

Структура и схемотехническое решение двунаправленной беспроводной системы передачи энергии для роевых роботов

К. Д. Крестовников¹ ✉, А. В. Семенов², А. А. Ерашов¹

¹ Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук, Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук 14-я линия В.О., д. 39, г. Санкт-Петербург 199178, Российская Федерация

² Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, ул. Б. Морская, д. 67, г. Санкт-Петербург 190121, Российская Федерация

✉ e-mail: k.krestovnikov@iias.spb.su

Резюме

Цель исследования. Развитие роевых робототехнических систем и подходов к одновременному решению задачи группой роботов делает актуальным направление исследований, связанное с распределением энергетических ресурсов между агентами роя. Практическая реализация данных задач требует разработки систем, позволяющих осуществлять передачу энергии между агентами роя. Целью исследования является разработка структуры и схемотехнического решения двунаправленной беспроводной системы передачи энергии на основе резонансного автогенератора.

Методы. Проведен анализ существующих исследований и разработок двунаправленных систем передачи энергии индуктивным методом. Были рассмотрены такие параметры, как передаваемая мощность, эффективность, расстояние передачи энергии.

Результаты. Описан принцип работы разработанного схемотехнического решения в режиме приема и передачи энергии, приведена принципиальная электрическая схема и расчетные соотношения. Получены зависимости эффективности работы системы от передаваемой мощности и от расстояния передачи энергии. Наибольшее значение передаваемой мощности 15,4 Вт достигается при минимальном расстоянии между приемной и передающей частями системы. Наибольшая величина эффективности 59,91% достигается при передаваемой мощности 10,09 Вт.

Заключение. Разработанная структура и схемотехническое решение являются базой для реализации двунаправленной беспроводной системы передачи энергии. Предложенная структура, в составе которой используется повышающий DC-DC преобразователь, позволяет получать напряжение на выходе системы, работающей в режиме приема энергии, равное и выше напряжения источника питания системы, работающей в режиме передачи энергии. Применение представленного решения актуально для передачи энергии между автономными роботами, передачи энергии от источника питания к роботу и в обратном направлении.

Ключевые слова: двунаправленная беспроводная система передачи энергии; роевая робототехника; распределение энергетических ресурсов; резонансный автогенератор; передача энергии.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Финансирование: Исследования выполнены при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований: РФФИ 19-08-01215_А.

Для цитирования: Крестовников К. Д., Семенов А. В., Ерашов А. А. Структура и схемотехническое решение двунаправленной беспроводной системы передачи энергии для роевых роботов // Известия Юго-Западного государственного университета. 2021; 25(4): 84-103. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-4-84-103>.

Поступила в редакцию 15.10.2020

Подписана в печать 20.11.2021

Опубликована 20.12.2021

Structure and Circuit Design of a Bidirectional Wireless Power Transmission System for Swarm Robots

Konstantin D. Krestovnikov ¹ ✉, Aleksandr V. Semenov ², Aleksei A. Erashov ¹

¹ St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS),
St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences,
39, 14th Line, St. Petersburg 199178, Russian Federation

² St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation,
67, Bolshaya Morskaya str., St. Petersburg 190121, Russian Federation

✉ e-mail: k.krestovnikov@iias.spb.su

Abstract

Purpose of research. The development of swarm robotic systems and approaches to the simultaneous solution of the problem by a group of robots makes the direction of research related to the distribution of power resources between swarm agents topical. The implementation of these tasks requires the development of systems that make it possible to transfer power between swarm agents. The aim of the study is to develop the structure and circuit design of a bidirectional wireless power transmission system based on a resonant self oscillator.

Methods. The analysis of existing research and development of bidirectional power transmission systems by inductive method is carried out. The following parameters - transmitted power, efficiency, and power transmission distance were studied.

Results. The principle of operation of the developed circuit design in the mode of receiving and transmitting power is described, the schematic diagram and the design ratios are provided. The dependences of the efficiency of the system on the transmitted power and on the distance of power transmission are obtained. The highest value of the transmitted power of 15.4 W is achieved with a minimum distance between the receiving and transmitting parts of the system. The highest efficiency value of 59.91% is achieved with a transmitted power of 10.09 W.

Conclusion. The developed structure and circuit design are the basis for the implementation of a bidirectional wireless power transmission system. The proposed structure, which uses a step-up DC-DC converter, allows us to obtain a voltage at the output of a system operating in the power reception mode equal to and higher than the voltage of the power supply of the system operating in the power transmission mode. The application of this solution is relevant for the transfer of power between autonomous robots, the transfer of power from the power source to the robot and in the opposite direction.

Keywords: bidirectional wireless power transmission system; swarm robotics; distribution of power sources; resonant self oscillator; power transmission.

Conflict of interest. The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

Funding: The research was carried out with the support of the Russian Foundation for Fundamental Research: РФФИ 19-08-01215_A.

For citation: Krestovnikov K. D., Semenov A. V., Erashov A. A. Structure and Circuit Design of a Bidirectional Wireless Power Transmission System for Swarm Robots. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2021; 25(4): 84-103 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-4-84-103>.

Received 15.10.2020

Accepted 20.11.2021

Published 20.12.2021

Введение

В настоящее время активно развивается направление роевой робототехники, в котором отдельных мобильных автономных роботов объединяют в группы для совместного решения определенных задач [1-3]. Зачастую при решении задач группой роботов критерием качества является конечное время их выполнения [4]. Ограниченный ресурс источника питания одного робота делает целесообразным использование подхода с перераспределением энергетических ресурсов внутри группы [5, 6], так как позволяет снизить затраты времени, необходимые для возврата агентов роя к точкам пополнения запаса энергии. Осуществить передачу электрической энергии между агентами роя можно с помощью контактных методов, но в этом случае как правило требуется высокая точность позиционирования, что усложняет сенсорную систему робота. Разъемы и контактные пары требуют защиты от влияния окружающей среды и своевременного обслуживания. Данных недостатков лишены беспроводные системы передачи энергии (БСПЭ), которые находят применение в качестве устройств для беспроводной зарядки аккумуляторов различных автономных систем [7-9].

Использование однонаправленных [10-12] БСПЭ для перераспределения энергии не является эффективным решением, так как для передачи энергии от одного мобильного устройства к другому требуется установка приемной и передающей частей устройства на каждого робота. Помимо этого, подход с передачей энергии роботам с помощью передающей части [13, 14], расположенной на или под поверхностью передвижения роботов, ограничивает рабочую область группы роботов, а также требует подготовительных работ для установки необходимого оборудования. Более практичным решением данной задачи являются двунаправленные БСПЭ, в которых каждая часть системы может использоваться в качестве передающей и приемной.

Одним из примеров двунаправленной БСПЭ является решение, представленное в [15]. В передающей части данной системы используется полумостовой инвертор тока, а в приемной части – выпрямитель на MOSFET транзисторах с удвоением напряжения. Во время работы в режиме обратной передачи энергии выпрямитель на MOSFET транзисторах используется как инвертор, а при передаче энергии от передающей части к приемной, в прямом направлении, работает как неуправляе-

мый выпрямитель. Для достижения плавного переключения инверторных ключей при близких к нулевому уровню значениях напряжения (ZVS), скважность преобразователя поддерживается на уровне 50%, а передаваемая мощность регулируется путем изменения рабочей частоты системы. Для компенсации пульсаций на силовых ключах передающей части устанавливаются последовательно с параллельным LC передающим контуром дополнительный конденсатор, получая тем самым последовательно-параллельный резонансный контур.

Резонансный контур каждой части системы [16] выполнен по последовательно-параллельной схеме. Контур системы настроен на работу на резонансной частоте, а каждый реверсивный выпрямитель работает либо в режиме инвертирования, либо в режиме выпрямления в зависимости от направления передачи энергии. Величина и направление передаваемой энергии определяются углом открытия ключей управляемого выпрямителя. Величина и направление потока энергии между несколькими системами контролируются посредством фазовой и амплитудной модуляции напряжений, которые могут использоваться совместно или по отдельности.

Гибридная система двунаправленной БСПЭ предложена в [17]. Система состоит из двух пар катушек, где одна пара выступает в роли передающей части, а другая – в роли приемной. Передающая и приемная части системы имеют два контура, объединенные на

общем проводе, причем один из контуров построен по последовательной схеме, а другой – по последовательно-параллельной. Такая гибридная концепция позволяет использовать LCL и LC контура для компенсации уменьшения передаваемой мощности из-за осевых смещений приемной и передающей частей системы, поскольку объединенная выходная мощность обоих контуров имеет приблизительно постоянное значение. Система основана на полумостовом преобразователе, который служит либо инвертором, либо выпрямителем в зависимости от направления потока мощности.

В двунаправленной БСПЭ [18] величина передаваемой энергии и ее направление передачи регулируется с помощью фазового сдвига сигналов управления открытием ключей. Данная БСПЭ оснащена датчиком напряжения и частоты в приемной и передающей катушках. В работе предложен ПИ-регулятор, который изменяет частоту работы системы для управления уровнем передаваемой мощности, поэтому рассматриваемая БСПЭ работает не всегда в резонансном режиме, что ведет к снижению ее эффективности.

Двунаправленная беспроводная система малой мощности [19] предлагается к применению для заряда аккумуляторных батарей портативных устройств. В приемной и передающей частях системы используется последовательный резонансный контур и полумостовая схема включения силовых транзисто-

ров, что обеспечивает возможность двунаправленной передачи энергии. Так как при использовании системы могут возникнуть осевые смещения и увеличение воздушного зазора между приемной и передающей катушками, предлагается регулировка рабочей частоты.

Авторами работы [20] разработана собственная интегральная схема, включающая в себя систему управления двунаправленной БСПЭ и реализующая систему передачи энергии от аккумулятора к аккумулятору, с последовательной топологией резонансного контура. Для повышения эффективности БСПЭ энергия передается напрямую от аккумулятора к аккумулятору, минуя цепи питания мобильного устройства.

Структура БСПЭ [21] основана на последовательном резонансном контуре с двунаправленным up/down преобразователем. В режиме передачи энергии управляемые ключи, включенные по схеме моста, работают в качестве инвертора в передающей части, а в режиме приема энергии внутренние диоды MOSFET транзисторов работают в качестве неуправляемого выпрямителя совместно с двунаправленным DC-DC преобразователем.

Большинство двунаправленных БСПЭ относятся к классу систем высокой передаваемой мощности (более 1 кВт), так как предназначены для электротранспорта [8, 22] и иных промышленных применений [23]. В соответствии с проведенным анализом и классификацией автономных роботов [24], системы в

данном диапазоне передаваемой мощности избыточны для большинства автономных мобильных робототехнических систем. Решения с малой передаваемой мощностью, разработанные для применения в мобильной электронике, имеют передаваемую мощность в диапазоне до 10 Вт, что будет достаточно только для роботов малых размеров при приемлемой продолжительности времени заряда их аккумуляторных батарей. Системы средней передаваемой мощности, использование которых актуально в автономной робототехнике, представлены в основном однонаправленными системами и недостаточно широко освещены в исследовательских работах.

Для повышения автономности и перераспределения ресурсов в роевых автономных робототехнических комплексах, а также уменьшения вовлеченности человека в процесс эксплуатации, актуальна разработка двунаправленной БСПЭ средней мощности (от 10 Вт до 400 Вт), которая независимо от взаимного расположения приемной и передающей частей системы будет работать в резонансном режиме с высокими показателями эффективности и передаваемой мощности.

Материалы и методы

Разработанная структура двунаправленной БСПЭ, представленная на рис. 1, выполнена в виде блоков, представляющих приемную и передающую части системы, и их связей с конечным устройством.

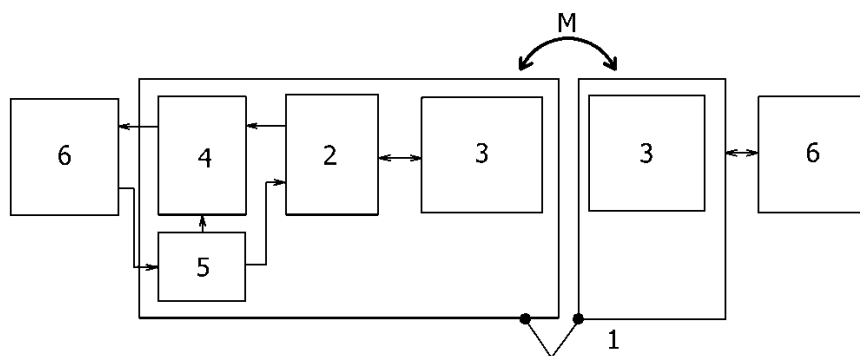


Рис. 1. Структура двунаправленной БСПЭ

Fig. 1. Structure of bidirectional wireless power transfer system

Беспроводная передача энергии осуществляется между двумя конечными устройствами, в которые установлены функциональные блоки 1. Данные блоки имеют электрическое подключение к блокам 6, которые являются источником питания или потребителем энергии в конечном устройстве. Основной частью системы является резонансный автогенератор 2, выход которого связан с резонансным LC-контуром 3. Вход резонансного автогенератора соединен с повышающим DC-DC преобразователем 4, а выход – с потребителем энергии конечного устройства. Цепь управления режимом работы 5 позволяет управлять работой DC-DC преобразователя и электрически соединять источник энергии конечного устройства со входом резонансного автогенератора.

Передача энергии осуществляется методом электромагнитной индукции через индуктивно связанные (на рис. 1 отмечено «М») параллельные резонансные LC-контур. Резонансный LC-контур, в свою очередь, является частотоподающими для автогенератора.

Использование резонансного автогенератора, частотоподающим контуром которого является передающий контур, позволяет поддерживать резонанс в передающем контуре при изменении индуктивности передающей катушки без использования дополнительных систем подстройки частоты. Резонанс в передающем контуре позволяет передавать максимальную мощность в приемную часть. Приемная и передающая части двунаправленной БСПЭ имеют идентичные резонансные контуры, что позволяет избавиться от дополнительных систем подстройки частоты приемного контура для поддержания в нем резонанса при изменении взаимного расположения катушек. Так как взаимное расположение приемной и передающей частей устройства в одинаковой мере влияют на индуктивность и добротность резонансных контуров, а передающий контур является частотоподающим, то оба контура системы передатчик – приемник находятся в резонансе. Это позволяет добиться наилучших показателей по эффективности и передаваемой мощности при любом взаимном распо-

ложении приемной и передающей частей устройства.

Принципиальная схема предлагаемой двунаправленной БСПЭ приведена на рис. 2.

Принцип работы системы в режиме передачи энергии следующий. Конечное устройство 5, в которое установлена двунаправленная БСПЭ 1, имеет собственную систему управления 7.

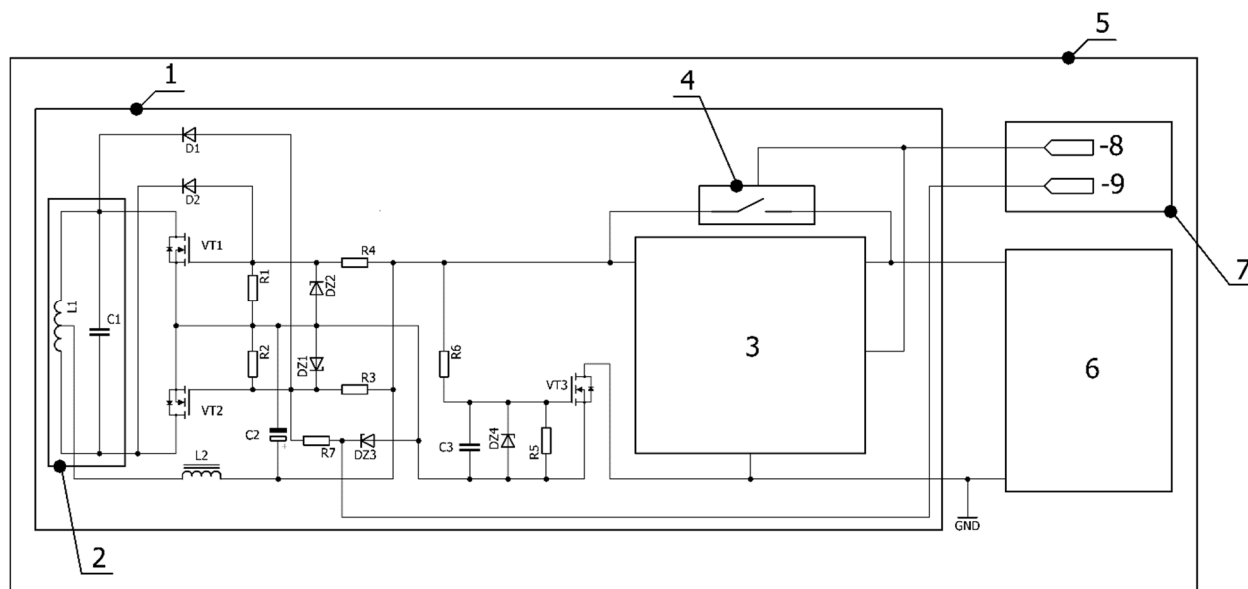


Рис. 2. Принципиальная схема двунаправленной БСПЭ и подключений к конечному устройству

Fig. 2. Schematic diagram of bidirectional wireless power transfer system and connections to the end device

Данная система управления конечного устройства имеет возможность чтения сигнала с цепи контроля частоты 9 и подачи сигнала в цепь выбора режима работы 8 для управления ключевым элементом 4 и повышающим DC-DC преобразователем 3. Система управления конечным устройством проверяет наличие сигнала прямоугольной формы в цепи контроля частоты: если он отсутствует, то системе разрешено подать сигнал в цепь выбора режима работы. При подаче управляющего сигнала в цепь выбора режима работы запрещается работа DC-DC преобразователя, а ключевой элемент замыкает цепь, позволяя протекать току от источника пи-

тания 6 конечного устройства ко входу резонансного генератора, тем самым запуская его работу. После этого в резонансном контуре 2 генерируются незатухающие колебания, а в области катушки L1 появляется переменное магнитное поле. Для обеспечения надежного отпираания транзисторов и снижения динамических потерь эмпирическим путем было выявлено, что расчет необходимой величины затворных резисторов $R_{3,4}$ возможно выполнить по формуле

$$R_{3,4} = \frac{1}{30C_g f}, \quad (1)$$

где C_g – затворная емкость применяемых транзисторов; f – частота работы системы.

Формула (1) получена исходя из того, что заряд затворной емкости должен происходить за 1/10 периода. Принцип работы автогенератора более подробно описан в работе [25]. Методика расчета, представленная в [26], может быть использована для расчета потерь в автогенераторе в режиме передачи энергии, а для расчета потерь в резонансном контуре может быть использована формула

$$P_{LC} = \sqrt{2} I_m^2 (R_l + E_{sr}), \quad (2)$$

где I_m – амплитудная величина тока; R_l – активное сопротивление контурной катушки; E_{sr} – эквивалентное последовательное сопротивление конденсатора резонансного контура.

Принцип работы системы в режиме приема энергии следующий. Если одна из функциональных частей системы работает в режиме передачи энергии, а вторая попадает в область действия переменного магнитного поля, создаваемого ею, то в катушке L1 индуцируется ЭДС. В резонансном контуре 2 возникают незатухающие колебания с частотой, равной частоте колебаний в резонансном контуре функциональной части системы, которая работает в режиме передачи энергии. Далее индуцированная в L1 ЭДС выпрямляется резонансным автогенератором, который работает в данном режиме как синхронный выпрямитель, и поступает на вход повышающего DC-DC преобразователя. Выход DC-DC преобразователя соединен в данном случае с потребителем энергии конечного устройства.

Напряжение на конденсаторе C2, когда система работает в режиме приема энергии, рассчитывается исходя из формулы

$$U_m = k_{св} \frac{\pi V_{dc}}{\sqrt{2}}, \quad (3)$$

где $k_{св}$ – коэффициент связи между индуктивно связанными приемной и передающей катушками; V_{dc} – напряжение источника питания.

Вышеописанные принципы работы двунаправленной БСПЭ позволяют осуществлять энергетический обмен между конечными устройствами с источниками питания с равным и отличающимся рабочим напряжением. Данное свойство позволяет использовать систему для перераспределения энергетических ресурсов между автономными устройствами, источниками питания которых являются аккумуляторные батареи с равным рабочим напряжением. Такая особенность системы актуальна при ее использовании в конструкции гомогенных роевых роботов, где необходимо перераспределение ресурсов внутри роя [5].

Результаты и их обсуждение

В соответствии с подходом, приведенным в [27], с учетом критерия максимизации магнитного потока было выбрано оптимальное число витков катушек для приемной и передающей частей БСПЭ. Выбранное количество витков катушки соответствует 19 виткам, при этом расчетное действующее значение тока в контуре составляет 2,5 А.

Первичная проверка работоспособности предложенного схемотехнического решения проведена в SPICE-симуляторе. Исходная схема системы была упрощена для модели путем исключения DC-DC преобразователя, в расчетах выходной мощности и эффективности учитывалась его эффективность, принятая 87%. Транзисторы VT3 представлены активным сопротивлением со значением 0,065 Ом в приемной и передающей частях системы. Ключевой элемент 4 был также представлен активным сопротивлением 0,065 Ом в части системы, работающей в режиме передачи энергии. Эквивалентное последовательное сопротивление конденсатора резонансного контура и активное сопротивление катушки приняты равными 0,01 Ом. Индуктивность приемной и передающей катушек составляла $L1 = 14$ мкГн, емкость резонансного конденсатора $C1 = 0,47$ мкФ. На основе наших предыдущих исследований коэффициент связи катушек приемной и передающей частей системы принят равным $k_{св} = 0,85$, такое значение может быть достигнуто при непосредственной близости катушек. График зависимости эффективности передачи энергии от передаваемой мощности, построенный на основе данных моделирования, представлен на рис. 3.

нансного контура и активное сопротивление катушки приняты равными 0,01 Ом. Индуктивность приемной и передающей катушек составляла $L1 = 14$ мкГн, емкость резонансного конденсатора $C1 = 0,47$ мкФ. На основе наших предыдущих исследований коэффициент связи катушек приемной и передающей частей системы принят равным $k_{св} = 0,85$, такое значение может быть достигнуто при непосредственной близости катушек. График зависимости эффективности передачи энергии от передаваемой мощности, построенный на основе данных моделирования, представлен на рис. 3.

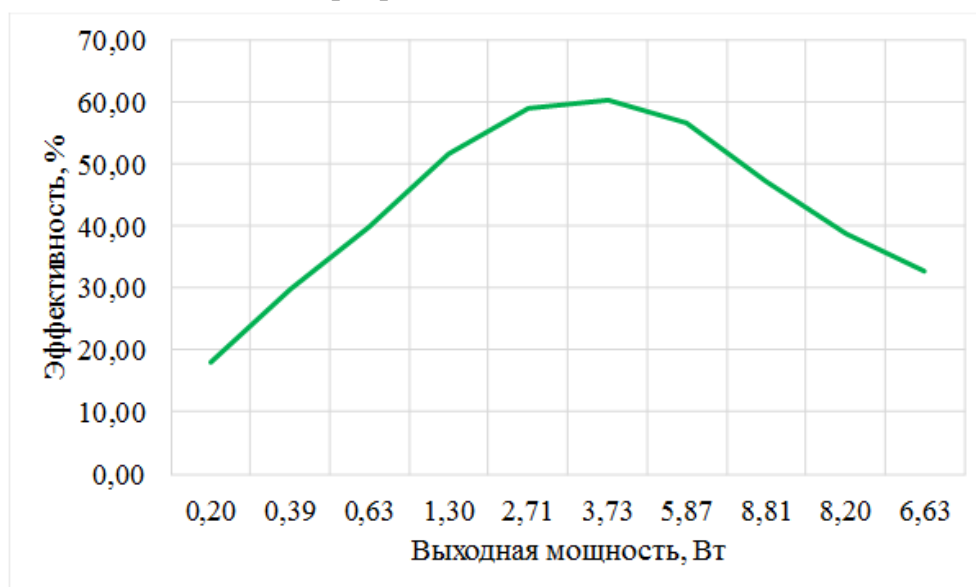


Рис. 3. Зависимость эффективности передачи энергии от передаваемой мощности

Fig. 3. Dependence of the efficiency of power transfer on transferred power

Моделирование работы схемы проводилось на активную нагрузку с сопротивлением от 1 до 250 Ом. Наибольшей выходной мощности 8,81 Вт удалось достичь при сопротивлении нагрузки 2 Ом. Наибольшая эффектив-

ность 60,05% достигается при выходной мощности 3,73 Вт. Напряжение источника питания системы, работающей в режиме передачи энергии, составляло 8,4 В, рабочая частота системы без нагрузки составила ~43 кГц, а макси-

мальный уровень выходного напряжения системы, работающей в режиме приема энергии, достигал 7,56 В.

Проведенное моделирование позволило проверить работоспособность предложенного схемотехнического решения и получить теоретическую зависимость эффективности системы от передаваемой мощности при заданных параметрах и ограничениях.

Для дальнейшей экспериментальной проверки разработанного схемотехнического решения были изготовлены идентичные образцы БСПЭ, внешний вид одного из которых представлен на рис. 4.



Рис. 4. Прототип двунаправленной БСПЭ

Fig. 4. Prototype of the bidirectional wireless power transfer system

Автогенератор реализован на МОП-транзисторах AU1RLR2905Z, DC-DC повышающий преобразователь базируется на микросхеме XL6009, коммутирующие цепи выполнены на МОП-транзисторах FDD6637.

Катушки каждого резонансного контура имеют отвод от середины и намотаны проводом диаметром 0,69 мм. Пользуясь методикой, предложенной в

[28], было рассчитано сопротивление проводника катушки с учетом поверхностного эффекта. На частоте работы системы 45 кГц явление поверхностного эффекта увеличивает сопротивление проводника катушки из 19 витков диаметром провода 0,69 мм (по меди) на 3,12%, что является несущественным для прототипа, изготовленного для апробации предложенной структуры и схемотехнического решения. В качестве конденсатора резонансного контура использовались пленочные MPP конденсаторы с низким значением ESR.

При проведении первого эксперимента в резонансном контуре БСПЭ с фиксированной емкостью конденсатора $C = 0,47$ мкФ была получена зависимость эффективности от передаваемой мощности, которая приведена на рис. 5.

Максимальная эффективность системы достигает 59,91% при передаваемой мощности 10,09 Вт. Максимальная передаваемая мощность составляет 15,4 Вт. Отличие формы полученной кривой от зависимости, приведенной на рис. 3, можно главным образом объяснить разными значениями коэффициента связи между приемным и передающим контурами БСПЭ в моделировании и в экспериментах.

Во втором эксперименте проводилось измерение максимальной передаваемой мощности БСПЭ при изменяемом расстоянии между приемной и передающей катушками. Полученная зависимость передаваемой мощности от расстояния приведена на рис. 6.

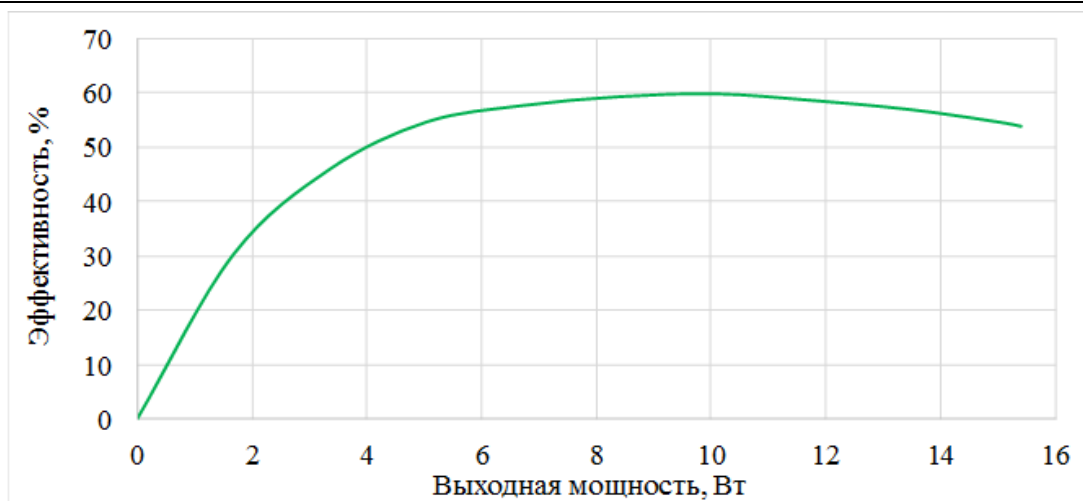


Рис. 5. Зависимость эффективности системы от передаваемой мощности

Fig. 5. System efficiency dependence on the transferred power

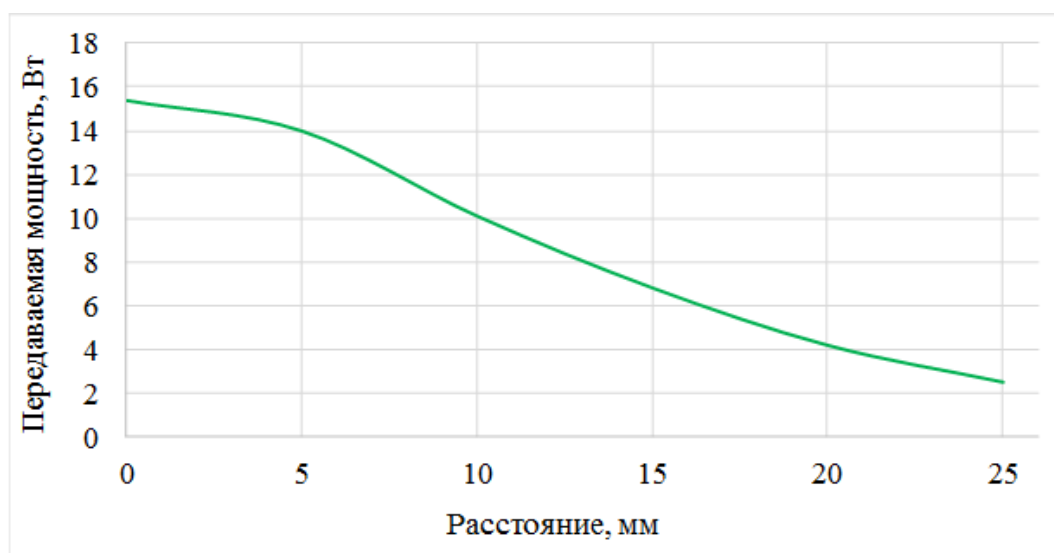


Рис. 6. Зависимость максимальной передаваемой мощности системы от расстояния передачи энергии

Fig. 6. Dependence of system maximum transferred power on the distance of power transfer

При увеличении расстояния между катушками снижается величина взаимной индукции, и, как следствие, снижается передаваемая мощность. Кривая имеет нисходящий характер, наибольшее значение передаваемой мощности 15,41 Вт достигается при минимальном воздушном зазоре между приемной и передающей частями системы. При рас-

стоянии 25 мм передаваемая мощность уменьшается примерно в 6,2 раз и составляет 2,5 Вт.

На рис. 7 приведена зависимость эффективности работы двунаправленной БСПЭ от расстояния между приемной и передающей катушками при максимальной передаваемой мощности.

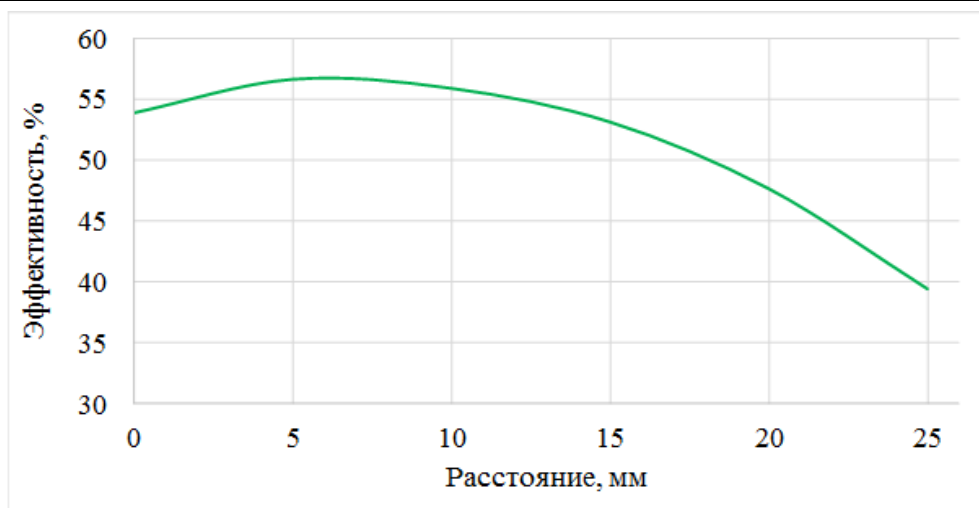


Рис. 7. Зависимость эффективности системы от расстояния передачи энергии при максимальной передаваемой мощности

Fig. 7. System efficiency dependence on the distance of power transfer at the maximum transferred power

Из кривой на рис. 7 следует, что максимальное значение эффективности при максимальной передаваемой мощности достигает 56,68% при расстоянии между приемной и передающей катушками 5 мм. Это обусловлено лучшей по сравнению с другими случаями согласованностью сопротивления нагрузки с БСПЭ при данной передаваемой мощности и расстоянии.

Представленный в данной работе прототип системы имеет максимальную выходную мощность менее 20 Вт, а эффективность около 60%. В системах беспроводной передачи энергии, как можно увидеть по данным из таблицы 1, с увеличением мощности растет эффективность ее работы. Это обусловлено тем, что потери энергии в компонентах и резонансных контурах растут в значительно меньшей степени, чем передаваемая мощность системы. Это подтверждается ранее проведенными испытаниями однонаправленной систе-

мы, основанной на схожих схемотехнических решениях [25, 29]. Мощность нагрузки была ограничена вторичным источником питания передающей части системы и составила 133,45 Вт, а максимальный уровень эффективности составил 76,47%. Стоит отметить, что данные параметры были достигнуты на прототипе системы, в котором выполнено экранирование магнитных полей, что значительно снижает параметры эффективности и передаваемой мощности. Во многих исследовательских работах приводятся данные эффективности и передаваемой мощности при работе системы без экранирования.

Можно заметить, что эффективность разработанного прототипа системы сопоставима с рассмотренными решениями. Например, системы стандарта Qi и PMA – однонаправленные, при этом имеют эффективность в диапазоне 60-70% [32], а стандарта A4WP – эффективность порядка 55%.

Таблица 1. Характеристики двунаправленных БСПЭ**Table 1.** Characteristics of bidirectional wireless power transfer systems

Эффективность, % / Efficiency, %	Передаваемая мощность, Вт / Transmitted power, W	Частота, кГц / Frequency, kHz	Расстояние между частями системы, мм / Distance between parts of the system, mm	
58,6	1,55	678	—	[20]
70	2,5	90-205	2	[19]
60	2,7	—	—	[30]
62,5	2,7	6780	23	[31]
85	1000	20	55	[18]
92	1200	—	—	[15]
85	1500	20	40	[16]
91	3300	85	120	[17]

Увеличение выходной мощности системы потребует заменить повышающий DC-DC преобразователь на соответствующий требуемым параметрам. Также потребуется выбрать соответствующие транзисторы и другие пассивные компоненты. Увеличение мощности системы потребует расчета и применения других приемного и передающего контуров. Однако при этом структура и базовые схемотехнические решения, предложенные в данной работе, останутся без изменений.

Выводы

В работе представлена структура и принципиальная электрическая схема двунаправленной БСПЭ на основе автогенератора с параллельным резонансным контуром. Описан принцип работы разработанного схемотехнического решения в режиме приема и передачи энергии, а также приведены результаты

экспериментальной проверки предложенной системы. Наибольшее значение передаваемой мощности 15,4 Вт достигается при установленных практически вплотную приемной и передающей частей системы, при этом наибольшую величину эффективности 59,91% БСПЭ можно получить при передаваемой мощности 10,09 Вт. Также были построены графические зависимости эффективности системы и передаваемой мощности от расстояния между приемной и передающей частями БСПЭ по данным, полученным с помощью экспериментальных образцов. Увеличение расстояния между частями системы снижает передаваемую мощность, при расстоянии 25 мм передаваемая мощность составляет 2,5 Вт.

Преимуществами разработанной двунаправленной БСПЭ перед аналогами является интегрированная система управления режимом передачи энергии и

силовая часть системы, не требующая специализированной системы управления, так как выполнена в виде резонансного автогенератора. Представленную в данной работе систему возможно использовать для перераспределения энергетических ресурсов между автономными агентами робототехнических систем, источниками питания которых являются аккумуляторы.

муляторные батареи с одинаковым или разным номинальным напряжением.

Дальнейшие исследования будут направлены на разработку алгоритмов позиционирования робототехнических систем для двунаправленной беспроводной системы передачи энергии с учетом ограничений разработанной системы.

Список литературы

1. Пшихопов В.Х., Медведев М.Ю. Групповое управление движением мобильных роботов в неопределенной среде с использованием неустойчивых режимов // Информатика и автоматизация. 2018. Т. 5. № 60. С. 39-63. <https://doi.org/10.15622/sp.60.2>.
2. Multi-robot path planning for a swarm of robots that can both fly and drive / Araki B., Strang J., Pohorecky S., Qiu C., Naegeli T., Rus D. // 2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, 2017. P. 5575-5582. <https://doi.org/10.1109/ICRA.2017.7989657>.
3. Задачи группового управления роботами в робототехническом комплексе пожаротушения / А.В. Архипкин, В.И. Комченков, Д.Н. Корольков, В.Ф. Петров, С.Б. Симонов, А.И. Терентьев // Труды СПИИРАН. 2016. Т. 2. № 45. С. 116-129. <https://doi.org/10.15622/sp.45.7>.
4. Khaluf Y., Vanhee S., Simoens P. Local ant system for allocating robot swarms to time-constrained tasks // Journal of Computational Science. 2019. Т. 31. С. 33-44. <https://doi.org/10.1016/j.jocs.2018.12.012>.
5. 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. Springer, Cham, 2020. С. 13-23. https://doi.org/10.1007/978-3-030-37841-7_2.
6. Melhuish C., Kubo M. Collective energy distribution: Maintaining the energy balance in distributed autonomous robots using trophallaxis // Distributed Autonomous Robotic Systems 6. Springer, Tokyo, 2007. P. 275-284. https://doi.org/10.1007/978-4-431-35873-2_27.
7. Wireless power systems for mobile devices supporting inductive and resonant operating modes / P.S. Riehl, A. Satyamoorthy, H. Akram, Y.-C. Yen, J.-C. Yang, B. Juan, C. Lee, F. Lin, V. Muratov, W. Plumb, P.F. Tustin // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2015. Т. 63. №. 3. С. 780-790. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2015.2398413>.

8. Miśkiewicz R., Moradewicz A. Contactless power interface for plug-in electric vehicles in V2G systems // Bulletin of the Polish Academy of Sciences. Technical Sciences. 2011. T. 59. №. 4. C. 561-568.
9. 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. C. 1036-1041. <https://doi.org/10.1109/ROBOT.2008.4543341>.
10. Design and test of a high-power high-efficiency loosely coupled planar wireless power transfer system / Z.N. Low, R.A. Chinga, R. Tseng, J. Lin // IEEE transactions on industrial electronics. 2008. T. 56. №. 5. C. 1801-1812. <https://doi.org/10.1109/TIE.2008.2010110>.
11. Itoh J.-I., 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. C. 2277-2284. <https://doi.org/10.1109/IPEC.2014.6869907>.
12. Shaw T., Mitra D. Wireless power transfer system based on magnetic dipole coupling with high permittivity metamaterials // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. 2019. T. 18. №. 9. C. 1823-1827. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2019.2930769>.
13. Two-dimensional inductive power transfer system for mobile robots using evenly displaced multiple pickups / C. Park, S. Lee, G.H. Cho, S.Y. Choi, C.T. Rim // IEEE Transactions on Industry Applications. 2013. T. 50. №. 1. C. 558-565. <https://doi.org/10.1109/TIA.2013.2271604>.
14. Perpetual robot swarm: long-term autonomy of mobile robots using on-the-fly inductive charging / F. Arvin, S. Watson, A.E. Turgut, J. Espinosa, T. Krajník, B. Lennox // Journal of Intelligent & Robotic Systems. 2018. T. 92. №. 3. C. 395-412. <https://doi.org/10.1007/s10846-017-0673-8>.
15. Samanta S., Rathore A.K., Thrimawithana D.J. Bidirectional current-fed half-bridge (C)(LC)–(LC) configuration for inductive wireless power transfer system // IEEE Transactions on Industry Applications. 2017. T. 53. №. 4. C. 4053-4062. <https://doi.org/10.1109/TIA.2017.2682793>.
16. Madawala U.K., Thrimawithana D.J. A bidirectional inductive power interface for electric vehicles in V2G systems // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2011. T. 58. №. 10. C. 4789-4796. <https://doi.org/10.1109/TIE.2011.2114312>.
17. Zhao L., Thrimawithana D.J., Madawala U.K. Hybrid bidirectional wireless EV charging system tolerant to pad misalignment // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2017. T. 64. №. 9. C. 7079-7086. <https://doi.org/10.1109/TIE.2017.2686301>.
18. Madawala U.K., Neath M., Thrimawithana D.J. A power–frequency controller for bidirectional inductive power transfer systems // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2011. T. 60. №. 1. C. 310-317. <https://doi.org/10.1109/TIE.2011.2174537>.

19. Miura S., Nishijima K., Nabeshima T. Bi-directional wireless charging between portable devices // 2013 International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA). IEEE, 2013. С. 775-778. <https://doi.org/10.1109/ICRERA.2013.6749857>.
20. Huang M., Lu Y., Martins R.P. A reconfigurable bidirectional wireless power transceiver for battery-to-battery wireless charging // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2018. Т. 34. №. 8. С. 7745-7753. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2018.2881285>.
21. Wu H., Gu B., Wang X., Pickert V., Ji B. Design and control of a bidirectional wireless charging system using GaN devices // 2019 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). IEEE, 2019. P. 864-869. <https://doi.org/10.1109/APEC.2019.8721909>.
22. Neath M.J., Swain A.K., Madawala U.K., Thrimawithana D.J., Vilathgamuwa D.M. Controller synthesis of a bidirectional inductive power interface for electric vehicles // 2012 IEEE Third International Conference on Sustainable Energy Technologies (ICSET). IEEE, 2012. С. 60-65. <https://doi.org/10.1109/ICSET.2012.6357376>.
23. Thrimawithana D.J., Madawala U. K. A contactless bi-directional power interface for plug-in hybrid vehicles // 2009 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. IEEE, 2009. С. 396-401. <https://doi.org/10.1109/VPPC.2009.5289820>.
24. 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>.
25. Krestovnikov K., Cherskikh E., Smirnov P. Wireless Power Transmission System Based on Coreless Coils for Resource Reallocation Within Robot Group // International Conference on Interactive Collaborative Robotics. Springer, Cham, 2019. С. 193-203. https://doi.org/10.1007/978-3-030-26118-4_19.
26. 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. С. 1-5. <https://doi.org/10.1109/EUROCON.2019.8861856>.
27. Krestovnikov K., Cherskikh E., Bykov A. Approach to Choose of Optimal Number of Turns in Planar Spiral Coils for Systems of Wireless Power Transmission // Elektronika ir Elektrotechnika. 2020. Т. 26. №. 6. С. 17-24. <https://doi.org/10.5755/j01.eie.26.6.26181>.
28. Meinke H., Gundlach F.W. Taschenbuch der Hochfrequenztechnik. Springer: Verlag, 1986. part B13-B15. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-96894-5>.
29. Крестовников К.Д., Быков А.Н., Ерашов А.А. Структура и схемотехническое решение системы беспроводной передачи энергии для применения в мобильных РТК // Робототехника и техническая кибернетика. 2021. Т. 9. №3. С. 196-206. <https://doi.org/10.31776/RTCJ.9305>.
30. Lu Y., Mao F., Martins R.P. Bi-directional Battery-to-Battery Wireless Charging Enabled by Reconfigurable Wireless Power Transceivers // 2018 IEEE International Confer-

31. Mao F., Lu Y., Seng-Pan U., Martins R.P. A reconfigurable cross-connected wireless-power transceiver for bidirectional device-to-device charging with 78.1% total efficiency // 2018 IEEE International Solid-State Circuits Conference-(ISSCC). IEEE, 2018. C. 140-142. <https://doi.org/10.1109/ISSCC.2018.8310223>.

32. Hwang J.T., Lee D.S., Lee J.H. [et al.] 21.8 An all-in-one (Qi, PMA and A4WP) 2.5 W fully integrated wireless battery charger IC for wearable applications // 2016 IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC). IEEE, 2016. C. 378-380. <https://doi.org/10.1109/ISSCC.2016.7418065>.

References

1. Pshikhopov V.KH., Medvedev M.YU. Gruppovoe upravlenie dvizheniem mobil'nyh robotov v neopredelennoj srede s ispol'zovaniem neustojchivyh rezhimov. [Group control of the movement of mobile robots in an uncertain environment using unstable modes]. *Informatika i avtomatizatsiya = Informatics and Automation*. 2018; 5: 39–63. <https://doi.org/10.15622/sp.60.2> (In Russ.).

2. Araki B., Strang J., Pohorecky S., Qiu C., Naegeli T., Rus D. Multi-robot path planning for a swarm of robots that can both fly and drive. *2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. 2017; pp. 5575-5582. <https://doi.org/10.1109/ICRA.2017.7989657>.

3. Arkhipkin A., Komchenkov V., Korolkov D., Petrov V., Simonov, S., Terentev A. *Zadachi gruppovogo upravleniya robotami v robototekhnicheskom komplekse pozharotusheniya* [Problems Of Group Control Of Robots In The Robotic Complex Of Fire Extinguishing]. *Trudy SPIIRAN = SPIIRAS Proceedings*. 2016; 2(45): 116-129. <https://doi.org/10.15622/sp.45.7> (In Russ.).

4. Khaluf Y., Vanhee S., Simoens P. Local ant system for allocating robot swarms to time-constrained tasks. *Journal of Computational Science*. 2019; 31: 33-44. <https://doi.org/10.1016/j.jocs.2018.12.012>.

5. 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, Studies in Systems, Decision and Control*. 2020; 272: 13-23. https://doi.org/10.1007/978-3-030-37841-7_2.

6. Melhuish C., Kubo M. Collective energy distribution: Maintaining the energy balance in distributed autonomous robots using trophallaxis. *Distributed Autonomous Robotic Systems 6*. Springer, Tokyo. 2007; 275-284. https://doi.org/10.1007/978-4-431-35873-2_27.

7. Riehl P.S., Satyamoorthy A., Akram H., Yen Y.-C., Yang J.-C., Juan B., Lee C., Lin F., Muratov V., Plumb W., Tustin P.F. Wireless Power Systems for Mobile Devices Supporting

Inductive and Resonant Operating Modes. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2015; 63(3): 780-790. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2015.2398413>.

8. Miskiewicz R., Moradewicz A. Contactless power interface for plug-in electric vehicles in V2G systems. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences*. 2011; 59(4): 561-568.

9. Deyle T., Reynolds M. Surface based wireless power transmission and bidirectional communication for autonomous robot swarms. *2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 2008; pp. 1036-1041. <https://doi.org/10.1109/ROBOT.2008.4543341>.

10. Low Z.N., Chinga R.A., Tseng R., Lin J. Design and Test of a High-Power High-Efficiency Loosely Coupled Planar Wireless Power Transfer System. *Industrial Electronics*. 2009; 56(5): 1801-1812. <https://doi.org/10.1109/TIE.2008.2010110>.

11. Itoh J.-I., Noguchi K., Orikawa K. System design of electric assisted bicycle using EDLCs and wireless charger. *Power Electronics Conference (IPEC-Hiroshima 2014 - ECCE-ASIA)*. 2014; pp. 2277-2284. <https://doi.org/10.1109/IPEC.2014.6869907>.

12. Shaw T., Mitra D. Wireless power transfer system based on magnetic dipole coupling with high permittivity metamaterials. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 2019; 18(9): 1823-1827. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2019.2930769>.

13. Park C., Lee S., Cho G.H., Choi S.Y., Rim C.T. Two-dimensional inductive power transfer system for mobile robots using evenly displaced multiple pickups. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2013; 50(1): 558-565. <https://doi.org/10.1109/TIA.2013.2271604>.

14. Arvin F., Watson S., Turgut A.E., Espinosa J., Krajník T., Lennox B. Perpetual robot swarm: long-term autonomy of mobile robots using on-the-fly inductive charging. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. 2018; 92(3): 395-412. <https://doi.org/10.1007/s10846-017-0673-8>.

15. Samanta S., Rathore A.K., Thrimawithana D.J. Bidirectional current-fed half-bridge (C)(LC)–(LC) configuration for inductive wireless power transfer system. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2017; 53(4): 4053-4062. <https://doi.org/10.1109/TIA.2017.2682793>.

16. Madawala U.K., Thrimawithana D.J. A bidirectional inductive power interface for electric vehicles in V2G systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2011; 58(10): 4789-4796. <https://doi.org/10.1109/TIE.2011.2114312>.

17. Zhao L., Thrimawithana D.J., Madawala U.K. Hybrid bidirectional wireless EV charging system tolerant to pad misalignment. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2017; 64(9): 7079-7086. <https://doi.org/10.1109/TIE.2017.2686301>.

18. Madawala U.K., Neath M., Thrimawithana D.J. A power–frequency controller for bidirectional inductive power transfer systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2011; 60(1): 310-317. <https://doi.org/10.1109/TIE.2011.2174537>.

19. Miura S., Nishijima K., Nabeshima T. Bi-directional wireless charging between portable devices. *International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*. 2013, pp. 775-778. <https://doi.org/10.1109/ICRERA.2013.6749857>.
20. Huang M., Lu Y., Martins R.P. A reconfigurable bidirectional wireless power transceiver for battery-to-battery wireless charging. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2018; 34(8): 7745-7753. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2018.2881285>.
21. Wu H., Gu B., Wang X., Pickert V., Ji B. Design and control of a bidirectional wireless charging system using GaN devices. *2019 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*. 2019, pp. 864-869. <https://doi.org/10.1109/APEC.2019.8721909>.
22. Neath M.J., Swain A.K., Madawala U.K., Thrimawithana D.J., Vilathgamuwa D.M. Controller synthesis of a bidirectional inductive power interface for electric vehicles. *IEEE Third International Conference on Sustainable Energy Technologies (ICSET)*. 2012, pp. 60-65. <https://doi.org/10.1109/ICSET.2012.6357376>.
23. Thrimawithana D.J., Madawala U. K. A contactless bi-directional power interface for plug-in hybrid vehicles. *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*. 2009, pp. 396-401. <https://doi.org/10.1109/VPPC.2009.5289820>.
24. Cherskikh E. O., Erashov A. A., Bykov A. N. Analiz i klassifikacija avtonomnyh robototekhnicheskikh sistem po parametru jenergopotreblenija. [Analysis and classification of autonomous robotic systems by their energy consumption]. *Vestnik VGU. Serija: Sistemnyj analiz i informacionnye tehnologii = Proceedings of Voronezh State University. Series: Systems Analysis and Information Technologies*. 2021; 2: 56-80. <https://doi.org/10.17308/sait.2021.2/3505> (In Russ.).
25. Krestovnikov K., Cherskikh E., Smirnov P. Wireless Power Transmission System Based on Coreless Coils for Resource Reallocation Within Robot Group. *In International Conference on Interactive Collaborative Robotics*. 2019, pp. 193-203. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-26118-4_19.
26. 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*. 2019, pp. 1-5. <https://doi.org/10.1109/EUROCON.2019.8861856>.
27. Krestovnikov K., Cherskikh E., Bykov A. Approach to Choose of Optimal Number of Turns in Planar Spiral Coils for Systems of Wireless Power Transmission. *Elektronika ir Elektrotehnika*. 2020; 26(6): 17-24. <https://doi.org/10.5755/j01.eie.26.6.26181>.
28. Meinke H., Gundlach F.W. *Taschenbuch der Hochfrequenztechnik*. Springer, Verlag Publ., 1986. part B13-B15. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-96894-5>.
29. Krestovnikov K., Bykov A., Erashov A. Struktura i shemotekhnicheskoe reshenie sistemy besprovodnoj peredachi jenergii dlja primenenija v mobil'nyh RTK [Structure and circuit solution of a wireless power transfer system for application in mobile robotic systems]. *Robototekhnika i tekhnicheskaja kibernetika = Robotics and Technical Cybernetics*. 2021; 9(3): 196-206. <https://doi.org/10.31776/RTCJ.9305>.

30. Lu Y., Mao F., Martins R.P. Bi-directional Battery-to-Battery Wireless Charging Enabled by Reconfigurable Wireless Power Transceivers. *In 2018 IEEE International Conference on Electron Devices and Solid State Circuits (EDSSC)*. 2018; pp. 1-2. <https://doi.org/10.1109/EDSSC.2018.8487127>.
31. Mao F., Lu Y., Seng-Pan U., Martins R.P. A reconfigurable cross-connected wireless-power transceiver for bidirectional device-to-device charging with 78.1% total efficiency. *In 2018 IEEE International Solid-State Circuits Conference-(ISSCC)*, 2018; pp. 140-142. <https://doi.org/10.1109/ISSCC.2018.8310223>.
32. Hwang J.T., Lee D.S., Lee J.H. et al. 21.8 An all-in-one (Qi, PMA and A4WP) 2.5 W fully integrated wireless battery charger IC for wearable applications. *In 2016 IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC)*. 2016; pp. 378-380. <https://doi.org/10.1109/ISSCC.2016.7418065>.

Информация об авторах / Information about the Authors

Крестовников Константин Дмитриевич, младший научный сотрудник лаборатории автономных робототехнических систем, Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук (СПб ФИЦ РАН), Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: k.krestovnikov@ias.spb.su, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6303-0344>

Konstantin D. Krestovnikov, Junior Researcher of Laboratory of Autonomous Robotic Systems, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS), St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russian Federation, e-mail: k.krestovnikov@ias.spb.su, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6303-0344>

Семенов Александр Валерьевич, магистр, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: azarov211@gmail.com

Aleksandr V. Semenov, Master Student, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russian Federation, e-mail: azarov211@gmail.com

Ерашов Алексей Алексеевич, младший научный сотрудник лаборатории технологий больших данных социоконвергентных систем, Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук (СПб ФИЦ РАН), Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: erashov.a@ias.spb.su, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8003-3643>

Aleksei A. Erashov, Junior Researcher of Laboratory of Big Data Technologies in Socio-Cyberphysical Systems, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS), St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russian Federation, e-mail: erashov.a@ias.spb.su, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8003-3643>