

УДК 621.3.051

DOI: [10.26102/2310-6018/2019.27.4.018](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2019.27.4.018)

СХЕМОТЕХНИЧЕСКИЕ И КОНСТРУКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ БЕСПРОВОДНОЙ СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ НА ОСНОВЕ СИНХРОННОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ

К.Д. Крестовников¹, Е.О. Черских², А.Р. Шабанова³

*Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской
академии наук, Санкт-Петербург, Российская Федерация*

¹e-mail: open56it@gmail.com

²e-mail: katy0419@mail.ru

³e-mail: shabanova_ar@mail.ru

Резюме: В работе представлены схемотехнические и конструктивные решения беспроводной системы передачи энергии (БСПЭ), направленные на повышение передаваемой мощности и эффективности работы зарядного устройства. Данная задача была решена путем применения в приемной части ранее разработанного синхронного выпрямителя. Отличительной особенностью БСПЭ является наличие системы управления, предназначенной для контроля рабочих параметров, защиты от недопустимых режимов работы и взаимодействия с пользователем посредством вывода диагностических сообщений на дисплей. Для поддержания резонансной частоты в передающей части устройства использовался резонансный автогенератор. Применение идентичных компонентов в обоих контурах позволило не использовать дополнительные подсистемы для настройки частоты на резонансное значение в приемной части. Для упрощения процесса изготовления и сборки БСПЭ были выбраны аналогичные материалы корпусов приемной и передающей частей и размеры места под укладку катушки индуктивности в передающей и принимающей частях. Проведено сравнительное исследование эффективности работы БСПЭ с использованием в приемной части выпрямителя на диодах Шоттки и синхронного выпрямителя. Выявлено, что использование разработанного ранее схемотехнического решения синхронного выпрямителя позволяет повысить эффективность работы БСПЭ на 5,38 % при токе нагрузки 4,5 А. Кроме того, получены зависимости эффективности синхронного выпрямителя от тока нагрузки, эффективности передачи энергии от передаваемой мощности и внешняя характеристика для различных расстояний между передающей и принимающей частями. Эффективность передачи энергии при использовании представленного прототипа БСПЭ составила 76,47 % при значении передаваемой мощности 125 Вт. Повышение передаваемой мощности минимум на 30 % по сравнению с аналогичными беспроводными зарядными устройствами свидетельствует о сокращении времени заряда.

Ключевые слова: беспроводная передача энергии, схемотехническое решение, зарядное устройство, синхронный выпрямитель, резонансный автогенератор, диод Шоттки.

Для цитирования: Крестовников К.Д., Черских Е.О., Шабанова А.Р. Схемотехнические и конструктивные решения для беспроводной системы передачи энергии на основе синхронного выпрямителя. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2019;7(4). Доступно по: https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2019/11/KrestovnikovSoavtori_4_19_1.pdf
DOI: 10.26102/2310-6018/2019.27.4.018

CIRCUIT DESIGNS AND ENGINEERING SOLUTIONS BASED ON SYNCHRONOUS RECTIFIER FOR WIRELESS ENERGY TRANSFER SYSTEM

K.D. Krestovnikov¹, E.O. Cherskikh², A.R. Shabanova³

*St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences,
St. Petersburg, Russian Federation.*

Abstract: This paper presents circuit designs and engineering solutions for wireless energy transfer system (WETS), aimed to increase transmitted power and battery charger performance efficiency. This problem was solved by integration of the previously developed synchronous rectifier into the receiving part of the system. The distinctive feature of the WETS is its control system, required for adjustment of performance parameters, protection from inadmissible operating conditions and for human-machine interactions, using diagnostic message output onscreen. To maintain the required resonance frequency in the receiving part of the device a resonance self-oscillator. Application of identical components in both circuits allowed to obviate the need in additional subsystems for frequency tuning to achieve the required resonance value in the receiving part. To simplify the WETS fabrication and assembly process, identical materials for cases of receiving and transmitting parts were chosen, as well dimensions for coil socket in each part. Comparative study of WETS performance efficiency of WETS, where the receiving part is equipped with a rectifier on Schottky diodes and a synchronous rectifier. It was revealed, that previously developed circuit design of a synchronous rectifier allows to improve WETS efficiency by 5,38 % under load current of 4,5 A. Additionally, the following dependencies were obtained: synchronous rectifier efficiency depending on load current, energy transfer efficiency depending on transferred power and characteristic curves for different distances between the receiving and the transmitting part. The power transfer efficiency when using the presented WETS prototype was 76,47 % by transmitted power of 125 Wt. Transmitted power increase at least by 30 % compared to similar wireless battery charging devices shows, that the charging period duration is decreased.

Keywords: wireless energy transfer, circuit design, battery charging device, synchronous rectifier, resonance self-oscillator, Schottky diode.

For citation: Krestovnikov K.D., Cherskikh E.O., Shabanova A.R. Circuit designs and engineering solutions based on synchronous rectifier for wireless energy transfer system. *Modeling, optimization and information technology*. 2019;7(4). Available by: https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2019/11/KrestovnikovSoavtori_4_19_1.pdf DOI: 10.26102/2310-6018/2019.27.4.018 (In Russ.).

Введение

Технология беспроводной передачи энергии на основе метода электромагнитной индукции имеет широкие возможности применения. На данный момент существуют различные экспериментальные образцы систем и стандартизированные решения устройств беспроводной передачи энергии. Основными показателями работы таких систем является передаваемая мощность и эффективность передачи энергии. Значение передаваемой мощности влияет на время заряда элементов питания: чем больше передаваемая мощность, тем меньше время заряда.

На настоящий момент существует несколько стандартов передачи энергии, основанных на принципе резонанса в электрической цепи. Стандарт беспроводной передачи энергии Rezence [1] 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.

Настройка частот передающего и принимающего контуров на резонансную частоту позволяет увеличить дальность и эффективность передачи энергии. Для этого в работе [6] 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.

Эффективность передачи энергии БСПЭ зависит от конфигурации, взаимной ориентации катушек индуктивности и расстояния между передающей и приемной частями. Так в работах [2, 3] 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 [5] использовали дополнительный резонансный контур. Разработанная система передачи энергии U-WPT включает в себя передаточную, промежуточную и принимающую катушки. Результаты тестирования показали, что предложенный подход позволил повысить эффективность с 8,27 % до 74,83 %.

Исследование влияния способа соединения электрических элементов в резонансном контуре на эффективность работы БСПЭ представлено в работе [9]. Разрабатываемое беспроводное зарядное устройство предназначено для 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.

На эффективность передачи энергии также оказывает влияние конструкция катушек индуктивности в резонансных контурах. Например, 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% [4]. Повышение эффективности работы системы также осуществляется за счет экранирования и метода подавления магнитного поля при помощи петли реактивного тока. Другим примером служат работы [7, 8], в которых авторы использовали планарные спиралевидные катушки с внешним диаметром 15 см, 9 витков медной проволоки диаметром 3 мм. При питающем напряжении 46 В, выходном напряжении 36 В и передаваемой мощности 96 Вт коэффициент полезного действия БСПЭ составил 79 %. Однако данная система имеет существенные недостатки, такие как отсутствие систем управления, контроля, защиты и взаимодействия с пользователем.

Применение планарных катушек индуктивности также исследовано в работе [10]. Передающая часть БСПЭ представлена двухканальным передатчиком класса E. Экспериментальный стенд беспроводного зарядного устройства включает в себя MOSFET транзисторы IRFP21N60L в передающей части, диоды MUR420 в составе мостового выпрямителя – в приемной части. Приемная и передающая катушки имеют размеры 13×13 см и 21×21 см соответственно. Передающая катушка содержит 10 витков провода, приемная 5 витков. 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 %.

Несмотря на высокую эффективность передачи энергии некоторых моделей БСПЭ, для них характерно отсутствие экранирующего электромагнитного поле элементов, что может негативно повлиять на работу других устройств, расположенных вблизи

БСПЭ. Кроме того, рассмотренные прототипы имеют такие недостатки, как отсутствие системы управления, безопасности и взаимодействия с пользователем. При оценке работы беспроводных зарядных устройств помимо эффективности их работы необходимо учитывать значение передаваемой мощности, так оно отражает время заряда элементов питания. Для представленных систем передаваемая мощность составляет 50-96 Вт. Поэтому данная работа направлена на повышение эффективности работы БСПЭ и передаваемой мощности при помощи разработки схемотехнических и конструктивных решений передающей и приемной частей.

Материалы и Методы

Поставленная задача была решена при помощи разработки схемотехнических решений передающей и приемной частей. Для обеспечения контроля рабочих параметров, защиты от недопустимых режимов работы и вывода диагностических сообщений на дисплей была разработана система управления на основе микроконтроллера. Приемная часть БСПЭ-2 представлена ранее разработанным синхронным выпрямителем [11]. Переключение транзисторов выпрямителя осуществляется при низких значениях тока и напряжения для уменьшения динамических потерь. Для поддержания резонансной частоты в передающем контуре использовался резонансный автогенератор. Использование идентичных резонансных контуров передающей и принимающей сторон позволило избежать разработку дополнительных подсистем настройки частоты премного контура на резонансное значение.

Во избежание замыкания контуров тока в корпусах обеих частей данные элементы конструкции были изготовлены из пластикового изоляционного материала. Использование аналогичных материалов при проектировании передающего и приемного контуров дает возможность упростить процесс производства и сборки БСПЭ-2 в целом. В совокупности такие решения позволили повысить эффективность и устойчивость работы беспроводного зарядного устройства при всех режимах эксплуатации.

Разработка схемотехнического решения передающей и приемной частей БСПЭ

Передающая часть БСПЭ-2

Передающая часть БСПЭ состоит из силового блока и системы управления. На Рисунке 1 представлена схема резонансного автогенератора с цепью его запуска и контроля рабочей частоты.

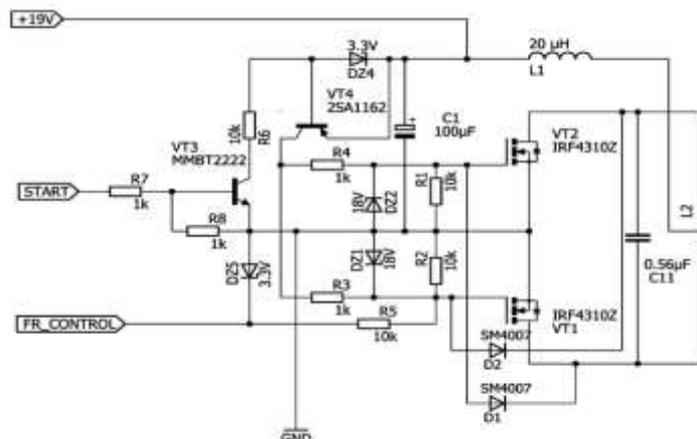


Рисунок 1 – Принципиальная электрическая схема силового блока системы
Figure 1 – Circuit diagram of power unit of the system

Принцип работы представленной схемы следующий. После подачи логического сигнала высокого уровня по цепи «START» открывается транзистор VT3, и через резистор R6 начинает течь ток в цепи база-эмиттер транзистора VT4, открывая его. Через транзистор VT4 ток начинает течь к затворам обоих полевых транзисторов, заряжая емкости затворов через резисторы R3 и R4. Поскольку динамические характеристики транзисторов отличаются, один из них (например, VT1) открывается быстрее и начинает проводить ток, при этом через диод D1 разряжая затвор другого транзистора VT2, который удерживается в закрытом состоянии. Напряжение на стоке закрытого транзистора VT2 сначала возрастает, а затем (с ограничением роста тока в сглаживающем дросселе L1) понижается, переходя через нуль. В этот момент затвор открытого транзистора VT1 разряжается, и транзистор VT1 запирается. Так как VT1 теперь заперт, то на его стоке появляется положительный потенциал. Затвор транзистора VT2 заряжается через резистор R4. VT2 открывается, при этом окончательно разряжая через диод D2 затвор транзистора VT1. Через половину периода цикл повторяется в обратной последовательности: VT2 закрывается, а VT1 открывается. В контуре таким образом возникают синусоидальные автоколебания. Дроссель L3 ограничивает броски питающего тока в период переключения транзисторных ключей. Запирание транзисторов происходит при напряжении сток-исток близкому к нулю, когда ток в контурной катушке максимален. Это позволяет свести коммутационные потери к минимуму. Цепь «FR_CONTROL», состоящая из элементов DZ5 и R5, необходима для контроля системой управления частоты работы генератора. Это позволяет отслеживать и исключать ненормальные режимы работы автогенератора.

Резонансный автогенератор с переключением транзисторов при напряжении близком к нулю (Zero Voltage Switching, ZVS) выбран, исходя из ранее проведенных исследований, описанных в [12] и [13]. Также эффективность использования ZVS генератора для системы беспроводной передачи энергии рассматривается в [10].

Корпус передающей части (Рисунок 2) изготовлен из алюминиевого сплава для экранирования электромагнитных полей передающего резонансного контура системы. Габариты разработанного корпуса составляют 173×219,5×24 мм. Боковые экранирующие панели корпуса конструктивно разделены пластиковым изолятором, что позволяет избежать образования замкнутого контура тока.

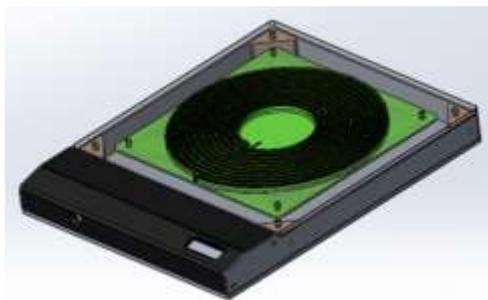


Рисунок 2 – 3D модель передающей части БСПЭ-2
 Figure 2 – 3D model of transmitting part of WETS-2

Место укладки залитой лаком передающей катушки выполнено из ABS пластика. Пластиковая подложка крепится к листу органического стекла толщиной 4 мм со специальным вырезом. Для облегчения процесса укладки провода катушки резонансного контура и сборки передающей части системы лист из органического стекла также использовался в качестве верхней части корпуса.

Система управления передающей части

Система управления передающей части осуществляет управление силовым блоком, контроль рабочих параметров системы, вывод текущих параметров и диагностических сообщений на дисплей. Контролируемыми параметрами являются: сила тока, потребляемого силовой частью, уровень питающего напряжения, частота работы автогенератора. Принципиальная схема системы управления представлена на Рисунке 3.

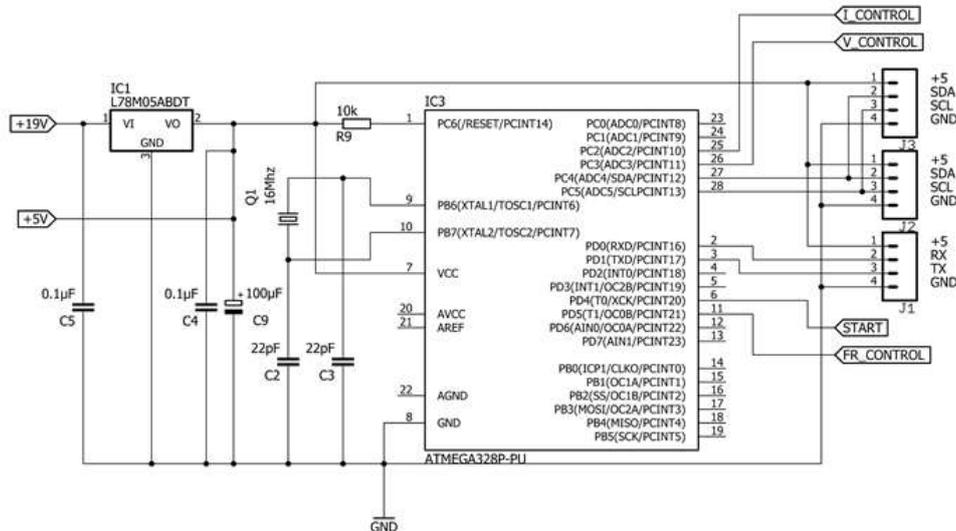


Рисунок 3 – Принципиальная схема системы управления
Figure 3 – Circuit diagram of control system

Центральным элементом системы управления передающей части БСПЭ-2 является микроконтроллер. Система управления передающей частью беспроводной системы передачи энергии реализована на микроконтроллере Atmel ATMEGA328P-PU [14]. Управление силовым блоком, работа алгоритмов защиты системы от перегрузок и ненормальных режимов, а также считывание и вывод на дисплей текущих рабочих параметров и диагностических сообщений осуществляется при помощи микроконтроллера IC3.

В разработанном образце БСПЭ-2 используется OLED дисплей разрешением 128×32 пикселей, с подключением по I2C шине. Дисплей подключен разъему J3. Разъем J1 предназначен для загрузки управляющих программ в микроконтроллер и отладочных операций.

Маркеры «I_CONTROL» и «V_CONTROL» обозначают точки подключения к схеме управления выходного сигнала с датчика тока на базе ACS712 [15] и делителя напряжения, установленного в цепи питания, для измерения уровня питающего напряжения и тока потребления передающей части БСПЭ-2. Данная часть схемы представлена на Рисунке 4. Питание передающей части системы осуществляется через штыревой разъем XT1 под пайку на плату.

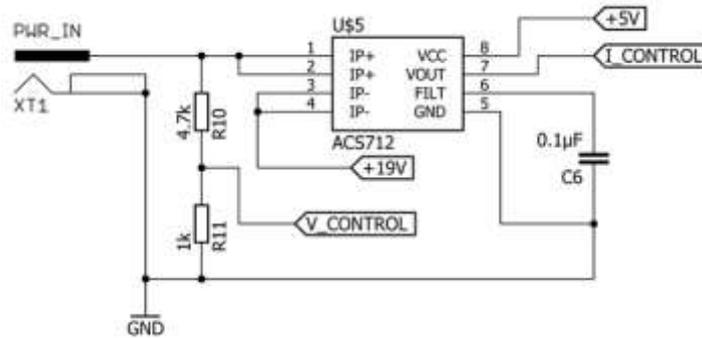


Рисунок 4 – Принципиальная схема включения датчика тока
Figure 4 – Circuit diagram of current sensor activation

Приемная часть БСПЭ-2

Силовой блок приемной части БСПЭ-2 представлен разработанным ранее синхронным выпрямителем [11] (Рисунок 5), имеющим инверсное включение силовых ключей.

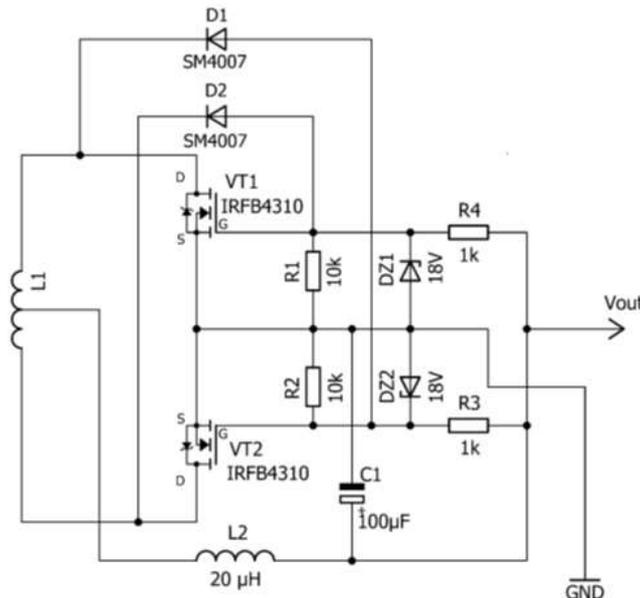


Рисунок 5 – Принципиальная схема синхронного выпрямителя
Figure 5 – Circuit diagram of synchronous rectifier

Принцип работы схемы следующий. В начальный момент времени электролитический конденсатор C1 разряжен. После запуска передающей части беспроводной системы передачи энергии в приемной катушке L1 индуцируется ЭДС и через внутренние диоды MOSFET транзисторов начинает заряжаться электролитическая емкость C1. Как только на емкости C1 появляется напряжение, минимально необходимое для отпириания канала MOSFET транзистора (VT1, VT2), транзистор открывается и шунтирует внутренний диод открытым каналом, имеющим значительно меньшее сопротивление, чем динамическое сопротивление диода. Для исключения сквозного тока через транзисторы VT1, VT2 предназначены диоды D1, D2. Диод D1 запирает транзистор противоположного плеча VT2, пока транзистор VT1 открыт, с диодом D2 и VT1 соответственно. R1, R2 служат для разряда затворной емкости и закрытия транзистора при отсутствии ЭДС в приемной катушке. Цепи DZ1-

R4 и DZ2-R3 представляют собой параметрический стабилизатор, который требуется для ограничения напряжения в цепи затвор-исток транзистора. Также через резисторы R3, R4 осуществляется заряд затворной емкости при открытии транзистора. C1 и L2 образуют сглаживающий фильтр выпрямителя, при этом емкость C1 также необходима для аккумулирования энергии, которая требуется для управления силовыми ключами.

Переключение транзисторов происходит при низких значениях напряжения и тока, что значительно снижает динамические потери на ключах выпрямителя [17]. Включение и выключение транзистора происходит, когда напряжение между стоком и истоком равно 0,6–0,7 В и зависит от напряжения смещения используемых диодов D1, D2. Отпирание канала транзистора происходит позже, чем открывается внутренний диод MOSFET транзистора, что значительно снижает токовую нагрузку на транзистор в переходном режиме.

Проведены теоретические расчеты потерь и экспериментальные испытания разработанного схемотехнического решения, при которых данный синхронный выпрямитель показал свою эффективность и устойчивую работу во всех режимах эксплуатации [11]. Эффективность работы выпрямителя зависит от выходного тока при заданном значении выходного напряжения (19 В), (Рисунок 6).

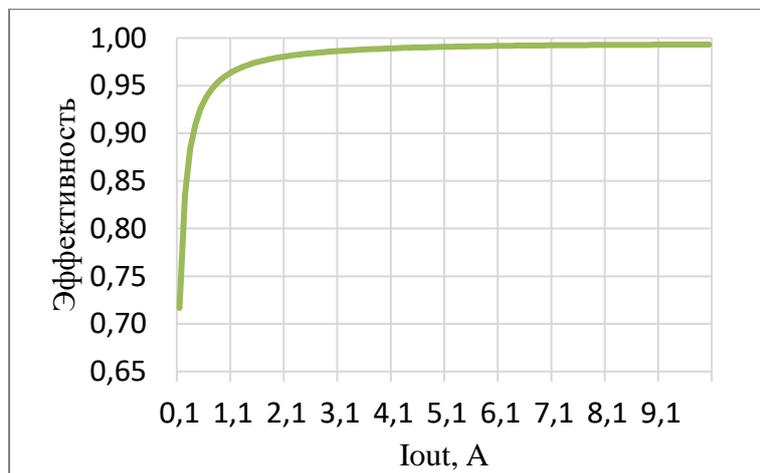


Рисунок 6 – Зависимость эффективности от тока нагрузки в представленном синхронном выпрямителе

Figure 6 – Dependency of efficiency from the load current in the presented synchronous rectifier

Полные потери мощности при выходном токе в 7,5 А составляют 0,909 Вт. При выходном напряжении 19 В расчетная эффективность работы составила 99,3 %. В соответствии с графиком, синхронный выпрямитель имеет эффективность больше 90 % практически во всем диапазоне значений тока нагрузки. Предложенная принципиальная схема обеспечивает повышение эффективности на 1,9 % при токе нагрузки 7,5 А по сравнению с выпрямителем на диодах Шоттки (95,5 %), исследование которого показано в работе [11]. На Рисунке 7 представлена плата прототипа синхронного выпрямителя, установленная в приемную часть беспроводной системы передачи энергии.

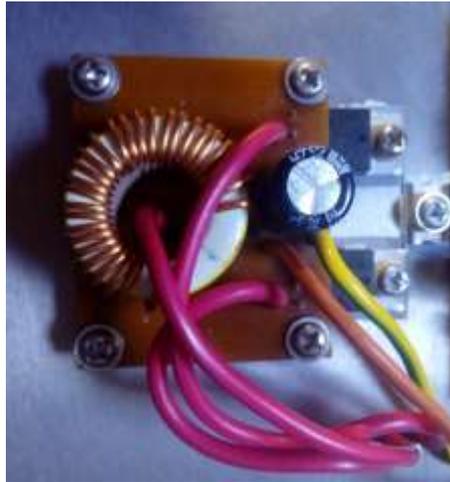


Рисунок 7 – Плата синхронного выпрямителя
Figure 7 – Synchronous rectifier board

Корпус приемной части (Рисунок 8) изготовлен из аналогичных материалов корпуса передающей части. Конструкция и конструктивные элементы, а также габариты места под укладку катушки схожи с соответствующими характеристиками передающей части системы. В верхней части корпуса расположена плата синхронного выпрямителя. Размеры корпуса составляют 173×173×23 мм. Между боковыми элементами корпуса находится изолятор из ABS пластика, как и в корпусе передающей части.

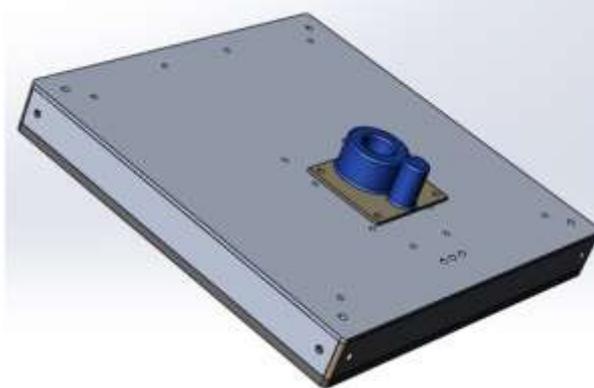


Рисунок 8 – 3D модель корпус приемной части БСПЭ-2
Figure 8 – 3D model of WETS-2 receiving part shell

Передающий и приемный резонансные контуры

Поддержание резонансной частоты в передающем контуре при изменении индуктивности катушки достигается путем использования резонансного автогенератора, частотоподающим контуром которого является сам контур. Такое решение позволяет избежать разработки дополнительных систем подстройки частоты контура. Резонанс в передающем контуре дает возможность передавать в приемную часть максимальную мощность. Приемная и передающая части БСПЭ-2 имеют идентичные резонансные контуры, что позволяет избавиться от дополнительных систем подстройки приемного контура для поддержания в нем резонансной частоты. Так как взаимное расположение приемной и передающей частей устройства в одинаковой мере влияют на индуктивность и добротность резонансных контуров приемной и передающей части, а передающий

контур является частото задающим, то оба контура системы, передающий и приёмный, находятся в резонансе. Это позволяет добиться наилучших показателей эффективности и передаваемой мощности при любом взаимном расположении приемной и передающей части устройства. С целью подавления скин-эффекта контурные катушки (Рисунок 9) изготовлены с использованием провода литцендрат.

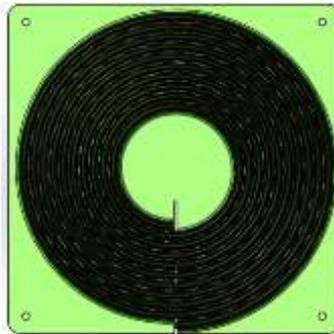


Рисунок 9 – Модель катушки индуктивности резонансного контура
Figure 9 – Model of induction coil of resonant circuit

Катушки резонансных контуров БСПЭ-2 были изготовлены из провода сечением $4,21 \text{ мм}^2$ и диаметром отдельных проводников $0,071 \text{ мм}$. Основание для катушки выполнено посредством технологии 3D-печати. Повышению эффективности работы БСПЭ способствует использование в резонансных контурах пленочных конденсаторов на основе металлизированной полипропиленовой пленки [18]. Конденсаторы такого типа использованы во всех образцах системы беспроводной передачи энергии БСПЭ-1 и БСПЭ-2.

Тестирование образца БСПЭ-2

Тестирование БСПЭ-2 проводилось при значении рабочей частоты от 50 до 70 кГц в зависимости от взаимного расположения резонансных контуров и тока нагрузки. Для сравнения эффективности работы синхронного и выпрямителя на диодах Шоттки были сняты зависимости эффективности работы беспроводной системы передачи энергии от тока нагрузки. Графические зависимости, полученные из экспериментальных данных, представлены на Рисунке 10.

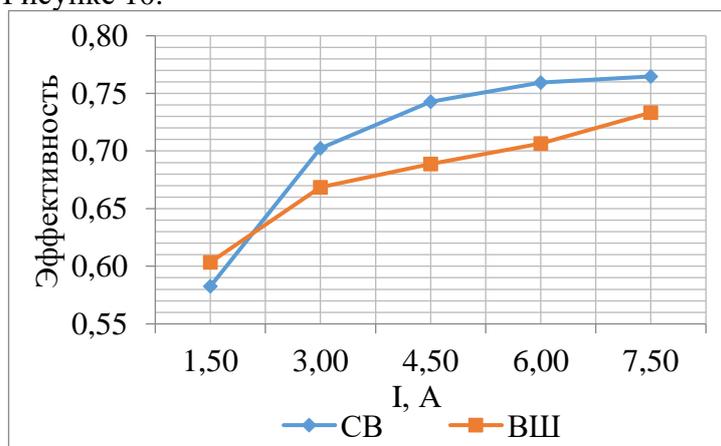


Рисунок 10 – Зависимость эффективности БСПЭ-2 от тока нагрузки при различных типах выпрямителей: СВ – синхронный выпрямитель, ВШ – выпрямитель на диодах Шоттки

Figure 10 – Dependency of WETS-2 efficiency from the load current with rectifiers of different types: SR – synchronous rectifier, SDR – rectifier on Schottky diodes

Максимальная разница в эффективности работы системы при различных выпрямителях составила 5,38 % при токе нагрузки 4,5 А. Представленный график отражает эффективность работы системы БСПЭ в целом. Так как работа беспроводной системы передачи энергии более эффективна при использовании синхронного выпрямителя в составе приемной части, дальнейшие испытания БСПЭ-2 проведены с использованием синхронного выпрямителя.

На Рисунке 11 построены графические зависимости параметров эффективности от мощности для различных рабочих расстояний между передающей и принимающей частями L . Представленный график позволяет наглядно оценить влияние расстояния передачи энергии на эффективность и максимально передаваемую мощность для конкретного расстояния.

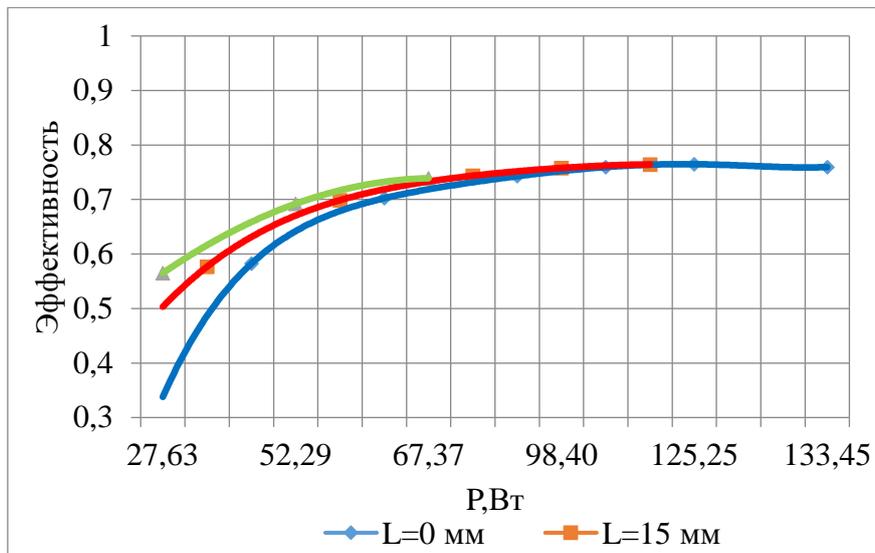


Рисунок 11 – Зависимость эффективности от передаваемой мощности для различных L
Figure 11 – Dependency of efficiency from transmitted power for different L values

При расстоянии $L = 0$ мм (непосредственная близость приемной и передающей частей системы) максимальная мощность нагрузки составляет 133,45 Вт. Унифицированный вторичный источник питания, используемый в образце, вносит такое ограничение мощности нагрузки. Максимальная эффективность в данном случае составляет 76,47 %. Увеличение мощности нагрузки более 125,25 Вт ведет к незначительному снижению эффективности системы, что обусловлено увеличением потерь мощности на активном сопротивлении резонансных контуров, увеличением статических и динамических потерь на ключах резонансного автогенератора передающей части и синхронного выпрямителя приемной части системы беспроводной передачи энергии. При передаваемых мощностях менее 50 Вт наблюдается снижение эффективности системы, причиной которого является высокое значение магнитного потока рассеяния. Магнитный поток рассеяния замыкается не только в воздушном зазоре, а также через экранирующие элементы устройства, индуцируя в них вихревые токи и создавая потери на перемагничивание.

При расстоянии $L = 30$ мм максимальная мощность нагрузки составила – 67,37 Вт, а эффективности работы системы – 73,91 %. С увеличением мощности нагрузки снижается отношение мощности, теряемой за счет потоков рассеяния, к полезной мощности нагрузки, что выражается в росте эффективности системы. При передаваемой

мощности более 55 Вт на расстояния до 30 мм эффективность БСПЭ-2 составляет более 70 %.

Также в ходе проведения экспериментов было снята внешняя характеристика БСПЭ-2 при различных расстояниях между передающей и приемной частями, которая показана на Рисунке 12.

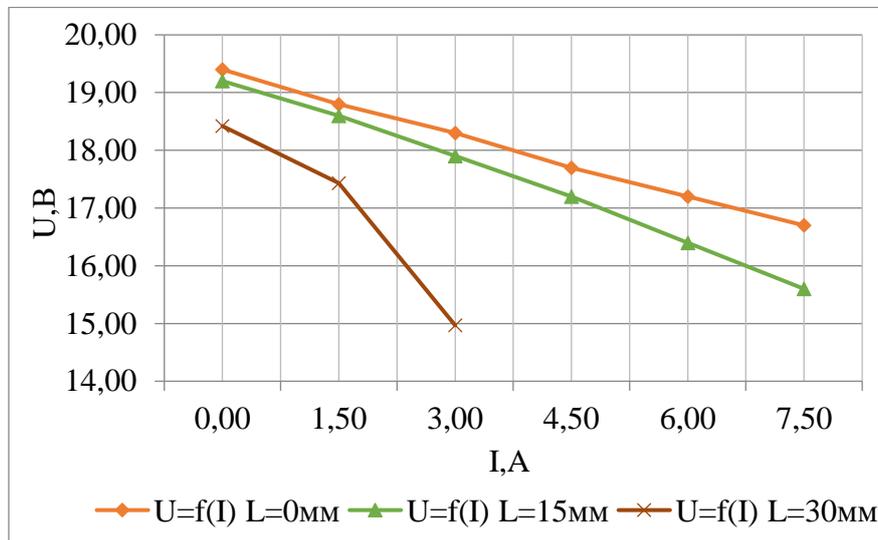


Рисунок 12 – Внешняя характеристика системы для различных L
Figure 12 – Characteristic curve of the system for different L values

Из данного графика следует, что с увеличением расстояния L снижается жесткость внешней характеристики системы. Причиной этого является высокое магнитное сопротивление воздушного зазора. С ростом расстояния увеличивается отношение потока рассеяния к магнитному потоку, который индуцирует ЭДС в приемной катушке, что ведет к уменьшению амплитуды ЭДС.

Заключение

Предложенные схемотехнические решения позволили повысить эффективность работы БСПЭ-2 и уровень передаваемой мощности по сравнению с разработанной ранее системой. Максимальная эффективность зарядного устройства при использовании предложенного схемотехнического решения синхронного выпрямителя достигала 76,47 % при токе нагрузки 7,5А, в то время как максимальная эффективность несинхронного выпрямителя на диодах Шоттки составила 73,33 %. Эффективность работы системы незначительно снижается при изменении расстояния между катушками до 30 мм и находится выше 70 % при передаваемой мощности более 55 Вт.

В отличие от аналогичных систем передачи энергии, разработанный прототип представляет собой готовое устройство с высоким значением передаваемой мощности 125 Вт при максимальной эффективности передачи энергии. Повышение передаваемой мощности свидетельствует о сокращении времени заряда по сравнению с системами, рассмотренными в обзоре. Также к преимуществам представленной системы можно отнести наличие экранирующих электромагнитное поле конструкций, что позволяет исключить негативное влияние на работу устройств, расположенных рядом с зарядным устройством. Использование идентичных материалов корпуса и электронных

компонентов в передающей и приемной частях позволяет упростить производство БСПЭ в целом.

Дальнейшие исследования будут направлены на разработку следующего поколения беспроводной системы передачи энергии для применения в роевых робототехнических комплексах и на адаптацию системы для заряда аккумуляторной батареи беспилотных летательных аппаратов. Планируется проведение исследований, направленных на снижение массогабаритных характеристик приемной части системы.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № №19-08-01215_A.

ЛИТЕРАТУРА

1. Dubal P. Rezenec: wireless charging standard based on magnetic resonance. International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering. 2015;4(12): 198-200.
2. Skaik T.F., AlWadiya B.O. Design of wireless power transfer system with tri-plet coil configuration based on magnetic resonance. Istanbul University-Journal of Electrical & Electronics Engineering. 2017;17(1):3193-3199.
3. Yu C., Lu R., Cui S., Su C. Research on resonance based wireless energy transfer device for small mobile equipments. 2011 International Conference on Electrical Machines and Systems. IEEE. 2011;:1-3.
4. Kim J. et al. Coil design and shielding methods for a magnetic resonant wireless power transfer system. Proceedings of the IEEE. 2013;101(6):1332-1342.
5. Sun Y., Ye Z.H. Power transfer efficiency analysis of U-WPT system. 2016 Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC). IEEE. 2016;1: 858-861.
6. 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;:2011-2016.
7. Pellitteri F. et al. Experimental test on a Contactless Power Transfer system. 2014 Ninth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER). IEEE, 2014:1-6.
8. Pellitteri I.F. et al. Wireless Charging Systems for Electric Vehicle Batteries. U. K. 2016.
9. Itoh J., Noguchi K., Orikiwa K. System design of electric assisted bicycle using EDLCs and wireless charger / J. Itoh. 2014 International Power Electronics Conference (IPEC-Hiroshima 2014-ECCE ASIA). IEEE, 2014;:2277-2284.
10. 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;56(5):1801-1812.
11. 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;:1-5.
12. Савельев А.И., Крестовников К.Д., Солёный С.В. Разработка беспроводного зарядного устройства для мобильной робототехнической платформы. Интеллектуальные Энергосистемы. Материалы V Международного молодежного форума. 2017;:197-201.
13. Крестовников К.Д., Солёный С.В. Система беспроводной зарядки мобильных роботов. ГУАП, Завалишинские чтения: молодежная секция. СПб.: ГУАП. 2017;:71-76.
14. ATmega328P [DATASHEET], Rev.: 7810D-AVR-01/15. Atmel Corporation, 2015.

15. ACS712 D. Fully Integrated, Hall Effect-Based Linear Current Sensor IC with 2.1 kVRMS Isolation and a Low-Resistance Current Conductor. 2006.
16. Мелешин В.И. Транзисторная преобразовательная техника. Монография. – Техносфера, 2005.
17. General Technical Information about film capacitors. Режим доступа: <https://www.vishay.com/docs/26033/gentechinfofilm.pdf>. (Дата обращения 9 июля 2019).

REFERENCES

1. Dubal P. Rezenec: wireless charging standard based on magnetic resonance. *International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering*. 2015;4(12):198-200.
2. Skaik T.F., AlWadiya B.O. Design of wireless power transfer system with tri-plet coil configuration based on magnetic resonance. *Istanbul University-Journal of Electrical & Electronics Engineering*. 2017;17(1):3193-3199.
3. Yu C., Lu R., Cui S., Su C. Research on resonance based wireless energy transfer device for small mobile equipments. *2011 International Conference on Electrical Machines and Systems*. IEEE. 2011;:1-3.
4. Kim J. et al. Coil design and shielding methods for a magnetic resonant wireless power transfer system. *Proceedings of the IEEE*. 2013;101(6):1332-1342.
5. Sun Y., Ye Z.H. Power transfer efficiency analysis of U-WPT system. *2016 Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC)*. IEEE. 2016;1: 858-861.
6. 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;:2011-2016.
7. Pellitteri F. et al. Experimental test on a Contactless Power Transfer system. *2014 Ninth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*. IEEE, 2014;:1-6.
8. Pellitteri I.F. et al. Wireless Charging Systems for Electric Vehicle Batteries. U. K. 2016.
9. Itoh J., Noguchi K., Orikawa K. System design of electric assisted bicycle using EDLCs and wireless charger / J. Itoh. *2014 International Power Electronics Conference (IPEC-Hiroshima 2014-ECCE ASIA)*. IEEE, 2014:2277-2284.
10. 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;56(5):1801-1812.
11. 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;:1-5.
12. Saveliev A.I., Krestovnikov K.D., Solenyj S.V. Razrabotka besprovodnogo zaryadnogo ustrojstva dlya mobil'noj robototekhnicheskoy platform. *V sbornike: Intellektual'nye Energosistemy. Materialy V Mezhdunarodnogo molodezhnogo foruma*. 2017: 197-201.
13. Krestovnikov K.D., Solenyj S.V. Sistema besprovodnoj zaryadki mobil'nykh robotov. *SUAI, International Conference on Electromechanics and Robotics «Zavalishin's Readings» (ER(ZR)-2017), youth section*. 2017;:71-76.
14. ATmega328P [DATASHEET], Rev.: 7810D-AVR-01/15. Atmel Corporation, 2015.
15. ACS712 D. Fully Integrated, Hall Effect-Based Linear Current Sensor IC with 2.1 kVRMS Isolation and a Low-Resistance Current Conductor. 2006.

16. Meleshin V. I. Tranzistornaya preobrazovatel'naya tekhnika. Monograph. Tekhnosfera, 2005.
17. General Technical Information about film capacitors. Режим доступа: <https://www.vishay.com/docs/26033/gentechinfofilm.pdf>. (Дата обращения 9 июля 2019).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ / INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Крестовников Константин Дмитриевич, младший научный сотрудник, Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук; ведущий инженер отдела Инженерный гараж и Инженерной школы, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

ORCID: [0000-0001-6303-034](https://orcid.org/0000-0001-6303-034)

Konstantin D. Krestovnikov, Junior Researcher, St. Petersburg Institute of Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences; Leading Engineer of the Engineering Garage and Engineering School Department, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russian Federation.

Черских Екатерина Олеговна, младший научный сотрудник, Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

ORCID: [0000-0002-4443-228](https://orcid.org/0000-0002-4443-228)

Ekaterina O. Cherskikh, Junior Researcher, St. Petersburg Institute of Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russian Federation.

Шабанова Александра Романовна, младший научный сотрудник, Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

ORCID: [0000-0003-0664-6550](https://orcid.org/0000-0003-0664-6550)

Aleksandra R. Shabanova, младший научный сотрудник, Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук, Санкт-Петербург, Российская Федерация.