

Раздел III. Электроника, приборостроение и радиотехника

УДК 621.341.572

DOI 10.18522/2311-3103-2023-5-174-182

В.В. Бурлака, С.В. Гулаков, А.Ю. Головин, Д.С. Мироненко**СИСТЕМА БЕСПРОВОДНОЙ ПЕРЕДАЧИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ**

Широкое распространение получило оборудование, питающееся от встроенных аккумуляторов: беспилотные летательные аппараты, портативные радиостанции, тактические фонари, электрические транспортные средства и др. Зарядка аккумуляторов осуществляется зачастую контактным способом – подключением источника энергии посредством разъемного соединения. Это требует наличия технического персонала для производства коммутаций; организации защиты разъемного соединения от воздействия окружающей среды (влаги, грязи и т.д.), а также защиты от поражения персонала электрическим током. Целью исследования является разработка технических средств беспроводной передачи электрической энергии, которые позволят исключить использование разъемных соединений, улучшить электробезопасность, а, главное – дадут возможность сделать процесс зарядки автоматическим. Результаты работы актуальны для создания автоматических систем доставки грузов с помощью беспилотных аппаратов; для реализации систем автоматической зарядки городского электротранспорта; для реализации систем автоматической зарядки беспилотных наземных, плавучих (в т.ч. подводных) и летательных аппаратов (разведывательных, патрульных и др.). Описана разработанная конструкция системы беспроводной передачи энергии мощностью до 250 Вт, пригодной для зарядки шестиеlementных литиевых аккумуляторных батарей. Система работает с катушками диаметром 200 мм, полная работоспособность сохраняется при расстоянии между центрами катушек до 100 мм. КПД во всем диапазоне режимов не ниже 74 %, при измерении от сети 220 В до выхода на аккумуляторную батарею. При проектировании ставилась цель максимально снизить массу приемной части для облегчения ее установки на БПЛА и минимизации влияния на их тяговооруженность.

Беспроводная передача электрической энергии; резонансный трансформатор; синхронный выпрямитель; воздушный трансформатор; квазирезонансный инвертор напряжения.

V.V. Burlaka, S.V. Gulakov, A.Y. Golovin, D.S. Mironenko**THE WIRELESS ELECTRIC POWER TRANSFER SYSTEM**

The equipment powered by built-in batteries has become widespread: unmanned aerial vehicles, portable radios, tactical flashlights, electric vehicles, etc. Charging of batteries is often carried out in a contact way – by connecting a power source by means of a detachable connection. This requires the presence of technical personnel for maintenance and replacement of batteries; requires the organization of protection of the battery connection from environmental influences (moisture, dirt, etc.), as well as protection against electric shock to personnel. The purpose of the research is to develop technical means of wireless transmission of electrical energy, which will eliminate the use of detachable connections, improve electrical safety, and, most importantly, will make it possible to make the charging process automatic. The results of the work are relevant for the implementation of automatic cargo delivery systems using unmanned vehicles; for the implementation of automatic charging systems for urban electric vehicles; for the implementation of

automatic charging of unmanned land, floating (including underwater) and aircraft (reconnaissance, patrol, etc.). The design of a wireless power transmission system with a power of up to 250 W, suitable for charging 6-cell lithium batteries, is described. The system works with coils with a diameter of 200 mm, full operability is maintained for a distance between the coils centers up to 100 mm. The efficiency in the entire range of operation modes is not lower than 74%, when measured from the 220 V mains to the output to the battery. When designing, the goal was to minimize the weight of the receiving part to facilitate its installation on the UAV and minimize the impact on its thrust-to-weight ratio.

Wireless energy transfer; resonant transformer; synchronous rectifier; air transformer; quasi-resonant voltage source inverter.

Введение. Широкое распространение мобильных электрических средств передвижения на земле, воде, в воздухе, различных гаджетов и другого оборудования, питающихся от аккумуляторных батарей (АКБ), ставят задачу организации надежной их зарядки в различных условиях (в т.ч. экстремальных), обеспечивающих автоматизацию процесса, малую зависимость от природных факторов (осадки, сырость, температурные параметры и др.), защиту от поражения электрическим током, скрытность зарядного устройства в случае необходимости. В наибольшей степени этим требованиям соответствует процесс беспроводной зарядки АКБ.

В настоящее время наиболее эффективным способом беспроводной передачи электрической энергии на небольшие расстояния является использование магнитно-связанных катушек [1–9]. Этот способ использован в стандарте беспроводных зарядок Qi [10–12] для мобильных устройств; прорабатываются варианты реализации беспроводной зарядки батарей электромобилей [13–15].

При создании таких систем основными критериями являются высокий КПД, небольшая себестоимость и массогабаритные показатели (особенно приемной части), простота пользования, соответствие санитарным нормам (индукция поля рассеяния), устойчивая работа в большом диапазоне изменения эквивалентных параметров воздушного трансформатора (расстояние между приемной и передающей катушками, смещение между их осями).

Основными путями повышения КПД являются использование высокодобротных катушек, намотанных литцендратом, установка синхронных выпрямителей на приемной стороне, а также оптимальное управление (выбор рабочей частоты и согласование сопротивления нагрузки). Здесь следует сразу отметить, что согласование сопротивления нагрузки требует применения дополнительного DC-DC преобразователя на приемной стороне [9, 16–19], что усложняет схему, ухудшает массогабаритные параметры приемной части и повышает ее себестоимость.

Соблюдение санитарных норм по индукции полей рассеяния достигается за счет проработки параметров воздушного трансформатора (рабочая индукция, конструкция магнитопровода) и применения экранирования. Причем экраны могут быть как из ферромагнитных материалов, так и комбинированные (ферромагнетик + проводник).

Задача обеспечения эффективной работы в большом диапазоне изменения эквивалентных параметров воздушного трансформатора вынуждает идти на компромиссы между эффективностью работы и удобством пользования. Для минимизации потерь энергии следует стремиться к максимальному коэффициенту связи передающей и приемной катушек.

Можно показать, что теоретический максимум КПД воздушного трансформатора является функцией произведения (kQ), где k – коэффициент связи, Q – добротность. Но требование обеспечения высокого коэффициента связи снижает удобство пользования системой, так как потребует точного и близкого распо-

ложения катушек. Так, зарядные устройства стандарта Qi работают при коэффициенте связи (0,3 ... 0,6). Беспроводные зарядные устройства для электромобилей рассчитываются на работу при меньшем коэффициенте связи, (0,15 ... 0,35) [13, 17].

При проектировании системы беспроводной передачи энергии, работающей в большом диапазоне изменения коэффициента связи и в большом диапазоне передаваемых мощностей (т.е. при изменении эквивалентного сопротивления нагрузки в широких пределах), усложняется задача синтеза регулятора, управляющего работой передающей стороны.

подавляющее большинство систем строится с использованием принципа последовательной компенсации (series-series compensation) как в передатчике, так и в приемнике [3]. В результате имеется два магнитно-связанных резонансных контура. Но в такой системе, как известно, при коэффициенте связи, превышающем критический, происходит разделение полюсов и результирующая АЧХ становится «двугорбой», с двумя максимумами [16, 20]. Эта не монотонность АЧХ значительно усложняет синтез системы управления, разработчики предпочитают выбирать параметры воздушного трансформатора так, чтобы коэффициент связи во всем диапазоне режимов был меньше критического, и АЧХ имела один максимум.

Даже, несмотря на то, что такой компромисс (уменьшение коэффициента связи, а, следовательно, необходимость увеличения напряжения на передающей катушке и соответствующее увеличение тока намагничивания) ведет к увеличению потерь в системе.

Цель исследования состоит в разработке беспроводной системы передачи энергии, удовлетворяющей следующим критериям:

- ◆ простая приемная часть, желательно имеющая малую массу;
- ◆ отсутствие необходимости хорошего согласования резонансных частот передающего и приемного контуров;
- ◆ работа при минимальном коэффициенте связи не более 0,15 и при максимальном коэффициенте связи не менее 0,6;
- ◆ выходная мощность экспериментального образца не менее 200 Вт при выходном напряжении 22,2 ... 25,2 В (6S литиевая батарея);
- ◆ возможность масштабирования для увеличения мощности.

Вышеприведенный набор требований определил следующую структуру системы:

- ◆ приемник с последовательной компенсацией и мостовым синхронным выпрямителем, без преобразователя согласования сопротивления;
- ◆ приемная и передающая катушки без ферромагнитных сердечников, выполнены литцендратом, параметры контуров выбраны из условия минимизации числа витков;
- ◆ передатчик с отдельным управлением амплитудой и частотой выходного напряжения с выходным контуром, имеющим резонансную частоту значительно ниже, чем у приемного контура.

Передатчик системы беспроводной передачи энергии. Разнесение резонансных частот контуров снимает проблему разделения полюсов (АЧХ в рабочем диапазоне частот имеет один максимум), но приводит к тому, что преобразователь передатчика будет нагружен реактивным (индуктивным) током. Исходя из этого, для снижения потерь переключения применен квазирезонансный выходной каскад.

Кроме того, работа передающего контура «далеко» от резонансной частоты затрудняет использование принципа обратного рассеяния (back scattering) для организации передачи информации от приемника в передатчик. Поэтому в приемнике предусмотрена возможность отключения нагрузки при достижении максимального напряжения на выходе. Эта мера также повышает надежность работы прием-

ника (так, устройства стандарта QI выходят из строя при аварийном повышении напряжения на выходе – отсутствие элементов защиты объяснено в стандарте необходимостью уменьшения габаритов приемника [10]).

Принципиальная электрическая схема силовой части передатчика приведена на рис. 1. Входной выпрямитель передатчика состоит из диодного моста VD1 со сглаживающим конденсатором C1. Термистор NTC1 служит для ограничения тока заряда C1 при включении в сеть. Выпрямленное и сглаженное напряжение поступает на понижающий преобразователь, выполненный на элементах VT1, VT3, L1, C2. Он работает с широтно-импульсным управлением и обеспечивает регулируемое напряжение питания выходного полумоста VT2VT4. В качестве нижнего ключа (VT3) использован IGBT с антипараллельным диодом, хотя здесь можно оставить только диод. Выбранное решение преследует две цели: во-первых, позволяет обеспечить управление верхним транзистором (VT1) по схеме плавающего питания (bootstrap) – наличие IGBT гарантирует заряд «плавающего» конденсатора драйвера VT1; во-вторых, упрощает синтез регулятора напряжения на конденсаторе C2 за счет линеаризации передаточной характеристики преобразователя путем исключения бестоковых интервалов в токе L1.

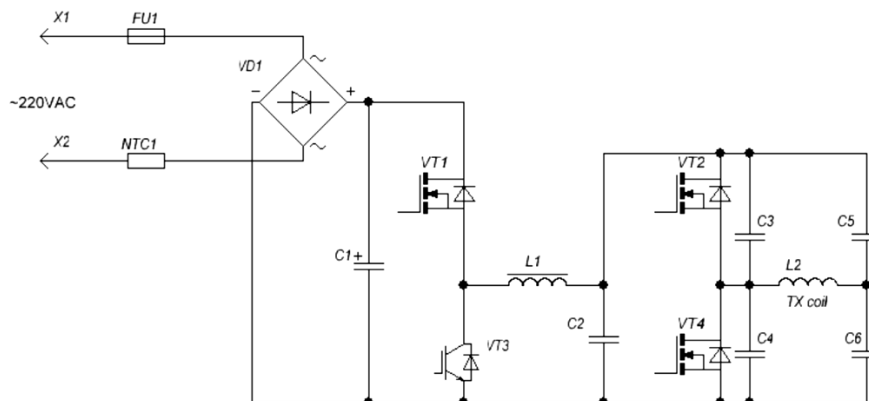


Рис. 1. Схема силовой части передатчика системы беспроводной передачи энергии

Применять в качестве VT3 полевой транзистор (MOSFET) не представляется рациональным из-за большого времени обратного восстановления диода, что характерно для высоковольтных MOSFET.

Выходной полумостовой преобразователь VT2VT4 работает с коэффициентом заполнения 50% и нагружен на передающий контур L2C5C6. Назначение конденсаторов C3 и C4 – обеспечение «мягкого» выключения силовых транзисторов VT2 и VT4. Так как выходной ток полумоста при работе системы индуктивный, то для снижения коммутационных потерь необходимо задержать рост напряжения на закрываемом транзисторе. Это и обеспечивают конденсаторы C3 и C4, установленные максимально близко к соответствующим транзисторам – в противном случае индуктивности монтажа сведут на нет эффект от их установки. Открытие транзисторов при индуктивном характере выходного тока происходит мягко, при близком к нулю напряжении на канале, так как ток в это время протекает через обратный диод.

Таким образом, амплитуда напряжения на передающем контуре регулируется преобразователем VT1VT3L1C2, а частота – преобразователем VT2VT4L2C3C4C5C6.

Система управления передатчиком выполнена на однокристальном микроконтроллере с ядром ARM. На бортовой АЦП поступают сигналы: напряжение на C1, напряжение на C2, ток в L1, напряжение в средней точке соединения C5 и C6. Последний сигнал используется для оценки амплитуды и фазы тока в L2 и позволяет обойтись без установки дополнительного датчика тока. Контроллер формирует сигналы управления драйверами затворов VT1 – VT4.

Приёмник системы беспроводной передачи энергии. Принципиальная электрическая схема силовой части приемника приведена на рис. 2.

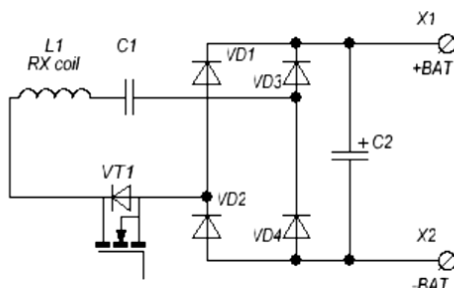


Рис. 2. Схема силовой части приемника системы беспроводной передачи энергии

Приемник состоит из контура L1C1, отключающего транзистора VT1, моста VD1 – VD4 (здесь в качестве диодов применены специализированные микросхемы синхронного выпрямления со встроенным силовым транзистором) и выходного сглаживающего конденсатора C2.

При выборе типов и номиналов элементов приемника учитывались максимальное напряжение на приемном контуре (при максимальном выходном токе) и рабочая частота. Эти две переменные однозначно определяют емкость C1 и индуктивность L1. Отключающий транзистор VT1 должен иметь допустимое напряжение «сток-исток» не менее удвоенной амплитуды ЭДС на L1 и минимальное сопротивление канала в открытом состоянии. Также следует учесть, что при закрытии VT1 энергия, запасенная в элементах контура L1C1, будет выделена в его канале в режиме лавинного пробоя. Поэтому паспортная энергия пробоя повторяющимися импульсами для VT1 должна быть не менее максимальной энергии, запасаемой в контуре L1C1.

Алгоритм работы беспроводной системы передачи энергии. Изготовлен экспериментальный образец беспроводной системы передачи энергии с применением описанных принципов построения.

Диаметры передающей и приемной катушек составляли 200 мм, обеспечивалась работа с дистанцией между катушками до 100 мм (при этом коэффициент связи составлял менее 0,1). Выходное напряжение приемника 25,2 В при максимальном токе до 10 А. Рабочая частота системы составляла 50 ... 70 кГц. В силовой части передатчика применены транзисторы AOT2500L, управляемые с применением драйвера IRS2184 с буферными повторителями на выходах; система управления передатчиком реализована на микроконтроллере STM32F030F4P6; в приемнике использованы микросхемы синхронного выпрямления DK5V45R10. КПД системы, измеренный от входа переменного напряжения 220 В 50 Гц до выхода на АКБ, составил не менее 74%.

Реализован следующий алгоритм работы.

В режиме ожидания производится периодический контроль появления приемника. Для этого в режиме опроса на передающую катушку подается напряжение с амплитудой 50 % максимальной и линейно уменьшающейся частотой (от 90 кГц до 30 кГц в эксперименте) и контролируется потребляемая полумостом активная мощность. Если она превышает предустановленное пороговое значение (порог определяется при калибровке – прямым измерением при отсутствии приемной катушки), считается, что приемник присутствует, и передатчик переходит в рабочий режим. Амплитуда напряжения в режиме опроса определяет, при каком коэффициенте связи (т.е. при каком расстоянии между приемной и передающей катушками) целесообразно начинать работу.

В рабочем режиме функционирует алгоритм поиска точки максимальной мощности типа РАО (Perturb And Observe). Рабочая частота изменяется на небольшую величину Δf , оценивается изменение потребляемой полумостом передатчика мощности ΔP . В экспериментальном образце время усреднения измерений составляло 20 мс (для уменьшения влияния помех с частотой сети). Если $\Delta P > 0$, изменение частоты продолжается в ту же сторону и Δf увеличивается по абсолютной величине, в противном случае знак Δf меняется на противоположный, а модуль Δf уменьшается до минимума.

Кроме этого, если мощность превышает предустановленный максимальный порог, изменение частоты блокируется, а напряжение питания полумоста уменьшается до снижения мощности до безопасной величины. Напротив, если точка максимальной мощности найдена, а величина мощности недостаточна, напряжение питания полумоста увеличивается.

При падении мощности ниже предустановленного порога передатчик переходит в режим опроса. Это произойдет либо при удалении приемника на значительное расстояние, либо при отключении приемника (закрытие VT1, рис. 2) при достижении конечного напряжения конца заряда АКБ, подключенной к приемнику.

В передатчике также реализован контроль температуры силовых компонентов и отключение при перегреве.

В приемнике наиболее тяжелый тепловой режим наблюдался у резонансного конденсатора (C1, рис. 2), собранного из 4-х параллельно включенных металлоплёночных конденсаторов СВВ81 0,022 мкФ $\times$ 1600 В.

Микросборки синхронных выпрямителей VD1 – VD4 дополнительного теплоотвода не требовали, достаточно небольших полигонов на печатной плате. При выходном токе 10 А суммарная мощность, рассеиваемая на VD1 – VD4, не превышала 2 Вт.

Для реализации возможности регулирования передаваемой мощности следует обеспечить передачу данных между приемником и передатчиком. По мнению авторов, наиболее рационально использовать для этой цели маломощный радиоканал, поскольку использование методов параметрической передачи данных за счет изменения параметров приемного контура [21] при мощностях в сотни Вт ведут к существенному увеличению габаритов, массы и себестоимости приемной части. В экспериментальном образце реализована возможность радиосвязи с применением микросхем SYN115 в передатчике и SYN480R в приемнике. Они позволяют организовать передачу двоичных данных на частоте 433 МГц с амплитудной манипуляцией несущей. Использовалось программное кодирование BMC (Biphase Mark Coding) с контролем целостности пакетов данных с помощью контрольной суммы CRC8.

При наличии канала передачи данных становится возможным также определение наличия посторонних предметов в поле передающей катушки, а также оптимизация режима работы по условию максимума КПД. Если же канал связи между приемником и передатчиком отсутствует, определение наличия инородных проводящих предметов в рабочей зоне невозможно – они неотличимы от приемника по влиянию на эквивалентные параметры передающей катушки.

Заключение. Предложен вариант построения простой системы беспроводной передачи электроэнергии, работающей в большом диапазоне изменения коэффициента связи приемной и передающей катушек, нетребовательной к параметрам компонентов, имеющей несложный алгоритм управления передатчиком и простое схемное решение приемной части.

Подобные системы беспроводной передачи энергии могут найти применение, например, для зарядки разведывательных БПЛА с вертикальным взлетом/посадкой, для зарядки подводных или наземных беспилотных аппаратов. Это позволит организовать их длительную автономную работу и многократную зарядку их батарей без необходимости привлечения обслуживающего технического персонала. Также подобные беспроводные системы меньшей мощности могут быть интегрированы в портативные изделия (рации, фонари и т.п.).

Работа выполняется при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания FRRG-2023-0011.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Costanzo A., Dionigi M., Masotti D., Mongiardo M., Monti G., Tarricone L., and Sorrentino R. Electromagnetic Energy Harvesting and Wireless Power Transmission: A Unified Approach // *Proceedings of the IEEE*. – Nov. 2014. – Vol. 102, No. 11. – P. 1692-1711.
2. Covic G.A. and Boys J.T. Inductive Power Transfer // *Proceedings of the IEEE*. – June 2013. – Vol. 101, No. 6. – P. 1276-1289.
3. Bosshard R., Badstübner U., Kolar J.W., Stevanovic I. Comparative Evaluation of Control Methods for Inductive Power Transfer // *Proceedings of the International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA 2012)*, Nagasaki, Japan, November 11-14, 2012. – DOI: 10.1109/ICRERA.2012.6477400.
4. Garnica J., Chinga R.A. and Lin J. Wireless Power Transmission: From Far Field to Near Field // *Proceedings of the IEEE*. – June 2013. – Vol. 101, No. 6. – P. 1321-1331.
5. Kurs A., Karalis A., Moffatt R., Joannopoulos J.D., Fisher P., and Soljacic M. Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances // *Science*. – June 2007. – Vol. 317, No. 5834. – P. 83-86.
6. Wei X., Wang Z., and Dai H. A Critical Review of Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances // *Energies*. – July 2014. – Vol. 7, No. 7. – P. 4316-4341.
7. Nambiar S.C., Manteghi M. A simple wireless power transfer scheme for implanted devices // *Radio Science Meeting (USNC-URSI NRSM)*, United States National Committee of URSI National, 2014.
8. Ho S.L., Wang J., Fu W.N., and Sun M. A Comparative Study Between Novel Witricity and Traditional Inductive Magnetic Coupling in Wireless Charging // *IEEE Transactions on Magnetism*. – May 2011. – Vol. 47, No. 5. – P. 1522-1525.
9. Burlaka V.V., Podnebennaya S.K., Gulakov S.V. Analysis of Approaches to the Efficiency Improvement of Wireless Power Transmission Systems Using Low-Frequency Magnetic Fields // In *proceedings of 2018 IEEE 38th International Conference on Electronics And Nanotechnology (ELNANO)*, Kyiv, 24-26 April, 2018. – Kyiv: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2018. – P. 572-575. – DOI: 10.1109/ELNANO.2018.8477481.
10. Qi Wireless Power Transfer System Description. Vol. I: Low Power Part 1: Interface Definition. Version 1.0.1. – Wireless Power Consortium, October 2010.
11. Qi Wireless Charging. – Режим доступа: www.qiwireless.com.
12. Wireless Power Consortium. – Режим доступа: www.wirelesspowerconsortium.com.

13. Bosshard R., Kolar J.W. Inductive Power Transfer for Electric Vehicle Charging – Technical Challenges and Tradeoffs // *IEEE Power Electronics Magazine*. – September 2016. – P. 22-30. – DOI: 10.1109/PEL.2016.2583839.
14. Qiu Chun, Chau K.T., Chunhua Liu, Chan C.C. Overview of Wireless Power Transfer for Electric Vehicle Charging // *Proceedings of EVS27 International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium (17-20 November 2013)*. – Barcelona, 2013. – P. 1-9.
15. Villa J.L., Sanz J., Sallan J. Inductive battery charging system for electric vehicles // *Proceedings of EVS27 International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium (17-20 November 2013)*. – Barcelona, 2013. – P. 1-4.
16. Bosshard R., Kolar J.W., Wunsch B. Control Method for Inductive Power Transfer with High Partial-Load Efficiency and Resonance Tracking // *Proceedings of the International Power Electronics Conference – ECCE Asia (IPEC 2014), Hiroshima, Japan, May 18-21, 2014*. – DOI: 10.1109/IPEC.2014.6869889.
17. Pinuela M., Yates D.C., Lucyszyn S., Mitcheson P.D. Maximizing DC-to-Load Efficiency for Inductive Power Transfer // *IEEE Transactions on Power Electronics*. – 2013. – Vol. 28. – P. 2437-2447.
18. Wang C.S., Covic G.A., and Stielau O.H. Power Transfer Capability and Bifurcation Phenomena of Loosely Coupled Inductive Power Transfer Systems // *IEEE Trans. Ind. Electron.* – Feb. 2004. – Vol. 51, No. 1. – P. 148-157.
19. Pantic Z., and Lukic S.M. Framework and Topology for Active Tuning of Parallel Compensated Receivers in Power Transfer Systems // *IEEE Trans. Power Electron.* – Nov. 2012. – Vol. 27, No. 11. – P. 4503-4513.
20. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. В 2 т. Т. 1. Электрические цепи: учебник для ВУЗов. – 11-е изд., испр. и доп. – М.: Гардарики, 2007. – 701 с.
21. MicroID ® 125 kHz RFID System Design Guide. Document No. DS51115F. Microchip Technology Inc. – 2004. – 210 p. – Режим доступа: ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/51115f.pdf.

REFERENCES

1. Costanzo A., Dionigi M., Masotti D., Mongiardo M., Monti G., Tarricone L., and Sorrentino R. Electromagnetic Energy Harvesting and Wireless Power Transmission: A Unified Approach, *Proceedings of the IEEE*, Nov. 2014, Vol. 102, No. 11, pp. 1692-1711.
2. Covic G.A. and Boys J.T. Inductive Power Transfer, *Proceedings of the IEEE*, June 2013, Vol. 101, No. 6, pp. 1276-1289.
3. Bosshard R., Badstübner U., Kolar J.W., Stevanovic I. Comparative Evaluation of Control Methods for Inductive Power Transfer, *Proceedings of the International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA 2012), Nagasaki, Japan, November 11-14, 2012*. DOI: 10.1109/ICRERA.2012.6477400.
4. Garnica J., Chinga R.A. and Lin J. Wireless Power Transmission: From Far Field to Near Field, *Proceedings of the IEEE*, June 2013, Vol. 101, No. 6, pp. 1321-1331.
5. Kurs A., Karalis A., Moffatt R., Joannopoulos J.D., Fisher P., and Soljacic M. Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances, *Science*, June 2007, Vol. 317, No. 5834, pp. 83-86.
6. Wei X., Wang Z., and Dai H. A Critical Review of Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances, *Energies*, July 2014, Vol. 7, No. 7, pp. 4316-4341.
7. Nambiar S.C., Manteghi M. A simple wireless power transfer scheme for implanted devices, *Radio Science Meeting (USNC-URSI NRS), United States National Committee of URSI National*, 2014.
8. Ho S.L., Wang J., Fu W.N., and Sun M. A Comparative Study Between Novel Witricity and Traditional Inductive Magnetic Coupling in Wireless Charging, *IEEE Transactions on Magnetics*, May 2011, Vol. 47, No. 5, pp. 1522-1525.
9. Burlaka V.V., Podnebennaya S.K., Gulakov S.V. Analysis of Approaches to the Efficiency Improvement of Wireless Power Transmission Systems Using Low-Frequency Magnetic Fields, In *proceedings of 2018 IEEE 38th International Conference on Electronics And Nanotechnology (ELNANO), Kyiv, 24-26 April, 2018*. Kyiv: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2018, pp. 572-575. DOI: 10.1109/ELNANO.2018.8477481.

10. Qi Wireless Power Transfer System Description. Vol. I: Low Power Part 1: Interface Definition. Version 1.0.1. – Wireless Power Consortium, October 2010.
11. Qi Wireless Charging. Available at: www.qiwireless.com.
12. Wireless Power Consortium. Available at: www.wirelesspowerconsortium.com.
13. Bosshard R., Kolar J.W. Inductive Power Transfer for Electric Vehicle Charging – Technical Challenges and Tradeoffs, *IEEE Power Electronics Magazine*, September 2016, pp. 22-30. DOI: 10.1109/MPEL.2016.2583839.
14. Qiu Chun, Chau K.T., Chunhua Liu, Chan C.C. Overview of Wireless Power Transfer for Electric Vehicle Charging, *Proceedings of EVS27 International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium (17-20 November 2013)*. Barcelona, 2013, pp. 1-9.
15. Villa J.L., Sanz J., Sallan J. Inductive battery charging system for electric vehicles, *Proceedings of EVS27 International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium (17-20 November 2013)*. Barcelona, 2013, pp. 1-4.
16. Bosshard R., Kolar J.W., Wunsch B. Control Method for Inductive Power Transfer with High Partial-Load Efficiency and Resonance Tracking, *Proceedings of the International Power Electronics Conference – ECCE Asia (IPEC 2014), Hiroshima, Japan, May 18-21, 2014*. DOI: 10.1109/IPEC.2014.6869889.
17. Pinuela M., Yates D.C., Lucyszyn S., Mitcheson P.D. Maximizing DC-to-Load Efficiency for Inductive Power Transfer, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2013, Vol. 28, pp. 2437-2447.
18. Wang C.S., Covic G.A., and Stielau O.H. Power Transfer Capability and Bifurcation Phenomena of Loosely Coupled Inductive Power Transfer Systems, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Feb. 2004, Vol. 51, No. 1, pp. 148-157.
19. Pantic Z., and Lukic S.M. Framework and Topology for Active Tuning of Parallel Compensated Receivers in Power Transfer Systems, *IEEE Trans. Power Electron.*, Nov. 2012, Vol. 27, No. 11, pp. 4503-4513.
20. Bessonov L.A. Teoreticheskie osnovy elektrotehniki. V 2 t. T. 1. Elektricheskie tsepi: uchebnik dlya VUZov [Theoretical foundations of electrical engineering. In 2 vol. Vol. 1. Electric circuits: a textbook for universities. 11th ed. Moscow: Gardariki, 2007, 701 p.
21. MicroID ® 125 kHz RFID System Design Guide. Document No. DS51115F. Microchip Technology Inc., 2004, 210 p. Available at: ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/51115f.pdf.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор К.Е. Румянцев.

Бурлака Владимир Владимирович – ФГБОУ ВО "ПГТУ"; e-mail: vburlaka@rambler.ru; г. Мариуполь, Россия; тел.: +79497048603; кафедра автоматизации электро- и теплоэнергетических комплексов; зав. кафедрой; д.т.н.; доцент.

Гулаков Сергей Владимирович – e-mail: gulakov.s.v@yandex.ru; тел.: +79497298638; кафедра автоматизации электро- и теплоэнергетических комплексов; д.т.н.; профессор.

Головин Андрей Юрьевич – e-mail: a.golovin@tms-2022.ru; тел.: +79497128054; кафедра автоматизации электро- и теплоэнергетических комплексов; м.н.с.

Мироненко Дмитрий Сергеевич – e-mail: mironenko.d.s@yandex.ru; тел.: +79496094732; кафедра информационных систем, технологий и автоматизации в строительстве; зав. кафедрой; к.т.н.; доцент.

Burlaka Vladimir Vladimirovich – FSBEI of HE "PSTU"; e-mail: vburlaka@rambler.ru; Mariupol, Russia; phone: +79497048603; the department of automation of electrical and thermal power complexes; head of the department; dr. of eng. sc.; associate professor.

Gulakov Sergey Vladimirovich – e-mail: gulakov.s.v@yandex.ru; phone: +79497298638; the department of automation of electrical and thermal power complexes; dr. of eng. sc.; professor.

Golovin Andrey Yurievich – e-mail: a.golovin@tms-2022.ru; phone: +79497128054; the department of automation of electrical and thermal power complexes; research associate.

Mironenko Dmitrii Sergeevich – e-mail: mironenko.d.s@yandex.ru; phone: +79496094732; the department of information systems, technologies and automation in construction; head of the department; cand. of eng. sc.; associate professor.