

Сообщения модуля двунаправленной БСПЭ
Messages of the bidirectional WPT-system module

Условие	Сообщение
Режим передачи энергии	
Присутствует сигнал в цепи контроля частоты	"Передача не возможна"
Сила тока потребления $< I_{\min}$	"Нет нагрузки"
Сила тока потребления $> I_{\max}$	"Перегрузка"
Рабочая частота $> F_{\max}$	"Не номинальный режим работы"
Напряжение питания $< U_{\min}$	"Низкий заряд батареи"
Информация от приемной части отсутствует	"Нет связи с приемной частью"
Эффективность $< \eta_{\min}$	"Низкая точность позиционирования"
Заряд окончен	"Заряд окончен"
Режим приема энергии	
Заряд окончен	"Заряд окончен"

Таблица 2
Table 2

Смещения и расстояния между частями двунаправленной БСПЭ
Offsets and distances between parts of a bidirectional WPT-system

Эксперимент	Кривая Т	Кривая Т1	Кривая Т2	Кривая Т3
Расстояние, мм	0	4	7	15
Смещение, мм	0	4	13	4

средством двунаправленной БСПЭ. В табл. 2 представлены значения смещений и расстояний между приемной и передающей частями двунаправленной БСПЭ при проведении экспериментов. Значения приведены при измерении относительно оси, проходящей через центр плоской спиралевидной катушки резонансного контура.

Результаты экспериментов, в которых фиксировалось время заряда (t) АКБ платформы, представлены на рис. 8.

Режим заряда АКБ робота обеспечивается DC-DC повышающим преобразователем, который входит в состав модуля двунаправленной БСПЭ. Зарядный ток ограничен величиной 5 А, а конечное напряжение заряда составляет 8,4 В. Уровень заряда АКБ (C) на представленном графике показан в относительных единицах: $C = C_{pr}/C_{max} \cdot 100 \%$. Значение C_{pr} определяется исходя из напряжения элемента *Li-ion*-АКБ в соответствии с графиком кривой заряда [18]. Значение C_{max} соответствует максимальной емкости элемента батареи. В экспериментах рассматривается задача пополнения энергетических ресурсов одного из роботов другим роботом. Так как энергия передается между роботами с одинаковой АКБ, рассматривается заряд батареи с уровня 50 %

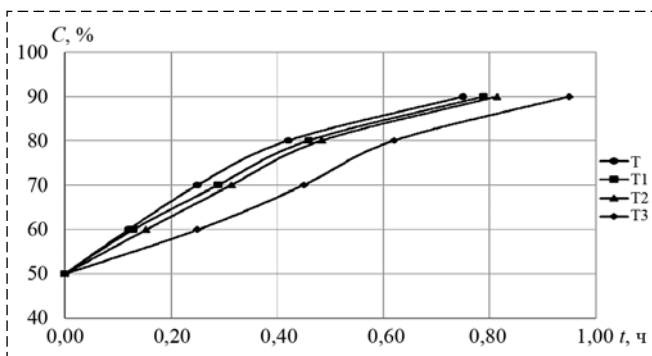


Рис. 8. Время заряда аккумуляторной батареи платформы в зависимости от точности позиционирования
Fig. 8. Platform battery charging time depending on positioning accuracy

до уровня 90 %, причем верхняя граница выбрана такой исходя из временных затрат. Обеспечение заряда *Li-ion*-АКБ с уровня 90 % до 100 % требует значительных временных затрат по сравнению с циклом заряда до 80...90 %. Кривая "Т" представляет собой вариант заряда АКБ, при котором БСПЭ не вносит никаких ограничений в скорость заряда. Соответственно, аналогичное время заряда будет при использовании контактного способа.

Общее время заряда при наличии расстояния и смещении между катушками, равного 4 мм, составляет 48 мин, что на 5 % больше, чем время заряда в идеальном случае. Снижение точности позиционирования увеличивает время заряда АКБ, так как снижается максимальная передаваемая мощность БСПЭ, а соответственно, падает зарядный ток. Максимальная разница во времени заряда по сравнению со случаем без смещений составила 12 мин и соответствует расстоянию между роботами 15 мм.

Заключение

Разработанные алгоритмы позволяют осуществлять управление и контроль двунаправленной БСПЭ. Использование БСПЭ рассматривается в составе распределенной системы управления автономного наземного робота. Предложенные алгоритмы реализуют функции защиты, которые учитывают специфику разработанных схемотехнических решений.

Получены результаты общего времени заряда АКБ платформ с уровня 50 % заряда до уровня 90 % для четырех вариантов точности позиционирования роботов. Минимальное время заряда батареи робота составило 45 мин и соответствует идеальному позиционированию роботов без расстояния и смещения между катушками. Время заряда при расстоянии между катушками БСПЭ, равном 4 мм, и осевом смещении 4 мм составляет 48 мин, что на 5 % больше, чем время заряда в идеальном случае или при использовании контактных способов. В двух других случаях при более низкой точности позиционирования время заряда составило 49 и 57 мин. Стоит отметить, что при использовании контактных способов передачи энергии роботу при данных расстояниях и смещениях заряд батареи был бы невозможен. Применение БСПЭ для энергетического обмена между наземными роботами

или для заряда роботов на зарядной станции позволяет повысить автономность функционирования группы, так как даже при низкой точности позиционирования передача энергетических ресурсов выполняются успешно.

Дальнейшие исследования будут направлены на разработку подхода к управлению передаваемой мощностью БСПЭ для повышения эффективности при обеспечении режима заряда батареи робота.

Список литературы

1. Даринцев О. В., Мигранов А. Б. Аналитический обзор подходов к распределению задач в группах мобильных роботов на основе технологий мягких вычислений // Информатика и автоматизация. 2022. № 4 (21). С. 729–757. DOI:10.15622/ia.21.4.4
2. Зенкевич С. Л., Назарова А. В., Хуа Ч. Моделирование и анализ движения группы мобильных роботов в среде ROS // Мехатроника, автоматизация, управление. 2017. № 18(5). С. 317–320. <https://doi.org/10.17587/mau.18.317-320>
3. Zakiev A., Tsoy T., Magid E. Swarm Robotics: Remarks on Terminology and Classification // Lecture Notes in Computer Science (incl. subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). 2018. Vol. 11097. P. 291–300.
4. Черских Е. О., Ерашов А. А., Быков А. Н. Анализ и классификация автономных робототехнических систем по параметру энергопотребления // Вестник ВГУ. Серия: Системный анализ и информационные технологии. 2021. № 2. С. 56–80. <https://doi.org/10.17308/sait.2021.2/3505>
5. Krestovnikov, K., Cherskikh, E., Saveliev A. Structure and Circuit Solution of a Bidirectional Wireless Power Transmission System in Applied Robotics // Radioengineering. 2021. Vol. 30, N. 1. P. 142–149. <https://doi.org/10.13164/re.2021.0142>
6. Krestovnikov K. D., Cherskikh E. O. Development of the structure and circuit solution of a bidirectional wireless energy transmission system for swarm robots // Serbian Journal of Electrical Engineering. 2021. Vol. 18, N. 2. P. 171–192. <https://doi.org/10.2298/SJEE2102171K>
7. Крестовников К. Д., Ерашов А. А., Савельев А. И. Подход к беспроводному заряду аккумуляторной батареи автономных необитаемых подводных аппаратов // Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 4. Часть 1. С. 144–155. <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.036>

8. Zhang M., Tan L., Li J., Huang X. The Charging Control and Efficiency Optimization Strategy for WPT System Based on Secondary Side Controllable Rectifier // IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 127993–128004. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3007444
9. Liu Y., Feng H. Maximum efficiency tracking control method for WPT system based on dynamic coupling coefficient identification and impedance matching network // IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics. 2019. Vol. 8, N. 4. P. 3633–3643. DOI: 10.1109/JESTPE.2019.2935219
10. Ishihara H. et al. A voltage ratio-based efficiency control method for 3 kW wireless power transmission // 2014 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition-APEC 2014. 2014. P. 1312–1316. doi: 10.1109/APEC.2014.6803476
11. Miller J. M., Onar O. C., Chinthavali M. Primary-side power flow control of wireless power transfer for electric vehicle charging // IEEE journal of Emerging and selected topics in power electronics. 2014. Vol. 3, N. 1. P. 147–162. DOI: 10.1109/JESTPE.2014.2382569
12. Chao Y. H., Shieh J. J., Pan C. T., Shen W. C., Chen M. P. A primary-side control strategy for series-parallel loosely coupled inductive power transfer systems // 2007 2nd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, Harbin, China. 2007. P. 2322–2327. DOI: 10.1109/ICIEA.2007.4318825
13. Li H. L., Hu A. P., Covic G. A., ChunSen Tang. A new primary power regulation method for contactless power transfer // 2009 IEEE International Conference on Industrial Technology. Churchill, VIC, Australia. 2009. P. 1–5. DOI: 10.1109/ICIT.2009.4939680
14. Kim S. M., Cho I. K., Moon J. I., Yoon J. H., Byun W. J., Choi H. D. System level power control algorithm in wireless power transmission for reducing EMF. // 2014 IEEE Wireless Power Transfer Conference, Jeju, Korea (South). 2014. P. 193–196. DOI: 10.1109/WPT.2014.6839580
15. Li Y. et al. Improved ant colony algorithm for adaptive frequency-tracking control in WPT system // IET Microwaves, Antennas & Propagation. 2018. Vol. 12, N. 1. P. 23–28.
16. Крестовников К. Д., Ерашов А. А. Разработка архитектуры и обобщенной структуры модулей распределенной системы управления робототехническими комплексами различного назначения // Робототехника и техническая кибернетика. 2022. Т. 10, № 3. С. 201–212. DOI: 10.31776/RTCS.10305
17. Zakiev A., Shabalina K., Tsoy T., Magid E. Pilot Virtual Experiments on ArUco and ArTag Systems Comparison for Fiducial Marker Rotation Resistance // Smart Innovation, Systems and Technologies. 2019. N. 154. P. 455–464. DOI:10.1007/978-981-13-9267-2_37
18. EEMB Co., Ltd. LIR18650 Lithium-ion Battery Datasheet. URL: <https://www.ineltro.ch/media/downloads/SAASItem/45/45958/36e3e7f3-2049-4adb-a2a7-79c654d92915.pdf>, 2010 (дата обращения: 5 мая 2023 г.)

Control Algorithms for a Bidirectional Wireless Power Transmission System at the Redistribution of Energy Resources in a Group of Ground Robots

K. D. Krestovnikov, k.krestovnikov@ias.spb.su,

St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS),

St. Petersburg, 199178, Russian Federation

Corresponding author: Krestovnikov K. D., Junior Researcher,
St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences,
St. Petersburg 199178, Russian Federation, e-mail: k.krestovnikov@ias.spb.su

Accepted on June 07, 2023

Abstract

Redistributing energy resources within a group of ground robots allows for an increase in the reachable workspace area and expands its functional capabilities. The use of wireless energy transfer systems for exchanging energy resources between

ground robots reduces the requirements for positioning accuracy and enhances the reliability of the robotic system. This study examines control and management algorithms for a bidirectional wireless energy transfer system when operating as part of a ground robot. A structural diagram of the bidirectional wireless energy transfer module is proposed for integration into the robot's control system, built on distributed principles. The developed algorithms take into account the specific features of the circuitry solutions of the bidirectional wireless energy transfer system, implemented using an uncontrolled resonant generator. The proposed solutions are tested on a robotics platform. The experiments focus on the process of replenishing the energy resources of one robot with another robot. Energy is transmitted between robots equipped with the same Li-ion battery, which has a nominal voltage of 7.4 V and a capacity of 5 A·h. The battery is charged from 50 % to 90 % capacity with different positioning accuracies of the robots. When there is a displacement of 4 mm and a distance of 4 mm between the receiving and transmitting coils, the charging time was 48 minutes, which is 5 % longer than the wired charging method. The maximum charging time reached 57 minutes with a distance of 15 mm between the robots. The use of bidirectional wireless power transfer for energy exchange between ground robots or for charging robots at a charging station enhances the autonomy of the group's operation, as energy transfer can be successfully achieved even with low positioning accuracy. The proposed solutions can be used for battery charging and resource redistribution processes in groups of ground and underwater robots.

Keywords: wireless power transmission, group control, control algorithms, robot control system, ground robots

For citation:

Krestovnikov K. D. Control Algorithms for a Bidirectional Wireless Power Transmission System at the Redistribution of Energy Resources in a Group of Ground Robots, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2023, vol. 24, no. 9, pp. 481–488 (in Russian).

DOI: 10.17587/mau.24.481-488

References

1. **Darintsev O., Migranov A.** Analytical Review of Approaches to the Distribution of Tasks for Mobile Robot teams Based on Soft Computing Technologies, *Informatics and Automation*, 2022, no. 21(4), pp. 729-757, <https://doi.org/10.15622/ia.21.4.4> (in Russian).
2. **Zenkevich S. L., Nazarova A. V., Hua Z.** Simulation and Analysis of the Movement of a Group of Mobile Robots in ROS, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 5, pp. 317–320, <https://doi.org/10.17587/mau.18.317-320> (in Russian).
3. **Zakiev A., Tsoy T., Magid E.** Swarm Robotics: Remarks on Terminology and Classification, *Lecture Notes in Computer Science (incl. subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 2018, vol. 11097, pp. 291–300.
4. **Cherskikh E. O., Erashov A. A., Bykov A. N.** Analysis and classification of autonomous robotic systems according to the energy consumption parameter, *Vestnik VGU. Series: System Analysis and Information Technologies*, 2021, no. 2, pp. 56–80, <https://doi.org/10.17308/sait.2021.2/3505> (in Russian).
5. **Krestovnikov K., Cherskikh E., Saveliev A.** Structure and Circuit Solution of a Bidirectional Wireless Power Transmission System in Applied Robotics, *Radioengineering*, 2021, vol. 30, no. 1, pp. 142–149, <https://doi.org/10.13164/re.2021.0142>.
6. **Krestovnikov K. D., Cherskikh E. O.** Development of the structure and circuit solution of a bidirectional wireless energy transmission system for swarm robots, *Serbian Journal of Electrical Engineering*, 2021, vol. 18, no. 2, pp. 171–192, <https://doi.org/10.2298/SJEE2102171K>
7. **Krestovnikov K. D., Erashov A. A., Savelyev A. I.** Approach to wireless battery charging of autonomous uninhabited underwater vehicles, *Marine Intelligent Technologies*, 2022, no. 4 part 1, pp. 144–155, <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.036>.
8. **Zhang M., Tan L., Li J., Huang X.** The Charging Control and Efficiency Optimization Strategy for WPT System Based on Secondary Side Controllable Rectifier, *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 127993–128004, DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3007444.
9. **Liu Y., Feng H.** Maximum efficiency tracking control method for WPT system based on dynamic coupling coefficient identification and impedance matching network, *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2019, vol. 8, no. 4, pp. 3633–3643, DOI: 10.1109/JESTPE.2019.2935219.
10. **Ishihara H., Moritsuka F., Kudo H., Obayashi S., Itakura T., Matsushita A., Mochikawa H., Otaka S.** A voltage ratio-based efficiency control method for 3 kW wireless power transmission, *2014 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition-APEC 2014*, 2014, pp. 1312–1316, DOI: 10.1109/APEC.2014.6803476.
11. **Miller J. M., Onar O. C., Chinthavali M.** Primary-side power flow control of wireless power transfer for electric vehicle charging, *IEEE journal of Emerging and selected topics in power electronics*, 2014, vol. 3, no. 1, pp. 147–162, DOI: 10.1109/JESTPE.2014.2382569.
12. **Chao Y. H., Shieh J. J., Pan C. T., Shen W. C., Chen M. P.** A primary-side control strategy for series-parallel loosely coupled inductive power transfer systems, *2007 2nd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, Harbin, China*, 2007, pp. 2322–2327, DOI: 10.1109/ICIEA.2007.4318825.
13. **Li H. L., Hu A. P., Covic G. A., ChunSen Tang.** A new primary power regulation method for contactless power transfer, *2009 IEEE International Conference on Industrial Technology, Churchill, VIC, Australia*, 2009, pp. 1–5, DOI: 10.1109/ICIT.2009.4939680.
14. **Kim S. M., Cho I. K., Moon J. I., Yoon J. H., Byun W. J., Choi H. D.** System level power control algorithm in wireless power transmission for reducing EMF, *2014 IEEE Wireless Power Transfer Conference, Jeju, Korea (South)*, 2014, pp. 193–196, DOI: 10.1109/WPT.2014.6839580.
15. **Li Y., Zhang C., Yang Q., Li J., Zhang Y., Zhang X., Xue M.** Improved ant colony algorithm for adaptive frequency-tracking control in WPT system, *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 2018, vol. 12, no. 1, pp. 23–28.
16. **Krestovnikov K. D., Erashov A. A.** Development of architecture and generalized structure of modules for a distributed control system for robotic complexes for various purposes, *Robotics and technical cybernetics*, 2022, vol. 10, no. 3, pp. 201–212, DOI: 10.31776/RTCJ.10305 (in Russian).
17. **Zakiev A., Shabalina K., Tsoy T., Magid E.** Pilot Virtual Experiments on ArUco and ArTag Systems Comparison for Fiducial Marker Rotation Resistance, *Smart Innovation, Systems and Technologies*, 2019, no. 154, pp. 455–464, DOI:10.1007/978-981-13-9267-2_37.
18. **EEMB Co., Ltd.** LIR18650 Lithium-ion Battery Data-sheet, available at: <https://www.ineltro.ch/media/downloads/SAAItem/45/45958/36e3e7f3-2049-4adb-a2a7-79c654d92915.pdf>, 2010 (Retrieved: May 5, 2023)