

УДК 621.3.051.025

Исследование системы беспроводной передачи энергии

¹ Широков И. Б., ² Сердюк И. В., ³ Азаров А. А., ⁴ Широкова Е. И.

Севастопольский государственный университет

ул. Университетская, 33, Севастополь, 299053, Российская Федерация

¹ shirokov@ieee.org

² serduk@ieee.org

³ azarov@ieee.org

⁴ shirokova@ieee.org

Получено: 22 мая 2022 г.

Отрецензировано: 5 июня 2022 г.

Принято к публикации: 5 июня 2022 г.

Аннотация: В статье обсуждается новый подход к беспроводной передаче энергии для заряда аккумуляторных батарей электромобилей. Система передачи электроэнергии состоит из генераторного блока с измерителем КСВ, двух электромагнитных структур и выпрямительного блока. Электромагнитная структура, представленная в виде микрополосковой линии, не излучает электромагнитную энергию в автономном режиме. При сближении электромагнитных структур они превращаются в направленный ответвитель, при этом происходит эффективная передача мощности. Моделирование системы в среде проектирования AWR проводилось при различном взаимном расположении микрополосковых структур. Из моделирования видно, что потери мощности не превышают 1 дБ в широком диапазоне сдвигов между элементами системы и ее взаимным расположением. Изготовлена экспериментальная модель системы передачи мощности и проведены ее экспериментальные исследования. Результаты экспериментов и моделирования хорошо согласуются. Размеры и вес системы позволяют использовать ее для заряда аккумуляторных батарей электромобилей.

Ключевые слова: беспроводная передача энергии; направленные ответвители; схемы связи; электромагнитная связь; генераторы, управляемые напряжением.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Исследование системы беспроводной передачи энергии / И. Б. Широков и др. // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2022. Т. 5, № 4. С. 445—457.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Исследование системы беспроводной передачи энергии / И. Б. Широков, И. В. Сердюк, А. А. Азаров и др. // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2022. — Т. 5, № 4. — С. 445—457.

1. Введение

Электромобили широко используются сегодня, а в скором времени их использование будет повсеместным. Однако разряд аккумуляторных батарей электромобилей происходит довольно быстро из-за существенного потребления электроэнергии их двигателями. Существует определенный компромисс между полезной нагрузкой электромобилей и весом их аккумуляторных батарей. В результате срок службы аккумуляторных батарей электромобилей относительно невелик. Таким образом, в указанный промежуток времени аккумулятор электромобиля должен заряжаться.

Следует понимать, что во многих случаях применения электромобилей использование присутствия обслуживающего персонала невозможно или экономически неоправданно. Таким образом, контактные способы заряда аккумуляторных батарей исключены, а беспроводная передача энергии является одним из способов заряда аккумуляторных батарей электромобилей. При этом крайне интересны размеры и масса бортового элемента для беспроводного заряда аккумуляторных батарей. Любая дополнительная единица веса и дополнительный дюйм размера уменьшают полезную нагрузку электромобилей [1].

Таким образом, при проектировании системы беспроводного заряда необходимо применять сложные компромиссы. И этот компромисс должен быть умножен на безопасность системы в отношении воздействия системы заряда на биологические объекты с учетом беспроводного характера передачи энергии.

2. Проблемы беспроводной передачи энергии для зарядки аккумуляторных батарей электротранспортных средств

Что касается использования беспроводной передачи энергии для заряда аккумуляторных батарей электромобилей, то можно указать на ряд проблем, которые не могут быть решены с помощью существующих систем беспроводной передачи энергии.

Прежде всего, время заряда должно быть как можно короче, по крайней мере, во много раз меньше, чем срок эксплуатации электромобилей на одном заряде. Приблизительно это время должно быть равно 10—20 минутам. В противном случае экономика использования электромобилей будет слабой. Принимая во внимание класс электромобилей, двадцатиминутная зарядка предполагает использование киловатта беспроводной передаваемой мощности.

Упомянутая особенность накладывает определенные ограничения на использование известного магнитно-резонансного метода беспроводной

передачи энергии [2—5], известного как *WiTricity*. Эффективность этого способа беспроводной передачи энергии достигает 40 %, а дальность действия системы достигает нескольких метров. Однако напряженность поля в непосредственной близости от зарядной станции для упомянутой выше беспроводной передачи энергии будет достаточно высокой, а информации об опасном воздействии такой системы на биологические объекты нет. Об этом негативном влиянии мы можем судить лишь косвенно. В то же время существуют жесткие нормы, регламентирующие воздействие электромагнитных полей на человека [6], и мы должны строго следовать им, создавая новые зарядные станции беспроводной передачи энергии.

В отличие от предшествующего подхода индукционный метод передачи энергии, известный как Ци-стандарт [7, 8], лишен указанного недостатка. Эта технология используется во всем мире для заряда мобильных телефонов. Эта технология предполагает использование спаренных многовитковых катушек в гаджете и зарядной станции. Следует понимать, что высокая эффективность системы может быть достигнута только при очень плотном взаимном расположении катушек. Передача мощности почти полностью прекращается при расстоянии между витками более 5 мм; этот факт хорошо известен и доказан. Даже при нормальной работе КПД системы очень слабый и не превышает 10 %. Так, при передаваемой мощности в сотни ватт большая доля энергии будет преобразована в тепло.

Очевидно, что подобный подход не подходит для беспроводного заряда аккумуляторных батарей электромобилей.

3. Новая технология беспроводной передачи энергии

Недавно для изучения авторами была разработана новая технология беспроводной передачи энергии, свободная от упомянутых выше проблем [9—11]. Предложены полосковые конструкции для использования в составе системы беспроводной передачи электроэнергии. При сближении отдельно стоящих микрополосковых линий друг с другом обращенными сторонами они образуют направленный ответвитель на симметричных полосковых линиях.

С одной стороны, технология связанных полосковых линий сегодня хорошо известна. Взаимная связь двух полосковых линий обеспечивает направленную передачу мощности. Однако традиционный подход к конструкции направленного ответвителя не предполагает использования его для передачи мощности.

Стандартное решение предполагает использование оконечных балластных резисторов и отрезков полосковых линий четвертьволновой дли-

ны. Взаимное затухание мощности в этой системе связанных линий достигает значения в -3 дБ при хорошем решении, т. е. не менее половины подводимой мощности рассеивается в первом балластном резисторе. Часть энергии, отраженная от нагрузки, также рассеивается во втором балластном резисторе. При передаче мощности в 100 ватт не менее пятидесяти ватт превращается в тепло (экономика очень плохая), и это тепло, кстати, приходится отводить от балластных резисторов.

В отличие от традиционного направленного ответвителя, основанного на использовании полосковых линий, в предлагаемой системе отсутствуют оконечные балластные резисторы. Концы полосковых линий открыты. Таким образом, вся мощность либо передается в нагрузку, либо возвращается к источнику. Непроизводительные потери отсутствуют. Следует понимать, что известные типы полосковых линий, либо микрополосковые (самостоятельная микрополосковая структура), либо симметричные полосковые линии (направленный ответвитель), не излучают электромагнитную энергию в окружающее пространство, это общеизвестный факт. Таким образом, та часть энергии, которая не была передана в нагрузку, полностью возвращается к источнику. В этом основное отличие предлагаемой системы от существующих. Основная задача при проектировании предлагаемой системы заключается в увеличении передаваемой части энергии за счет возвращаемой.

В предлагаемой системе эта задача решается за счет увеличения длины присоединяемой полосковой линии. Эти длины линий намного больше четверти длины волны на рабочей частоте, и направленная передача мощности осуществляется многократно.

Так как оконечные резисторы исключены, исключается и рассеивание в них мощности. Волны, распространяющиеся в этих линиях, отражаются от ее открытых концов. Таким образом, отраженные волны также участвуют в процессе передачи энергии. Это приводит к увеличению коэффициента передачи мощности и уменьшению возвращаемой мощности.

С учетом вышеизложенного происходит практически полная передача мощности, что с научной и практической точек зрения является принципиально новым. Недавно, упомянутая технология была запатентована [9].

Далее обе полосковые линии были закручены в спирали, причем закручивание упомянутых сопряженных спиралей производится зеркально. Такое решение приводит к экономии места и увеличению допусков с учетом взаимного расположения конструкций полосковых линий.

Следует понимать, что взаимное поперечное или продольное смещение двух прямых полосковых линий приводит к уменьшению участка сцепления. В этих случаях имеет место деградация передачи мощности.

В то же время при взаимном смещении намотанных в спираль полосковых линий происходит сцепление соседних ветвей спирали и не происходит существенного ухудшения передачи мощности.

Предлагаемая технология передачи мощности существенно отличается от известной, основанной на использовании обычного направленного ответвителя.

4. Моделирование

Предварительное моделирование беспроводной передачи энергии было выполнено в среде *AWR Design Environment*. Полученные зависимости коэффициента передачи мощности, $S(2,1)$ в децибелах (синий цвет, треугольники) и КСВн входной микрополосковой линии (розовый цвет, квадрат) от рабочей частоты представлены на рис. 1 — рис. 3 для расстояний между микрополосковыми линиями электромагнитных структур 5, 10 и 15 мм.

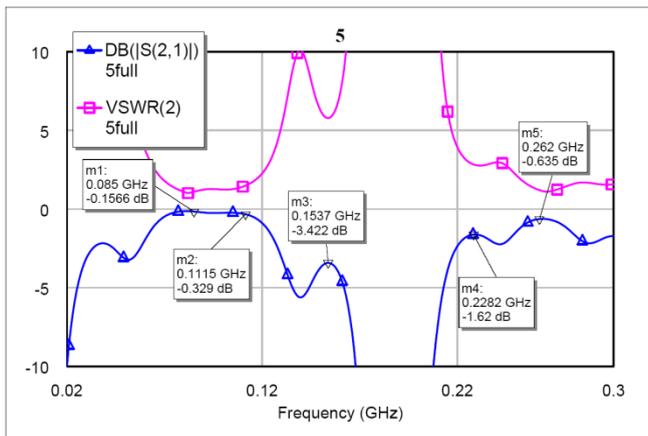


Рис. 1. Коэффициент передачи мощности и КСВ на расстоянии 5 мм.

Fig. 1. Power transfer ratio and VSWR at distance 5 mm

Как видно, форма кривых существенно меняется при сближении микрополосковых структур друг к другу более чем на 10 мм. Форма кривых остается неизменной при изменении расстояния от 20 до 30 мм (в работе не показано).

На приведенных рисунках маркер КСВн (розовые кривые) не выделен. Как видно, значение КСВн при некоторых оптимальных частотах передачи мощности незначительно превышает 1.

Очевидно, что рабочая частота должна изменяться по мере изменения расстояния между структурами. Критерием нахождения оптимальной

частоты является максимальный коэффициент передачи мощности. Этот аспект хорошо обсуждается в [12].

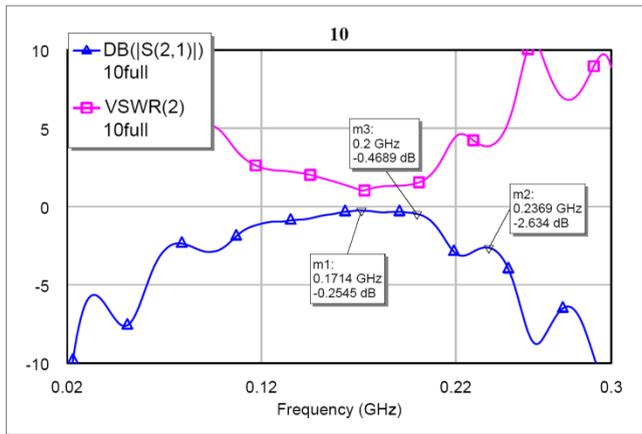


Рис. 2. Коэффициент передачи мощности и КСВ на расстоянии 10 мм.

Fig. 2. Power transfer ratio and VSWR at distance 10 mm

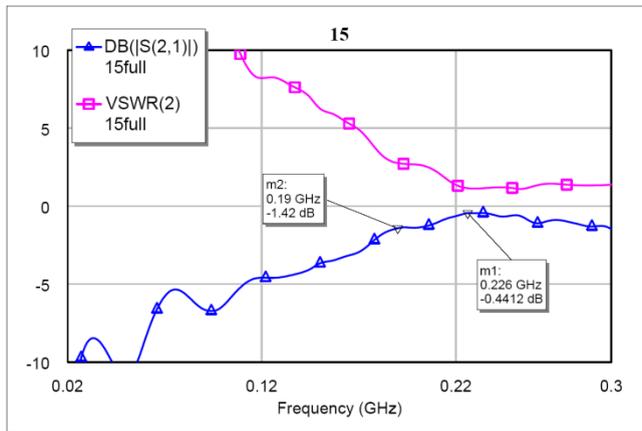


Рис. 3. Коэффициент передачи мощности и КСВ на расстоянии 15 мм.

Fig. 3. Power transfer ratio and VSWR at distance 15 mm

Таким образом, зависимость коэффициента передачи мощности в децибелах (ось Y) от расстояния между микрополосковыми структурами в миллиметрах (ось X) с учетом оптимального значения рабочей частоты показана на рис. 4.

Дополнительно на рис. 5 показан анализ зависимостей коэффициента передачи по мощности в децибелах (ось Y) от взаимных смещений

микроразрывных структур в миллиметрах (ось X) в обоих направлениях в плоскости (направление X — зеленым, направление Y — красным).

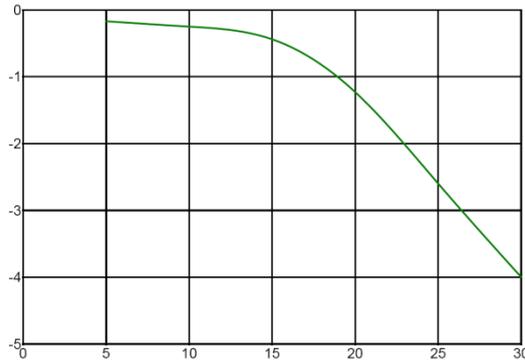


Рис. 4. Зависимость коэффициента передачи от расстояния между структурами.

Fig. 4. Dependence of transfer ratio from distance between structures

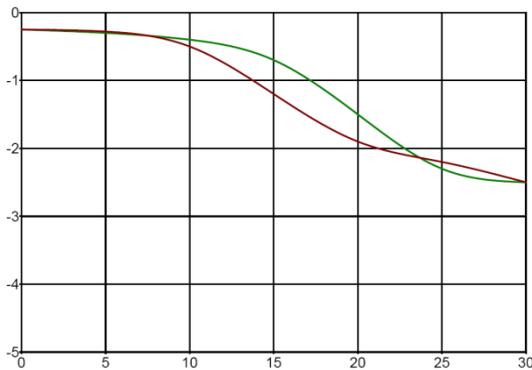


Рис. 5. Зависимость коэффициента передачи от взаимного смещения структур.

Fig. 5. Dependence of transfer ratio from mutual displacement of structures

5. Экспериментальные исследования

Изготовлен основной элемент системы беспроводной передачи энергии — микроразрывные структуры. Первая итерация предполагает закручивание спирали в квадрат (моделирование проводилось и для квадратной спирали). Микроразрывные структуры были изготовлены на гибком стеклотекстолите толщиной 0,2 мм и приклеены к поликарбонатной подложке толщиной 5 мм и размерами 220 мм × 220 мм. С нижней стороны был приклеен такой же стеклотекстолит с заземляющей пластиной. Моделировались одни и те же структуры.

Внешний вид одиночной микрополосковой структуры, закрученной по квадратной спирали, показан на рис. 6

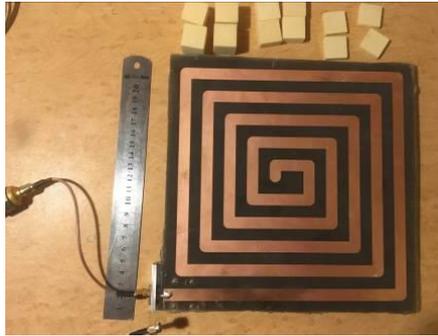


Рис. 6. Внешний вид одиночной микрополосковой структуры.

Fig. 6. Appearance of single microstrip structure

Желтые «кирпичики», показанные на рис. 7, изготовлены из твердого пенопласта и имеют высоту 5, 10 и 20 мм. С помощью них выставлялось необходимое расстояние между структурами.

Соединение обеих микрополосковых структур (одна расположена над другой лицом к лицу) к измерительному мосту и блоку детектирования измерителя КСВн и ослабления типа P2-102 показано на рис. 7.

На рис. 8 показано расстояние между структурами в 10 мм. На рабочей частоте 216 МГц (виден маркер) коэффициент передачи по мощности составил $-1,4$ дБ, КСВн на входе — 1,48. Форма кривых аналогична модельным кривым соответствующих взаиморасположений микрополосковых структур (см. рис. 2). Шкала Y для измеренного коэффициента передачи мощности отличается от моделированного. Измерения проводились для всех остальных взаимных размещений микрополосковых структур относительно реализованных симуляций.

Измеренная зависимость коэффициента передачи по мощности в децибелах (ось Y) от расстояния между микрополосковыми структурами в миллиметрах (ось X) представлена на рис. 9.

Результаты измерений немного хуже моделированных. Это связано с несовершенством измерительной аппаратуры. Однако форма измеренной кривой такая же, как у моделированной.

На рис. 10 представлены измеренные зависимости коэффициента передачи по мощности в децибелах (ось Y) от взаимных перемещений микрополосковых структур в миллиметрах (ось X) в обе стороны в плоскости (направление X — зеленым, направление Y — красным).



Рис. 7. Подключение микрополосковых структур к измерителю.

Fig. 7. Connection of microstrip structures to measurer

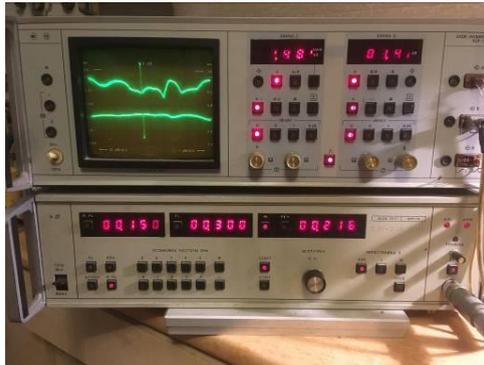


Рис. 8. Результаты измерений.

Fig. 8. Results of measurements



Рис. 9. Зависимость коэффициента передачи от расстояния между структурами.

Fig. 9. Dependence of transfer ratio from distance between structures

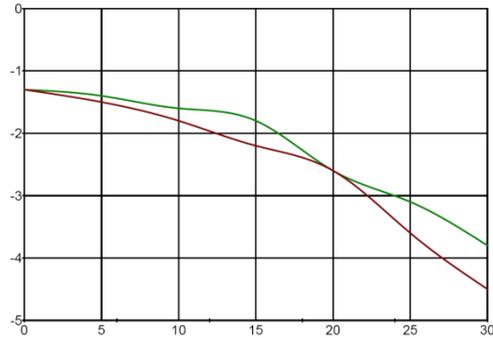


Рис. 10. Зависимости коэффициента передачи от взаимных смещений структур.

Fig. 10. Dependences of transfer ratio from structures mutual displacements

4. Заключение

Таким образом, в статье обсуждался новый подход к проектированию системы беспроводной передачи энергии. Предложенное решение подходит для использования для беспроводной зарядки аккумуляторных батарей электромобилей.

Размеры и масса элементов бортовой системы не имеют для электромобилей принципиального значения.

Допуск взаимного смещения микрополосковых конструкций зарядной станции и бортового оборудования вполне достаточен для отклонений в процессе парковки электромобилей.

Коэффициент передачи по мощности не превышает значения в $-0,25$ дБ (моделирование) или $-1,4$ дБ (реальные измерения) при расстоянии между микрополосковыми структурами в 10 мм. Полученное расхождение между моделированием и измерениями в 1 дБ коэффициента передачи по мощности вызвано использованием в тестируемых структурах медного проводящего слоя толщиной 18 мкм вместо 300 мкм при моделировании.

Основным преимуществом предлагаемой системы является отсутствие паразитных излучений при любом режиме работы зарядной станции. Опасное воздействие на биологические объекты системы беспроводной передачи энергии ничтожно при относительно высоком уровне передаваемой мощности.

Список литературы

1. Local promotion of electric mobility in cities : Guidelines and real application case in Italy / G. Comodi et al. // Energy. 2016. Vol. 95. P. 494—503.

2. Goodbye wires! MIT team experimentally demonstrates wireless power transfer, potentially useful for powering laptops, cell phones without cords.
URL: <http://news.mit.edu/2007/wireless-0607>.
3. Karalis A., Joannopoulos J. D., Soljačić M. Efficient wireless non-radiative mid-range energy transfer // *Annals of Physics*. 2008. Vol. 323. P. 34—48.
4. Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances / A. Kurs et al. // *Science*. 2007. Vol. 317, iss. 5834. P. 83—86.
5. Tran D. H., Vu V. B., Choi W. Design of a High-Efficiency Wireless Power Transfer System with Intermediate Coils for the On-Board Chargers of Electric Vehicles // *IEEE Trans. Power Electron*. 2018. Vol. 33. P. 175—187.
6. IEEE Std C95.1–2005 IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency, Electromagnetic Fields, 3 kHz to 300 GHz. Piscataway : IEEE, 2006.
7. Guidelines for Automotive Aftermarket Qi / Chargers The Wireless Power Consortium. 2012.
8. Global Qi Standard Powers Up Wireless Charging. URL: <https://www.prnewswire.com/news-releases/global-qi-standard-powers-up-wireless-charging-102043348.html>.
9. Широков И. Б. Способ беспроводной высокочастотной передачи электрической энергии. Патент России № 2704602, МПК H02J 50/00, H02J 50/90, H01Q 7/08. Оpubл. 30.10.2019, бюл. № 31.
10. Shirokova E. I. , Azarov A. A. , Shirokov I. B. The Study of Operation of the System of Wireless Energy Transfer at Real Conditions. In : 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), St. Petersburg and Moscow, Russia, 2020. P. 1306—1310.
11. Increasing the Efficiency of Wireless Power Transfer System / I. B. Shirokov. In : 2020 7th All-Russian Microwave Conference (RMC), Moscow, Russia. 2020. P. 147—150.
12. Способ обеспечения максимального коэффициента передачи высокочастотной передачи электрической энергии при изменении расстояния между микрополосковыми структурами в определенных пределах / И. Б. Широков и др. Патент № 2740957. Россия. МПК H02J 50/00, H02J 50/20. Оpubл. 22.01.2021, бюл. № 3.

Информация об авторах

Широков Игорь Борисович, профессор Севастопольского государственного университета, г. Севастополь, Российская Федерация. ORCID 0000-0001-6425-5385.

Сердюк Игорь Владимирович, доцент Севастопольского государственного университета, г. Севастополь, Российская Федерация.

Азаров Андрей Андреевич, аспирант Севастопольского государственного университета, г. Севастополь, Российская Федерация.

Широкова Елена Игоревна, студентка Севастопольского государственного университета, г. Севастополь, Российская Федерация.

Study of System of Wireless Power Transfer

I. B. Shirokov¹, I. V. Serdyuk², A. A. Azarov³, and E. I. Shirokova⁴

Sevastopol State University
33, Universitrskaya Str., Sevastopol, 299053, Russian Federation

¹ shirokov@ieee.org

² serduk@ieee.org

³ azarov@ieee.org

⁴ shirokova@ieee.org

Received: May 22, 2022

Peer-reviewed: June 5, 2022

Accepted: June 5, 2022

Abstract: *New approach to wireless power transfer for electrical vehicles battery charging is discussed in a paper. The system of power transfer consists of generating unit with VSWR meter, two electromagnetic structures, and rectifying unit. Electromagnetic structure which is represented as microstrip device does not emit electromagnetic energy at its stand alone position. When electromagnetic structures approach each other ones are transformed into alone directional coupler; and effective power transfer takes place. System simulation in AWR design environment was carried out at different mutual arrangements of microstrip units. It was shown the power loss did not exceed 1 dB in a wide range between system parts and its mutual arrangements. Experimental model of system for power transfer was made and experimental study was carried out. Experimental and simulation results are well agreed. The reasonable system size and weight are well situated for its use for battery charging of electrical vehicle.*

Keywords: *wireless power transmission, directional couplers, coupling circuits, electromagnetic coupling, voltage-controlled oscillators.*

For citation (IEEE): I. B. Shirokov, I. V. Serdyuk, A. A. Azarov, and E. I. Shirokova, "Study of System of Wireless Power Transfer," *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 5, no. 4, pp. 445–457, 2022, doi: 10.29039/2587-9936.2022.05.4.33. (In Russ.).

References

- [1] G. Comodi, F. Caresana, D. Salvi, L. Pelagalli, and M. Lorenzetti, "Local promotion of electric mobility in cities: Guidelines and real application case in Italy," *Energy*, vol. 95, pp. 494–503, Jan. 2016, doi: 10.1016/j.energy.2015.12.038.
- [2] Goodbye wires! MIT team experimentally demonstrates wireless power transfer, potentially useful for powering laptops, cell phones without cords.
URL: <http://news.mit.edu/2007/wireless-0607>.
- [3] "Efficient wireless non-radiative mid-range energy transfer," *Annals of Physics*, vol. 323, no. 1, pp. 34–48, Jan. 2008, doi: 10.1016/j.aop.2007.04.017.

- [4] A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J. D. Joannopoulos, P. Fisher, and M. Soljacic, "Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances," *Science*, vol. 317, no. 5834, pp. 83–86, Jul. 2007, doi: 10.1126/science.1143254.
- [5] D. H. Tran, V. B. Vu, and W. Choi, "Design of a High-Efficiency Wireless Power Transfer System With Intermediate Coils for the On-Board Chargers of Electric Vehicles," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 33, no. 1, pp. 175–187, Jan. 2018, doi: 10.1109/tpe.2017.2662067.
- [6] *IEEE Std C95.1–2005 IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency, Electromagnetic Fields, 3 kHz to 300 GHz*. Piscataway: IEEE, 2006.
- [7] *Guidelines for Automotive Aftermarket Qi / Chargers* The Wireless Power Consortium. 2012.
- [8] *Global Qi Standard Powers Up Wireless Charging*, URL: <https://www.prnewswire.com/news-releases/global-qi-standard-powers-up-wireless-charging-102043348.html>.
- [9] I. B. Shirokov, "The method of wireless high-frequency transmission of electrical energy," Russian patent no. 2704602, IPC H02J 50/00, H02J 50/90, H01Q 7/08, publ. 30.10.2019, bul. no. 31. (In Russ.).
- [10] E. I. Shirokova, A. A. Azarov, and I. B. Shirokov, "The Study of Operation of the System of Wireless Energy Transfer at Real Conditions," *2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*, St. Petersburg and Moscow, Russia, 2020, pp. 1306–1310.
- [11] I. B. Shirokov, A. A. Azarov, E. I. Shirokova, and I. V. Serdyuk, "Increasing the Efficiency of Wireless Power Transfer System," *2020 7th All-Russian Microwave Conference (RMC)*, Moscow, Russia, 2020, pp. 147–150.
- [12] I. B. Shirokov, A. A. Azarov, I. V. Serdyuk, and E. I. Shirokova, "A method for ensuring the maximum transfer coefficient of high-frequency transmission of electrical energy when changing the distance between microstrip structures within certain limits," Patent no. 2740957, Russia, IPC H02J 50/00, H02J 50/20. Pub, 22.01.2021, bul. no. 3. (In Russ.).

Information about the authors

Igor B. Shirokov, professor at Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation. ORCID 0000-0001-6425-5385.

Igor V. Serduk, associate professor at Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation.

Andrey A. Azarov, graduate student at Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation.

Elena I. Shirokova, student at Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation.