

- siuiut' v agresivnikh seredovishchakh, i pristirii dlia iogo realizatsii* [A method for detecting and recognizing insulation defects of electric motors operating in aggressive environments, and a device for its implementation]. Patent UA, no.101849, 2013. (Ukr.)
8. Krivonosov V.E. *Sposib kontroliu zmini oporu izoliatsii elektrodiviguna i zhivil'nogo kabeliu* [A method for controlling the change in insulation resistance of an electric motor and a power cable]. Patent UA, no.98353, 2012. (Ukr.)
 9. Nikolaev A.A., Anufriev A.V., Kornilov G.P., Ivekeev V.S., Lozhkin I.A. *Povyshenie effektivnosti raboty sverkhmoshchnoi dugovoi staleplavil'noi pechi za schet ispol'zovaniia sistemy diagnostiki stadii plavki po vysshim garmonikam tokov dug. Sbornik statei 27 Mizhn. nauk.-prakt. konf. «Tekhnicheskie nauki – ot teorii k praktike»* [Increase of efficiency of work of super-power arc steel-making furnace due to use of system of diagnostics of stages of melting on the higher harmonics of currents of arcs. The collection of articles of 27th Int. Sci.-Pract. Conf. «Engineering – from theory to practice»]. Novosibirsk, 2013, pp. 115-131. (Rus.)

Рецензент: А.Ю. Азархов
д-р мед. наук, проф., ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 15.10.2017

УДК 621.341.572

© Бурлака В.В.¹, Гулаков С.В.², Поднебенная С.К.³, Скосырев В.Г.⁴

АНАЛИЗ ПОДХОДОВ К РЕАЛИЗАЦИИ СИСТЕМ БЕСПРОВОДНОЙ ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НИЗКОЧАСТОТНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

Целью работы является анализ процессов в системе беспроводной передачи энергии с использованием низкочастотных магнитных полей, выполненной с применением резонансного воздушного трансформатора, и разработка подходов к повышению эффективности работы таких систем. Выполнена оценка режима работы по основной гармонике системы беспроводной передачи энергии с настроенной в резонанс передающей катушкой. Показано, что необходимым условием максимальной мощности в приемнике является не только настройка в резонанс приемной катушки, но и нагружение приемного контура на строго определенное активное нагрузочное сопротивление, зависящее от коэффициента связи между передающей и приемной катушками. Выполнена оценка максимальной передаваемой мощности, определены требования к выпрямителю приемника, при выполнении которых возможна работа с максимальной мощностью в нагрузке. Предложено применить в приемнике активный выпрямитель с соответствующей специализированной системой управления, обеспечивающей работу с алгоритмом поиска точки максимальной мощности MPPT (Maximum Power Point Tracking) и точную подстройку приемного контура в резонанс в реальном времени за счет управления фазовым сдвигом между напряжением и током. Использование предлагаемого подхода в системах беспроводной зарядки аккумуляторов позволит повысить эффективность их работы и уменьшить время заряда.

Ключевые слова: беспроводная передача энергии, беспроводная зарядка, воздушный трансформатор, резонансный трансформатор.

¹ канд. техн. наук, доцент, вед. науч. сотр., ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, VladimirV.Burlaka@gmail.com

² д-р техн. наук, профессор, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, gulakov_s_v@pstu.edu

³ канд. техн. наук, доцент, докторант, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, podsvet@gmail.com

⁴ канд. техн. наук, доцент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

Бурлака В.В., Гулаков С.В., Поднебенна С.К., Скоцирев В.Г. Аналіз підходів до реалізації систем бездротової передачі енергії з використанням низькочастотних магнітних полів. Метою роботи є аналіз процесів в системі бездротової передачі енергії з використанням низькочастотних магнітних полів, виконаної з застосуванням резонансного повітряного трансформатора, і розробка підходів до підвищення ефективності роботи таких систем. Виконано оцінку режиму роботи по основній гармоніці системи бездротової передачі енергії з налаштованою в резонанс передавальною котушкою. Показано, що необхідною умовою максимальної потужності в приймачі є не тільки налаштування в резонанс приймальної котушки, а й навантаження приймального контуру на строго певний активний навантажувальний опір, залежний від коефіцієнта зв'язку між передавальною і приймальною котушками. Виконано оцінку максимальної потужності, що передається, визначені вимоги до випрямляча приймача, при виконанні яких можлива робота з максимальною потужністю в навантаженні. Запропоновано застосувати в приймачі активний випрямляч з відповідною спеціалізованою системою управління, що забезпечує роботу з алгоритмом пошуку точки максимальної потужності MPPT (Maximum Power Point Tracking) і точне підстроювання приймального контуру в резонанс в реальному часі за рахунок контролювання фазового зсуву між напругою і струмом. Використання запропонованого підходу в системах бездротової зарядки акумуляторів дозволить підвищити ефективність їх роботи і зменшити час заряду.

Ключові слова: бездротова передача енергії, бездротова зарядка, повітряний трансформатор, резонансний трансформатор.

V.V. Burlaka, S.V. Gulakov, S.K. Podnebennaya, V.G. Skosyrev. Analysis of the implementation approaches to the wireless energy transfer systems using low-frequency magnetic field. The aim of the work is to analyze the processes in the wireless energy transfer system using low-frequency magnetic fields, implemented with the use of a resonant air transformer and finding approaches to improving the efficiency of such systems. The steady state of the wireless transmission system with a resonant tuned transmitter coil has been evaluated using first harmonic analysis (FHA) method. It has been shown that the necessary condition for maximum power in the receiver is not only tuning the receiving coil into resonance, but also loading the receiving tank with a strictly defined active load resistance, that depends on the transmitting -to- receiving coils coupling coefficient. The estimation of the maximum transmitted power has been done, the requirements to the rectifier of the receiver that will make it possible to work with the maximum power in the load have been determined. It is proposed to use an active rectifier in the receiver with an appropriate specialized control system, which works with the maximum power point tracking (MPPT) algorithm and allows fine tuning of the receiving tank in real-time by controlling the phase shift between voltage and current. The proposed approach in wireless charging systems will increase the efficiency of their operation and reduce the battery charging time.

Keywords: wireless energy transfer, wireless charging, air transformer, resonant transformer.

Постановка проблеми. Использование беспроводных технологий в быту и промышленности позволяет обеспечить новые возможности, улучшить технико-экономические характеристики оборудования, упростить его монтаж и эксплуатацию. Широкое распространение получила передача информации по радиоканалу, начиная от портативных радиостанций и пультов дистанционного управления и заканчивая системами дальней космической связи.

В настоящее время появились коммерческие системы, в которых используется не только обмен данными, но и передача энергии посредством электромагнитного поля. Это системы радиочастотной идентификации RFID [1], беспроводные зарядные устройства для телефонов (стандарт Qi) [2, 3] и имплантированных устройств [4], индукционные печи и т.п. Ведутся работы по разработке беспроводных систем заряда аккумуляторных батарей электромобилей [5, 6].

Анализ последних исследований и публикаций. Для беспроводной передачи энергии используются несколько диапазонов частот: низкие (НЧ, до 200 кГц) [1-6], высокие (4-20 МГц)

[7, 8], сверхвысокие (2,45 ГГц) [9]. Низкочастотные системы (например, зарядные устройства QI, системы RFID 125 кГц) получили наибольшее применение в задачах передачи значительных мощностей. Высокочастотные и сверхвысокочастотные системы (например, HF RFID 13,56 МГц [6], SHF RFID 2,4 ГГц) имеют преимущество в повышенной дальности действия, однако передача больших мощностей здесь сопряжена со сложностью эффективного преобразования энергии радио- или микроволн в электрическую.

Поэтому для решения задач беспроводной передачи значительной мощности в подавляющем большинстве случаев рассматриваются системы с применением НЧ магнитных полей. Следует отметить, что НЧ электрические поля не применяются из соображений безопасности – создание мощных электрических полей требует высоких напряжений – единицы-десятки кВ [10, 11].

Целью работы является анализ процессов, происходящих в системах беспроводной передачи энергии с применением низкочастотных магнитных полей, оценка и определение путей повышения эффективности таких систем.

Изложение основного материала. Указанные системы имеют в своей основе резонансный воздушный трансформатор (рис. 1). Передатчик (источник ЭДС E) работает на резонансной частоте контура, образованного передающей катушкой L_1 и конденсатором C_1 . Элемент R_1 – общее активное сопротивление передающей катушки и выходного каскада передатчика. Приемник представлен приемной катушкой L_2 с активным сопротивлением обмотки R_2 , резонансным конденсатором C_2 и эквивалентным сопротивлением нагрузки R_H .

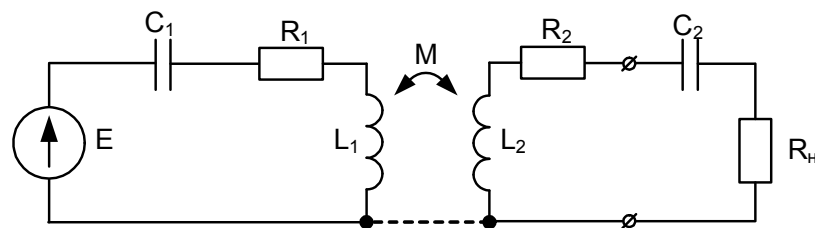


Рис. 1 – Система беспроводной передачи энергии с воздушным трансформатором

Передатчик обычно представляет собой мостовой или полумостовой инвертор с прямоугольным выходным напряжением. Но поскольку добротность контуров системы велика (десятки-сотни), для расчета режима достаточно точные результаты дает анализ только по основной гармонике (ФНА – First Harmonic Analysis). Этот метод широко используется для расчета резонансных преобразователей. Аналогично и в случае приемника: на практике нагрузкой является не резистор R_H , а выпрямитель. Но благодаря высокой добротности приемного контура L_2C_2 ток в нем практически синусоидальный с низким содержанием гармоник.

Отличительной особенностью систем с воздушными трансформаторами является низкий коэффициент связи между обмотками, порядка $0,001 \dots 0,1$.

Выясним, при каких условиях в нагрузке будет выделяться максимальная мощность, и чем она определяется. Для этого соединим общие шины передатчика и приемника (перемычка показана пунктирной линией на рис. 1; это не изменит их режима работы, т.к. ток через перемычку будет отсутствовать) и воспользуемся известным способом «развязки» магнитно-связанных цепей [12]. Затем получившуюся схему (рис. 2) заменим эквивалентным генератором. Результат приведен на рис. 3. Здесь учтена настройка передатчика в резонанс, т. е. $x_{C1} = x_L$.

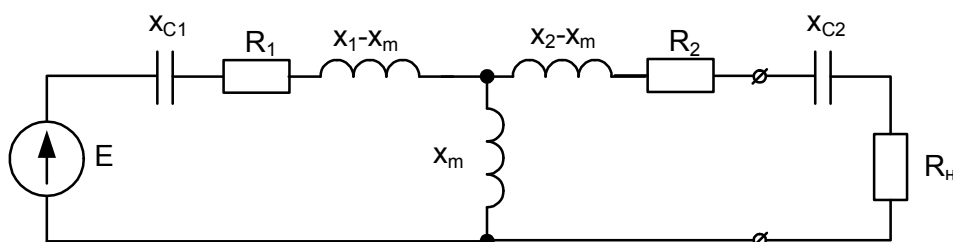


Рис. 2 – Схема замещения с развязанной магнитной связью

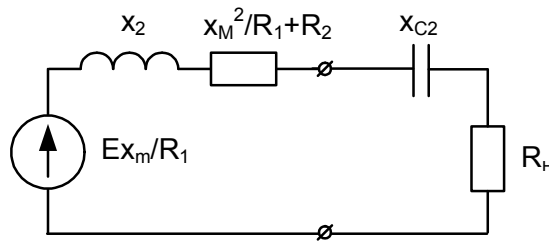


Рис. 3 – Схема замещения с эквивалентным генератором

Как и следовало ожидать, эквивалентная ЭДС, равная $E \frac{x_m}{R_1}$, уменьшается с уменьшением коэффициента связи (т.е. x_m). Но обращает на себя внимание то, что при этом активная компонента выходного сопротивления эквивалентного генератора тоже уменьшается (слагаемое $\frac{x_m^2}{R_1}$), т.е. выходная характеристика становится жестче.

Мощность, выделяющаяся в нагрузке, будет определяться как

$$P_n = \frac{E^2 \frac{x_m^2}{R_1^2} R_n}{(x_2 - x_{C2})^2 + \left(\frac{x_m^2}{R_1} + R_2 + R_n \right)^2}.$$

Исследовав это выражение на экстремумы, получаем условия максимальной мощности в нагрузке: $x_{C2} = x_2$ и $R_n = \frac{x_m^2}{R_1} + R_2$. Сама мощность в нагрузке при этом: $P_{nmax} = \frac{E^2 \frac{x_m^2}{R_1^2}}{4 \left(\frac{x_m^2}{R_1} + R_2 \right)}$.

Если положить в последнем выражении $R_2 = 0$, то $P_{nmax} = \frac{E^2}{4R_1}$ и не зависит от x_m (!), но, к сожалению, сверхпроводящие материалы при изготовлении катушек широкого распространения пока не получили.

Проведенные несложные расчеты показывают, что для обеспечения отбора максимальной мощности необходимо не только настроить приемный контур в резонанс, что является очевидным, но и выбрать сопротивление нагрузки в соответствии с условием, приведенным выше. При этом, чем больше удаление приемника от передатчика (т.е. чем меньше коэффициент связи), тем меньше должно быть сопротивление нагрузки приемника. На рис. 4 приведена типовая зависимость выходной мощности приемника беспроводной системы передачи энергии от коэффициента связи при разных сопротивлениях нагрузки. Видно, что работа с оптимальным сопротивлением нагрузки приемного контура позволяет развивать большую мощность, чем в случае фиксированного нагрузочного сопротивления. Если беспроводная передача энергии используется для заряда аккумуляторов, это позволит существенно сократить время зарядки и повысить эффективность передачи энергии.

Исходя из вышесказанного, для практической реализации приемника с изменяемым сопротивлением нагрузки контура целесообразно использовать либо переключаемый выпрямитель (например, мостовой-удвоитель-умножитель) с последующим DC/DC преобразователем, либо активный выпрямитель с соответствующей специализированной системой управления. В последнем случае возможно обеспечение точной подстройки в резонанс приемного контура в реальном времени за счет управления сдвигом фазы входного тока активного выпрямителя. Это даст возможность снизить влияние изменения параметров элементов и влияние наличия ферромагнетиков в рабочем поле на качество работы системы.

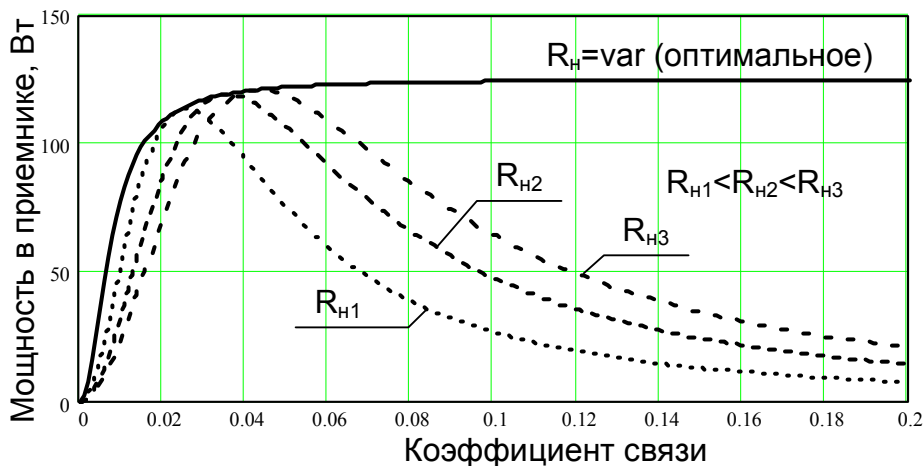


Рис. 4 – Зависимость выходной мощности от коэффициента связи при разных сопротивлениях нагрузки

Регулирование нагрузочного сопротивления контура следует осуществлять либо по сигналам обратной связи по выходным параметрам (напряжению или току), либо с применением алгоритма поиска точки максимальной мощности MPPT (Maximum Power Point Tracking), широко используемого в системах управления инверторов сопряжения солнечных панелей с распределительной сетью.

Работа такой системы в «ближнем» поле с большим коэффициентом связи характеризуется небольшим током в приемной катушке при значительной наведенной ЭДС. По мере удаления от передатчика ток в приемной катушке будет возрастать (при неизменной мощности в нагрузке) до режима, когда заданную мощность поддерживать станет невозможным. При дальнейшем удалении ток в приемной катушке будет падать вместе с отбираемой мощностью.

Выводы

При разработке систем беспроводной передачи энергии с использованием низкочастотного магнитного поля на основе резонансных воздушных трансформаторов целесообразно применять активные выпрямители со специальной системой управления, обеспечивающей динамическое изменение эквивалентного нагрузочного сопротивления приемного контура и точную подстройку его в резонанс в режиме реального времени.

Дальнейшим направлением исследований является разработка методов идентификации в реальном времени режимов с максимальным КПД передачи, оценка чувствительности систем к изменениям параметров входящих в них элементов, оценка эффективности и целесообразности использования резонансных повторителей при решении задач беспроводной передачи энергии.

Список использованных источников:

1. microID ® 125 kHz RFID System Design Guide [Electronic resource]. – Document No. DS51115F. – Microchip Technology Inc., 2004. – 210 p. – Mode of access: ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/51115f.pdf.
2. Qi Wireless Charging [Electronic resource] : [Web site]. – Electronic data. – Mode of access: www.qiwireless.com. – Screen title.
3. Wireless Power Consortium [Electronic resource] : [Web site]. – Piscataway, USA. – Electronic data. – Mode of access: www.wirelesspowerconsortium.com. – Screen title.
4. Nambiar S.C. A simple wireless power transfer scheme for implanted devices / S.C. Nambiar, M. Manteghi // Radio Science Meeting (USNC-URSI NRS) / United States National Committee of URSI National. – 2014. – Pp. 1.
5. Overview of Wireless Power Transfer for Electric Vehicle Charging / Chun Qiu, K.T. Chau, Chunhua Liu, C.C. Chan // Proceedings of EVS27 International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium (17-20 November 2013). – Barcelona, Spain, 2013. – Pp. 1-9.
6. Villa J.L. Inductive battery charging system for electric vehicles / J.L. Villa, J. Sanz, J. Sallan //

- Proceedings of EVS27 International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium (17-20 November 2013). – Barcelona, Spain, 2013. – Pp. 1-4.
7. microID ® 13.56 MHz RFID System Design Guide. Document No. DS21299E [Electronic resource]. – Microchip Technology Inc., 2004. – 214 p. – Mode of access: ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/21299E.pdf.
 8. Maximizing DC-to-Load Efficiency for Inductive Power Transfer / M. Pinuela, D.C. Yates, S. Lucyszyn, P.D. Mitcheson // *IEEE Transactions on Power Electronics*. – 2013. – Vol. 28. – Pp. 2437-2447.
 9. Chankapoe S. Wireless power transmission using horn antenna with 2.45 GHz magnetron / S. Chankapoe // *Proceedings of 2016 Second Asian Conference on Defence Technology (ACDT) (21-23 January 2016)*. – Chang Mai, Thailand. – Pp. 17-20.
 10. Dai J. Capacitive power transfer through a conformal bumper for electric vehicle charging / J. Dai, D. Ludois // *Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*. – 2016. – Vol. 4. – Pp. 1015-1025.
 11. Dai J. Single active switch power electronics for kilowatt scale capacitive power transfer / J. Dai, D. Ludois // *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*. – 2015. – Vol. 3. – Pp. 315-323.
 12. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле : учебник / Л.А. Бессонов – 9-е изд., перераб. и доп. – М. : Гардарики, 2001. – 317 с.

References:

1. 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 (accessed 15 April 2017).
2. Qi Wireless Charging Available at: www.qiwireless.com (accessed 23 May 2017).
3. Wireless Power Consortium Available at: www.wirelesspowerconsortium.com (accessed 24 May 2017).
4. 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, pp. 1.
5. 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.
6. 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.
7. microID ® 13.56 MHz RFID System Design Guide. Document No. DS21299E. Microchip Technology Inc., 2004. 214 p. Available at: ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/21299E.pdf (accessed 15 April 2017).
8. 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.
9. Chankapoe S. Wireless power transmission using horn antenna with 2.45 GHz magnetron. *Proceedings of 2016 Second Asian Conference on Defence Technology (ACDT) (21-23 January 2016)*. Chang Mai, pp. 17-20.
10. Dai J., Ludois D. Capacitive power transfer through a conformal bumper for electric vehicle charging. *Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2016, vol. 4, pp. 1015-1025.
11. Dai J., Ludois D. Single active switch power electronics for kilowatt scale capacitive power transfer. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2015, vol. 3, pp. 315-323.
12. Бессонов Л.А. *Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле: учебник* [Theoretical bases of electrical engineering. Electromagnetic Field: A Textbook]. Moscow, Gardariki Publ., 2001. 317 p. (Rus.)

Рецензент: В.Л. Малинов
д-р техн. наук, ПИИ ООО «Бюро Веритас Украина»

Статья поступила 19.06.2017