

УДК 629.1

Моделирование работы устройства индукционного зарядного для мобильной установки заряда электротранспорта

А. Р. Сафин, А. Н. Цветков, Д. Ю. Лямзина, Т. И. Петров*, В. Р. Басенко

*Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия;

e-mail: tobac15@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8733-8914>

Информация о статье Реферат

Поступила
в редакцию
08.09.2023;

получена
после доработки
02.11.2023;

принята
к публикации
09.11.2023

Ключевые слова:

беспроводная передача
энергии,
устройство
индукционное зарядное,
моделирование,
катушки,
магнитное поле

Скорость внедрения электротранспорта зависит от уровня развития зарядной инфраструктуры, к которой предъявляются все новые требования, в том числе по повышению удобства эксплуатации и снижению времени заряда. Решением проблемы может стать внедрение беспроводной зарядки электромобилей (устройство индукционное зарядное – УИЗ). Однако для изготовления эффективного УИЗ (без предварительного расчета и моделирования КПД устройства может не достигать 10 %) необходимо выбрать параметры катушек и провести моделирование частотных характеристик напряжения. Для этого в рамках реализации проекта по созданию мобильной установки заряда электротранспорта была решена задача по моделированию работы УИЗ. В соответствии с техническим заданием построена катушка в Excel, которую в качестве геометрии использовали в Comsol для оценки распределения магнитных полей. Для изучения частотных характеристик использовалась программа CST Studio. При помощи данных программ проведено моделирование разных методов реализации УИЗ с получением частотных характеристик. Подтверждено, что коэффициент связи растет с уменьшением расстояния между частями УИЗ. Проведены расчеты резонансных контуров, ожидаемого КПД для обоих типов резонансных контуров, сделан вывод, что уменьшение расстояния приводит к уменьшению резонансной частоты системы связанных контуров. Разработанная модель позволяет получить значения емкостей контура для образования резонанса, переходить к практической реализации и проводить верификацию полученных моделей.

Для цитирования

Сафин А. Р. и др. Моделирование работы устройства индукционного зарядного для мобильной установки заряда электротранспорта. Вестник МГТУ. 2023. Т. 26, № 4. С. 410–421. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2023-26-4-410-421>.

Modeling the operation of an induction charger for mobile charging of electric vehicles

Alfred R. Safin, Alexey N. Tsvetkov, Daria Yu. Lyamzina,
Timur I. Petrov*, Vasily R. Basenko

*Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia;

e-mail: tobac15@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8733-8914>

Article info

Received
08.09.2023;

received
in revised form
02.11.2023;

accepted
09.11.2023

Key words:

wireless power
transmission,
induction charger,
simulation,
coils,
magnetic field

Abstract

The speed of implementation of electric vehicles depends on the level of development of the charging infrastructure, which is subject to ever new requirements, including increasing ease of use and reducing charging time. A solution to the problem could be an introduction of wireless charging of electric vehicles (inductive charging device – WPT). However, in order to produce an effective WPT (without preliminary calculation and modeling the efficiency of the device may not reach 10 %), it is necessary to select the parameters of the coils and simulate the frequency characteristics of the voltage. For this purpose, as part of the implementation of the project to create a mobile charging installation for electric vehicles, the problem of modeling the operation of the WPT has been solved. In accordance with the technical specifications, a coil has been built in Excel, which was used as geometry in Comsol to evaluate the distribution of magnetic fields. To study the frequency characteristics, the CST Studio program has been used. Using these programs, we simulated various methods for implementing the WPT with obtaining frequency characteristics. It has been confirmed that the coupling coefficient increases with decreasing distance between parts of the WPT. Calculations of resonant circuits and the expected efficiency for both types of resonant circuits have been carried out, and it has been concluded that decreasing the distance leads to a decrease in the resonant frequency of the system of connected circuits. The developed model allows us to obtain the values of the circuit capacitances for the formation of resonance, move on to practical implementation and verify the resulting models.

For citation

Safin, A. R. et al. 2023. Modeling the operation of an induction charger for mobile charging of electric vehicles. *Vestnik of MSTU*, 26(4), pp. 410–421. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2023-26-4-410-421>.

Введение

Магнитно-резонансная беспроводная технология привлекает значительное внимание на рынке зарядки электромобилей. С развитием технологии беспроводной передачи энергии стало возможным заряжать электромобили без физического подключения, беспроводная зарядка для электромобилей имеет множество преимуществ, особенно с точки зрения удобства и безопасности. Удобство заключается в простоте эксплуатации, а безопасность обеспечивается исключением ситуаций, опасных для водителей, особенно в неблагоприятных погодных условиях, таких как снег или дождь, которые могут привести к поражению электрическим током. Ожидается, что со временем беспроводные зарядные станции станут преобладающим способом зарядки (Сафин и др., 2021; Tabachnikova et al., 2020).

Сотрудниками Казанского государственного энергетического университета и производственного объединения "Зарница" разрабатывается мобильная установка заряда электротранспорта, отличительной особенностью которой является наличие системы беспроводной зарядки – устройства индукционного зарядного (УИЗ).

Такая система состоит из двух катушек, соединенных беспроводным способом и подключенных к основным элементам (Bouanou et al., 2021). Реактивные компоненты, добавленные в систему УИЗ, могут быть использованы на передающей и принимающей стороне в разных последовательностях для получения разных характеристик всей системы. Таким образом, в системе УИЗ основными элементами, которые следует учитывать при проектировании, являются общая схема установки, конструкция катушек, топология и параметры схем с использованием LC элементов (Alsayegh et al., 2019).

Важным направлением исследований в этой области является проектирование топологий катушек с целью увеличения коэффициента связи и уменьшения изменения этого коэффициента из-за горизонтальных перекосов и вертикальных смещений (Zhu et al., 2013). Учитывая это, предусмотрены различные структуры связи как для статических, так и для динамических режимов. Общие конструкции, используемые при статической зарядке электромобилей, включают круглую, квадратную площадку, площадку DD и т. д. (Ahmad et al., 2018). Наиболее распространенными конструкциями, используемыми при динамической зарядке электромобилей, являются Тип S, Тип I, Тип W и Тип U, каждый из которых имеет свои преимущества и недостатки (Kerid et al., 2019).

В научной литературе широко обсуждается моделирование УИЗ (Nemirovskiy et al., 2021; Lassioui et al., 2020), но определение оптимальных параметров площадки для эффективной передачи энергии остается серьезной проблемой. В работе представлен подход к проектированию последовательно-последовательной (SS топология) системы УИЗ для передачи мощности 10 кВт на частоте 85 кГц, которая может применяться к различным уровням мощности (Panchal et al., 2018).

Материалы и методы

Условия численного эксперимента и описание модели

Современным решением проблем развития транспортной и электросетевой инфраструктуры может служить создание мобильных установок заряда электротранспорта (МУЗЭ), которые будут включать в себя блок УИЗ (рис. 1). Важным этапом для обеспечения эффективной передачи энергии является предварительное моделирование работы катушки в зависимости от параметров LC элементов в системе согласования. В работе моделируется передающая катушка, так как она является элементом МУЗЭ, в качестве принимающей рассчитывается полностью аналогичная катушка для удобства моделирования (у электромобилей имеются разные варианты исполнения катушек, но выбрана конфигурация, принятая в международном стандарте SAE J2954) (Bouanou et al., 2023).

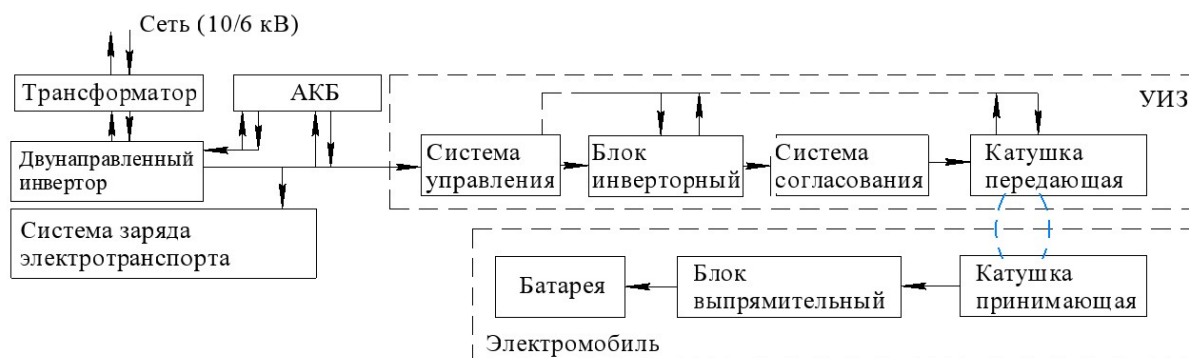


Рис. 1. Общая схема мобильной установки зарядки электротранспорта с выделением блока УИЗ и связью с электромобилем

Fig. 1. General diagram of a mobile charging installation for electric vehicles highlighting the WPT unit and communicating with the electric vehicle

Типичные формы катушек УИЗ представляют собой круглую, квадратную, прямоугольную и двойную D (DD) конфигурацию (Ahmad et al., 2018). DD – одна из самых популярных современных катушек, ее геометрия представляет собой две прямоугольные катушки поверх материала сердечника, направляющие магнитный поток. Катушка DD имеет меньшее магнитное поле рассеяния, чем прямоугольная площадка и более высокий коэффициент связи. Магнитная связь значительно выше у многокатушечной формы по сравнению с круглой и прямоугольной. Однако сопротивление катушки также увеличивается, поскольку используется больше проводов, но эффективность относительно высока, и площадка DD считается наиболее подходящей для первичной катушки в системе УИЗ (Thein et al., 2021). Конфигурация катушки представлена на рис. 2.

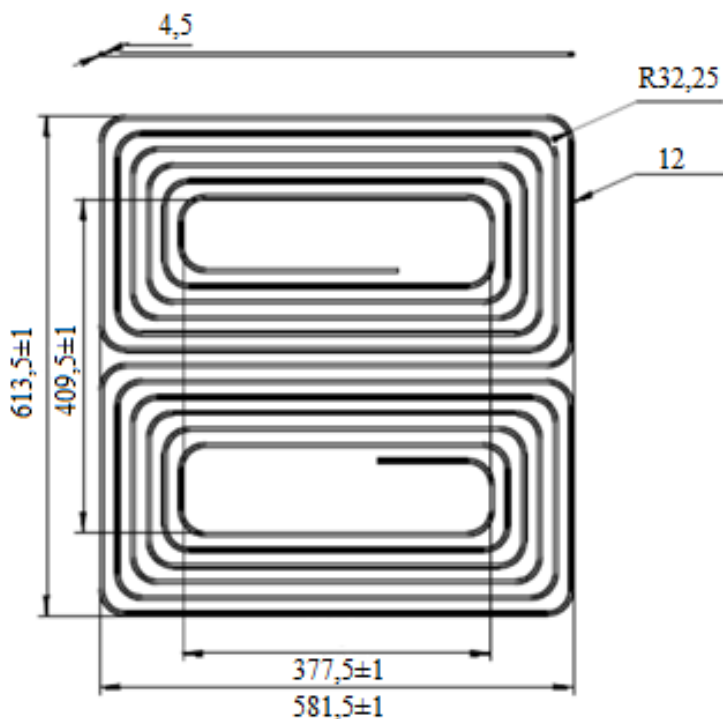


Рис. 2. Конфигурация передающей катушки
Fig. 2. Transmit coil configuration

Моделирование проводилось в программных комплексах COMSOL Multiphysics и CST Studio Suite 2021. Была построена компьютерная модель заданной системы и проанализированы частотные характеристики. Для теоретического расчета генерации магнитного поля использовали программный пакет COMSOL Multiphysics (Kuzey et al., 2017; Bentalhik et al., 2022). Расчет токов и генерация магнитного поля производится путем решения уравнений в частных производных, разбиением области на конечные объемы и нахождением приближенного решения методами итерационного подхода (метод Ньютона). Уравнения составляются исходя из выбора механизмов, моделей и физических явлений. В данной модели была использована мультифизическая связка физики электромагнитных полей и модуля электрических цепей (Lukic et al., 2013). Аналогичным образом производились расчеты частотных характеристик катушки и передающей системы из двух катушек в программном пакете CST Studio в частотной области с использованием связи из моделируемых катушек и идеальных элементов электрической цепи (Lumped elements).

Метод конечных элементов является мощным методом для численного решения сложных систем (Сафин и др., 2022; Kim et al., 2016).

Параметры УИЗ, приведенные в техническом задании (ТЗ): мощность – 10 кВт, КПД – не менее 70 %. Катушка (координаты вершин) построена в Excel (рис. 3) согласно заданным в техническом задании параметрам:

- изменяемые габариты внутреннего прямоугольника;
- расстояние между витками;
- размеры проводника.

Все вышеперечисленные параметры изменяемы, координаты вершин квадратной спирали рассчитываются автоматически.

Профиль проводника (рис. 4) реализуем в Comsol (в нашем расчете взят круглый профиль).

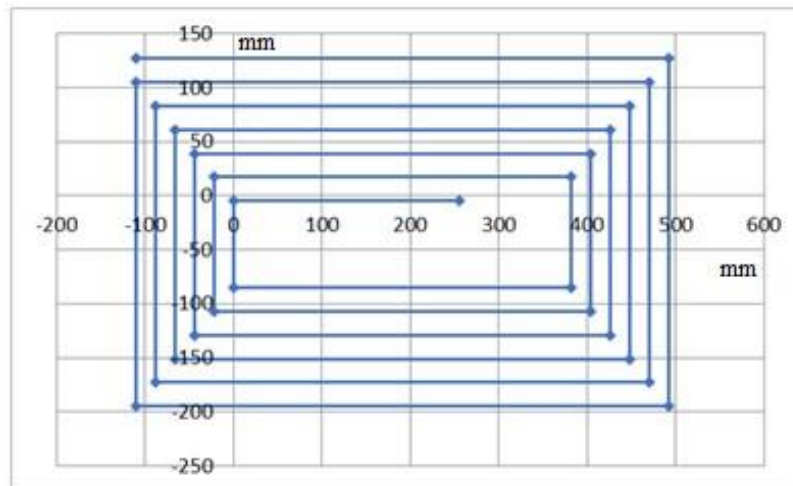


Рис. 3. Эскиз части DD катушки в EXCEL
Fig. 3. Sketch of the DD coil part in EXCEL

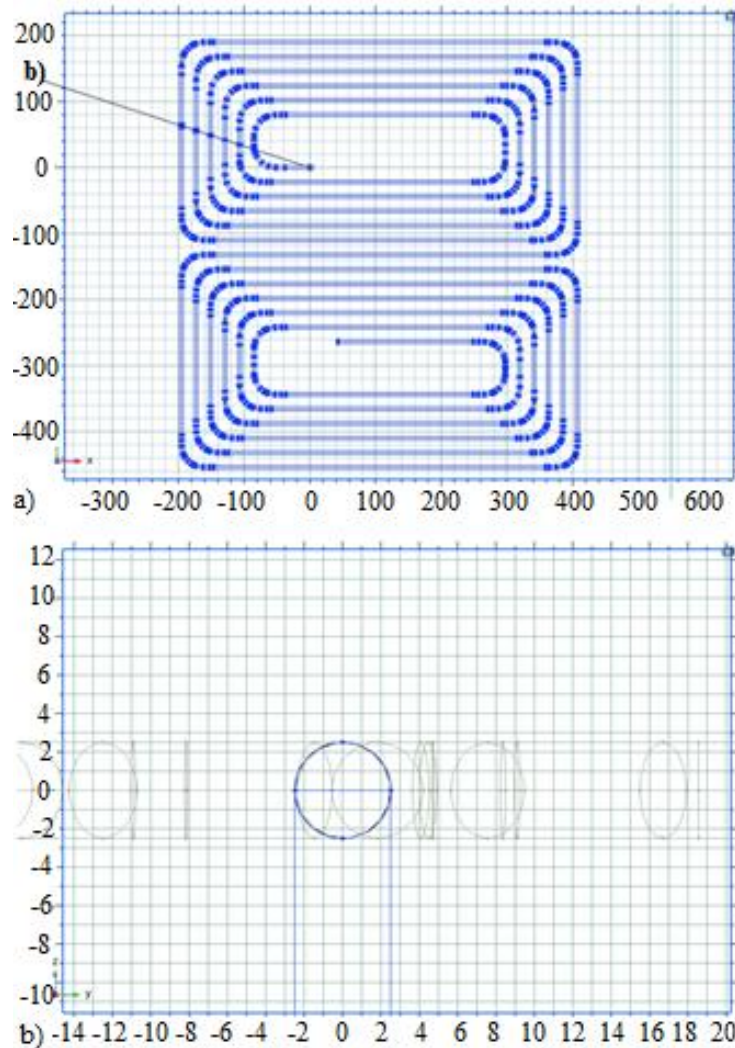


Рис. 4. *a* – профиль катушки в COMSOL, *b* – сечение провода в COMSOL
Fig. 4. *a* – COMSOL coil profile, *b* – COMSOL wire section

Назначены материалы и граничные условия для моделирования (*Jia et al., 2021; Lu et al., 2016*).

На данном этапе приложен постоянный ток значением 1А. Получено распределение магнитного поля в 3 плоскостях: XY, YZ, XZ (рис. 5). Катушка лежит параллельно плоскости XY.

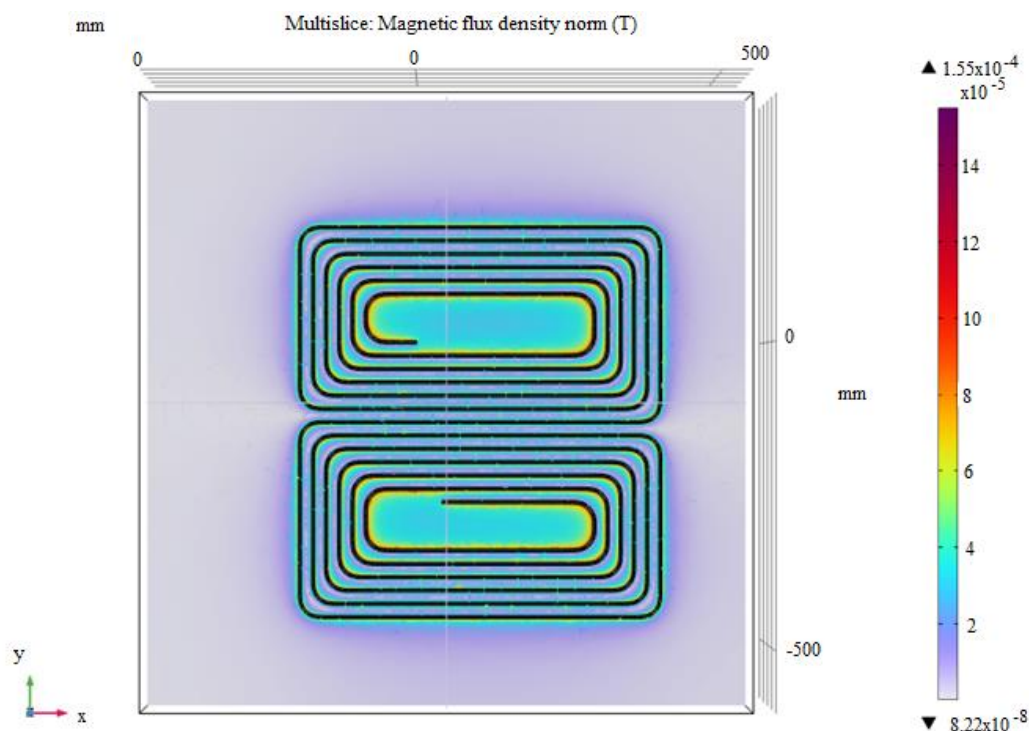


Рис. 5. Распределение магнитного поля в плоскости XZ
Fig. 5. Magnetic field distribution in the XZ plane

Далее для изучения частотных характеристик исследования проводились в программном пакете CST Studio. На основании ТЗ была создана математическая модель объекта, состоящая из стального листа (толщиной 3 мм), на ней находится ферритовая подложка (толщиной 7 мм), на которой лежит медная плоская катушка с двойной противоположно закрученной спиралью. Катушки идентичны по способу намотки, никаких поворотов друг относительно друга не производилось (Buja et al., 2015; Cui et al., 2018).

Примененные математические уравнения и схемы моделей расчета

Уравнения (1) и (2) показывают связь между частотой резонанса для контура с индуктивностью L и емкостью C_0 (собственная емкость катушки) или $C_{total, new}$ (общая емкость системы)

$$f_{res,0} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_0}}; \tag{1}$$

$$f_{res,new} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_{total,new}}}. \tag{2}$$

Для определения индуктивности катушки в цепь была последовательно добавлена емкость C . Для такой системы общая емкость определяется по формуле (3)

$$C_{total,new} = C_0 + C. \tag{3}$$

После подстановки уравнение (3) в (2) и объединяя (1) и (2) возможно определить собственную емкость C_0 (4) и индуктивность катушки L (5)

$$C_0 = C \frac{f_{res,new}^2 - f_{res,0}^2}{f_{res,0}^2}; \tag{4}$$

$$L = \frac{1}{C_0} \cdot \frac{1}{(2\pi f_{res,0})^2}. \tag{5}$$

Из уравнения (2): общая емкость системы C_{tot} может быть найдена по формуле (6) для достижения резонанса при частоте f_{res} и индукции L

$$C_{tot} = \frac{1}{L} \cdot \frac{1}{(2\pi f_{res})^2}. \tag{6}$$

Из уравнения (3): величина, на которую надо изменить общую емкость при последовательном соединении конденсатора в систему

$$C = \frac{C_{tot} \cdot C_0}{C_0 - C_{tot}}. \quad (7)$$

Для достижения резонанса на 85 кГц в цепь была добавлена емкость C_2 , общая емкость последовательной цепи будет определяться по формуле (8), откуда можно выразить C_2

$$C_{total, new} = C_0 + C + C_2. \quad (8)$$

Для упрощения расчетов толщина медного проводника была выбрана равной 35 мкм, ширина шины 3 мм.

Результаты моделирования

Моделирование проводилось в программных комплексах COMSOL Multiphysics и CST Studio Suite 2021. Была построена компьютерная модель заданной системы и проанализированы частотные характеристики.

В результате моделирования работы схемы рис. 6, а (схема модели для определения резонансной частоты катушки) и построения частотной характеристики катушки определена частота резонанса 3,64 МГц. Далее по схеме модели для определения собственной емкости и индуктивности катушки (рис. 6, б) для параллельного LC-контура с конденсатором 10 нФ найдена частота резонанса – 211 кГц.

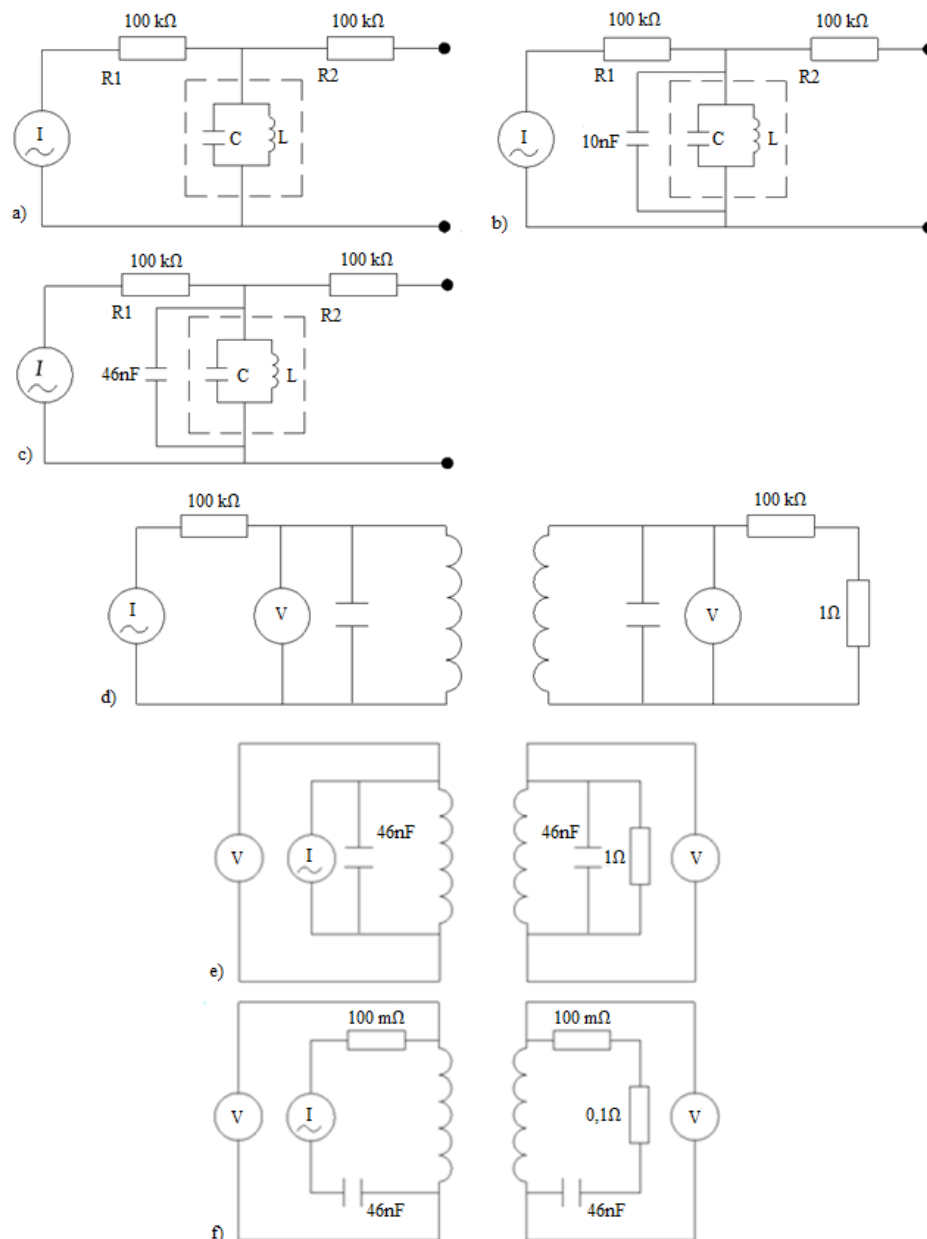


Рис. 6. Схемы моделей для определения параметров УИЗ
 Fig. 6. Schemes of models for determining the parameters of the WPT

Из полученных двух резонансных частот находим собственную емкость и индуктивность катушки, учитывая сложение емкостей (собственной и добавленной) для параллельных конденсаторов: собственная емкость – 35 пФ, собственная индуктивность – 55 мкГн.

Рассчитываем емкость конденсатора (схема – рис. 6, *c*) для достижения резонанса на 100 кГц, теоретически рассчитанная емкость равна 46 нФ.

Следующим шагом стало добавление идентичной схемы для принимающей части. Вместо генератора тока добавлена нагрузка с сопротивлением 1 Ом (рис. 6, *d*).

На рис. 7 представлена частотная характеристика системы двух катушек при различных расстояниях между катушками (10-30-50-70-90-110-130-150 мм).

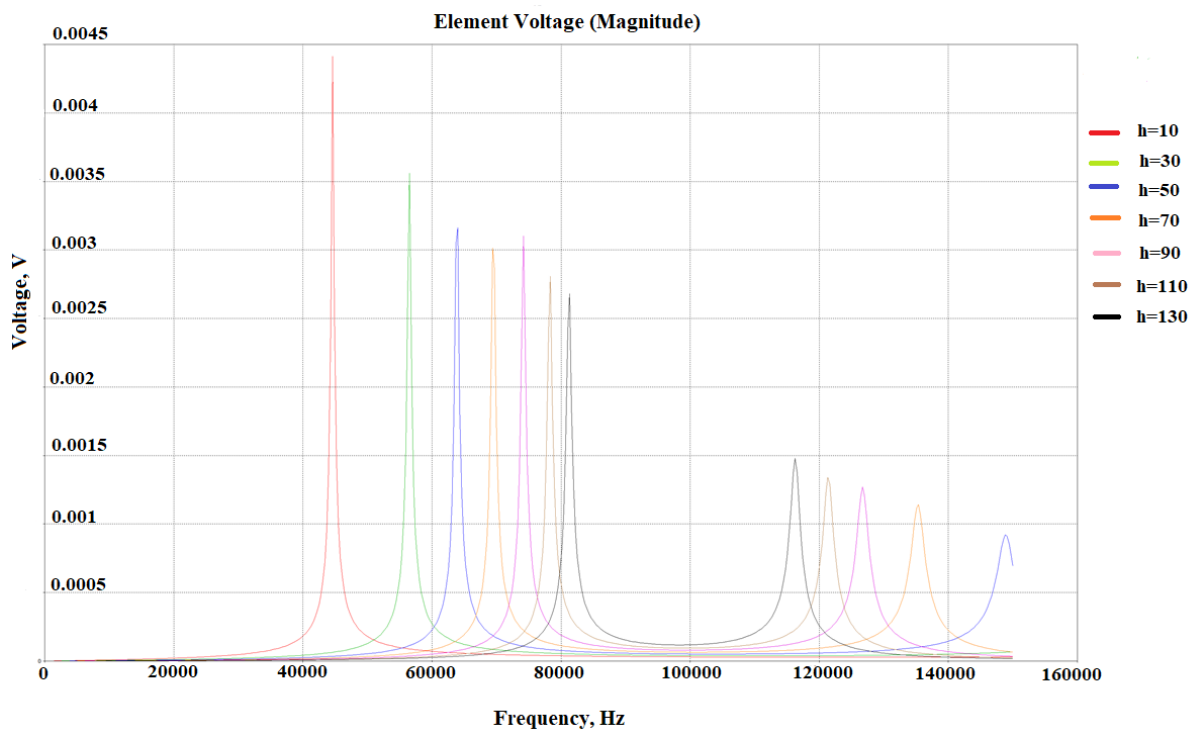


Рис. 7. Частотная характеристика системы двух катушек при различных расстояниях между катушками
Fig. 7. Frequency response of a two-coil system at different distances between the coils

Далее убираем резисторы, которые развязывали генератор тока, от резонансного контура (рис. 6, *e*) (Zhang et al., 2016). Таким образом, получена топология PP (параллельная-параллельная). Для ознакомления представлены только графики частотных характеристик напряжения (рис. 8), приложенного к нагрузке, в генераторе тока. В приемнике будут аналогичные по форме графики, которые отличаются только значениями. Для полученных значений рассчитано, что КПД передачи энергии в резонансе равно ~5 %.

Далее было решено перейти к последовательному контуру (топология SS). Данная топология (рис. 6, *f*) отличается тем, что при низкой взаимной индуктивности достигается высокая и стабильная эффективность передачи, что делает эту топологию лучшим выбором для использования в условиях переменной нагрузки. Полученная частотная характеристика представлена на рис. 9.

Очевидно, что при последовательном контуре (рис. 9) наиболее эффективной передача будет при наименьшем расстоянии катушек, данное значение равно 10 мм (меньшее расстояние будет сложно использовать для реальной эксплуатации). Для этого случая определим напряжение в принимающей и передающей катушках, результат представлен на рис. 10. Степень связи между двумя катушками можно выразить с помощью коэффициента связи k , который имеет значение от 0 до 1. Коэффициент связи между двумя катушками оказывает огромное влияние на выходную мощность и эффективность передачи, однако на коэффициент связи двух катушек оказывают непосредственное влияние все параметры катушки. В данном случае коэффициент можно рассчитать как отношение напряжений, он равен 0,92, что является хорошим результатом передачи электромагнитной энергии.

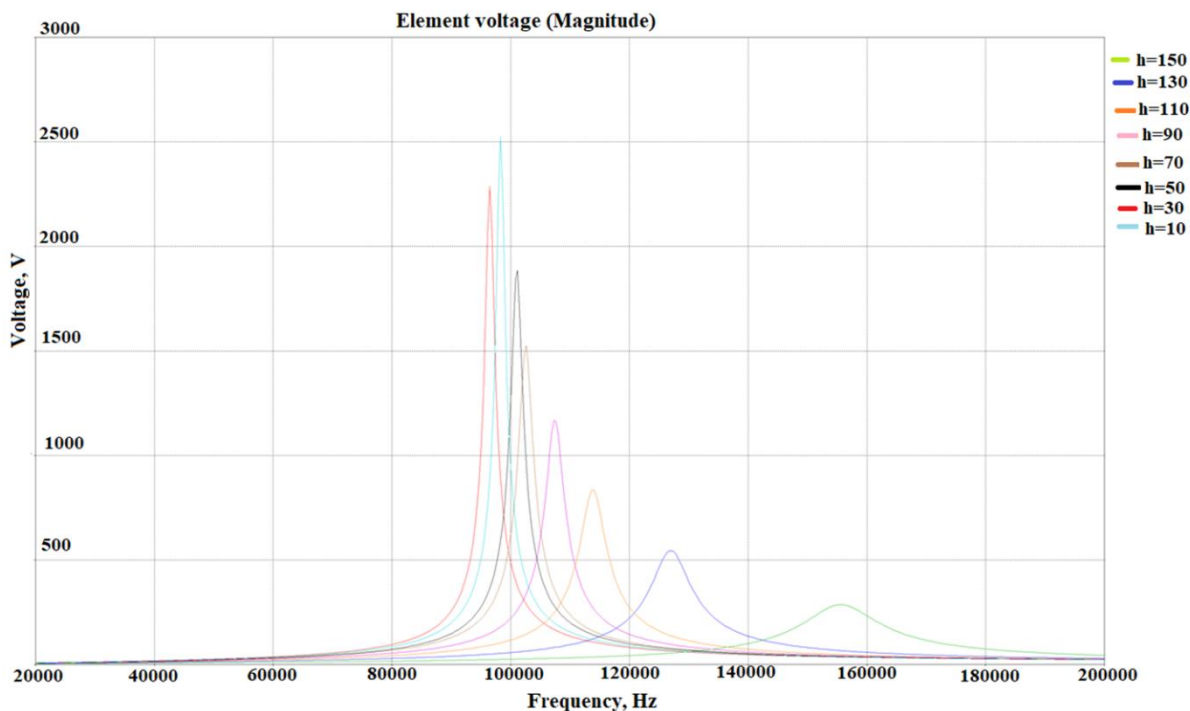


Рис. 8. Частотная характеристика напряжения, приложенного к нагрузке в генераторе тока при различных расстояниях
Fig. 8. Frequency response of voltage applied to the load in a current generator at various distances

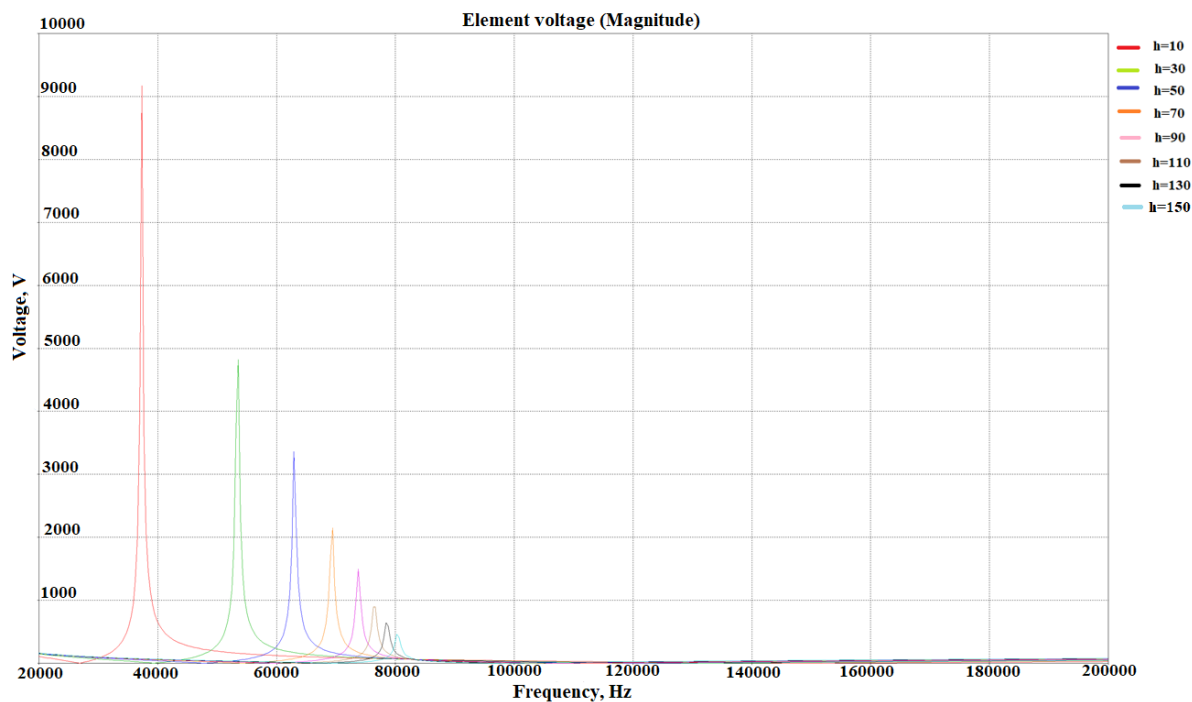


Рис. 9. Частотная характеристика напряжений для последовательного контура в генераторе
Fig. 9. Frequency response of voltages for a series circuit in a generator

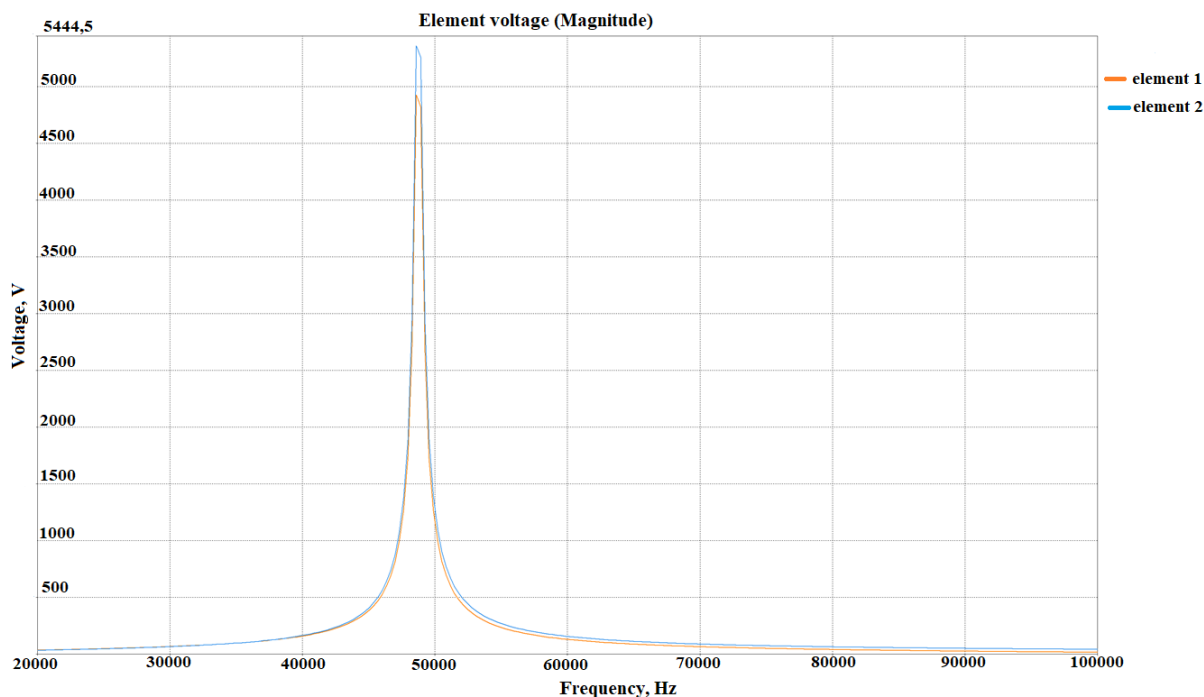


Рис. 10. Сравнение напряжений в принимающей и передающей катушках
 Fig. 10. Comparison of voltages in the receiving and in the primary coils

Заключение

В результате проведенных исследований:

1) в случае слабой связи с окружением (т. е. генератор и нагрузка подключены через высокоомные сопротивления) два, сильно связанных между собой параллельных резонансных контура обнаруживают два резонансных пика (по аналогии с акустическими и оптическими фоннными модами в твердотельной физике). Данный эффект можно использовать для измерения собственных потерь в системе передатчик – приемник и расчета ожидаемого КПД;

2) в полном согласии с теорией коэффициент связи сильно связанных между собой параллельных резонансных контуров растет с уменьшением расстояния между принимающей и передающей частями системы;

3) проведены расчеты для сильно связанных как между собой, так и с окружением (т. е. генератор и нагрузка подключены через низкоомные сопротивления) параллельных и последовательных резонансных контуров. Проведен расчет ожидаемого КПД для обоих типов резонансных контуров. Однако отметим, что использованная программа численного моделирования имела ограничение, состоящее в том, что возможно было использовать в качестве генератора только источник тока (в дальнейших исследованиях можно проанализировать и случай источника напряжения). Поэтому практическое значение имеют только результаты моделирования последовательных резонансных контуров. В частности, показано, что уменьшение расстояния, как и ожидалось, приводит к уменьшению резонансной частоты системы связанных контуров из-за роста вклада взаимоиנדукции;

4) численное моделирование позволяет рассчитать емкости для достижения резонанса в требуемой области частот как для параллельного, так и последовательного контура;

5) в процессе дальнейшего моделирования необходимо обязательно сравнить практическую реализацию и модель для ее верификации.

Предполагается также проведение дальнейших исследований для установления условий достижения максимального КПД, изучения влияния взаимной ориентации и ошибок изготовления, выработки оптимальных конфигураций с учетом ограничений на используемые материалы, максимальные токи и напряжения.

Библиографический список

Сафин А. Р., Ившин И. В., Цветков А. Н., Доломанюк Л. В. [и др.]. Изучение конструктивных особенностей мобильных установок заряда электротранспорта для разработки эскизной конструкторской документации // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2021. Т. 13, № 3(51). С. 15–24. EDN: KMOTRQ.

Сафин А. Р., Козырев А. Б., Петров Т. И., Низамиев М. Ф. [и др.]. Определение параметров катушек индуктивности устройства индукционного зарядного для бесконтактного способа зарядки электротранспорта // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2022. Т. 24, № 5. С. 74–83. DOI: <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-5-74-83>. EDN: GPYWAY.

- Ahmad A., Alam M. S., Mohamed A. A. S. Design and interoperability analysis of quadruple pad structure for electric vehicle wireless charging application // *IEEE Transactions on Transportation Electrification*. 2019. Vol. 5, Iss. 4. P. 934–945. DOI: <https://doi.org/10.1109/tte.2019.2929443>.
- Bentalhik I., Lassioui A., EL Fadil H., Bouanou T. [et al.]. Analysis, design and realization of a wireless power transfer charger for electric vehicles: Theoretical approach and experimental results // *World Electric Vehicle Journal*. 2022. Vol. 13, Iss. 7. Article number: 121. DOI: <https://doi.org/10.3390/wevj13070121>.
- Bouanou T., El Fadil H., Lassioui A., Assaddiki O. [et al.]. Analysis of coil parameters and comparison of circular, rectangular, and hexagonal coils used in WPT system for electric vehicle charging // *World Electric Vehicle Journal*. 2021. Vol. 12, Iss. 1. Article number: 45. DOI: <https://doi.org/10.3390/wevj12010045>.
- Bouanou T., El Fadil H., Lassioui A., Bentalhik I. [et al.]. Methodology and circuit analysis of wireless power transfer systems applied to electric vehicles wireless chargers // *World Electric Vehicle Journal*. 2023. Vol. 14, Iss. 5. Article number: 117. DOI: <https://doi.org/10.3390/wevj14050117>.
- Buja G., Bertoluzzo M., Mude K. N. Design and experimentation of WPT charger for electric city car // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2015. Vol. 62, Iss. 12. P. 7436–7447. DOI: <https://doi.org/10.1109/tie.2015.2455524>.
- Cui H., Zhong W., Li H., He F. [et al.]. A study on the shielding for wireless charging systems of electric vehicles // *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*. San Antonio, TX, USA, 2018. P. 1336–1343. DOI: <https://doi.org/10.1109/apec.2018.8341190>.
- Jiao C., Xu Y., Li X., Zhang X. [et al.]. Electromagnetic shielding techniques in the wireless power transfer system for charging inspection robot application // *International Journal of Antennas and Propagation*. 2021. Article number: 9984595. DOI: <https://doi.org/10.1155/2021/9984595>.
- Kerid R., Bourouina H. Analysis of wireless power transfer system with new resonant circuit for high efficiency using perforated capacitors // *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2019. Vol. 44. P. 2445–2451. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13369-018-3579-2>.
- Kim H., Song C., Kim D.-H., Jung D. H. [et al.]. Coil design and measurements of automotive magnetic resonant wireless charging system for high-efficiency and low magnetic field leakage // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2016. Vol. 64, Iss. 2. P. 383–400. DOI: <https://doi.org/10.1109/tmtt.2015.2513394>.
- Kuzey S., Balci S., Altin N. Design and analysis of a wireless power transfer system with alignment errors for electrical vehicle applications // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2017. Vol. 42, Iss. 28. P. 17928–17939. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.03.160>.
- Lassioui A., El Fadil H., Rachid A., El-Idrissi Z. [et al.]. Modelling and sliding mode control of a wireless power transfer system for BEV charger // *International Journal of Modelling, Identification and Control*. 2020. Vol. 34, Iss. 2. P. 171–186. DOI: <https://doi.org/10.1504/IJMIC.2020.110358>.
- Lu F., Zhang H., Hofmann H., Mi C. C. An inductive and capacitive combined wireless power transfer system with LC-compensated topology // *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2016. Vol. 31, Iss. 12. P. 8471–8482. DOI: <https://doi.org/10.1109/tpel.2016.2519903>.
- Lukic S., Pantic Z. Cutting the cord: Static and dynamic inductive wireless charging of electric vehicles // *IEEE Electrification Magazine*. 2013. Vol. 1, Iss. 1. P. 57–64. DOI: <https://doi.org/10.3390/wevj13070121>.
- Nemirovskiy A., Gracheva E., Bashirov M. Experimental study of the relationship between the technical state of a power transformer and the parameters of the higher harmonic components of currents and voltages generated by it // *Sustainable Energy Systems: Innovative Perspectives*. Eds.: A. Sinitsyn. 2021. Vol. 141. P. 155–166. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-67654-4_18.
- Panchal C., Stegen S., Lu J. Review of static and dynamic wireless electric vehicle charging system // *Engineering Science and Technology, an International Journal*. 2018. Vol. 21, Iss. 5. P. 922–937. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2018.06.015>.
- Tabachnikova T. V., Gracheva E. I., Naumov O. V., Gorlov A. N. Forecasting technical state and efficiency of electrical switching devices at electric complexes in oil and gas industry // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 860. Article number: 012014. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/860/1/012014>.
- Thein M. E., Charoensuk J., Masomtob M., Onreabroy W. [et al.]. Investigation of power transfer efficiency: Utilizing different coil designs in wireless charging of electric vehicles // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021. Vol. 1137. Article number: 012019. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1137/1/012019>.
- Zhang X., Kan T., You C., Mi C. Modeling and analysis of AC output power factor for wireless chargers in electric vehicles // *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2017. Vol. 32, Iss. 2. P. 1481–1492. DOI: <https://doi.org/10.1109/tpel.2016.2542163>.
- Zhu T., Feng P., Li X., Li F. [et al.]. The study of the effect of magnetic flux concentrator to the induction heating system using coupled electromagnetic-thermal simulation model // *International Conference on Mechanical and Automation Engineering*. Jiujiang, China, 2013. P. 123–127. DOI: <https://doi.org/10.1109/maee.2013.40>.

References

- Safin, A. R., Ivshin, I. V., Tsvetkov, A. N., Dolomanyuk, L. V. et al. 2021. The study of the design features of mobile installations for the charge of electric transport for the development of draft design documentation. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*, 13(3(51)), pp. 15–24. EDN: KMOTRQ. (In Russ.)
- Safin, A. R., Kozyrev, A. B., Petrov, T. I., Nizamiev, M. F. et al. 2022. Determination of the parameters of the inductance coils of an induction charger for a non-contact method of charging electric vehicles. *News of higher educational institutions. Energy problems*, 24(5), pp. 74–83. DOI: <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-5-74-83>. EDN: GPYWAY. (In Russ.)
- Ahmad, A., Alam, M. S., Mohamed, A. A. S. 2019. Design and interoperability analysis of quadruple pad structure for electric vehicle wireless charging application. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 5(4), pp. 934–945. DOI: <https://doi.org/10.1109/tte.2019.2929443>.
- Bentalhik, I., Lassioui, A., EL Fadil, H., Bouanou, T. et al. 2022. Analysis, design and realization of a wireless power transfer charger for electric vehicles: Theoretical approach and experimental results. *World Electric Vehicle Journal*, 13(7). Article number: 121. DOI: <https://doi.org/10.3390/wevj13070121>.
- Bouanou, T., El Fadil, H., Lassioui, A., Assaddiki, O. et al. 2021. Analysis of coil parameters and comparison of circular, rectangular, and hexagonal coils used in WPT system for electric vehicle charging. *World Electric Vehicle Journal*, 12(1). Article number: 45. DOI: <https://doi.org/10.3390/wevj12010045>.
- Bouanou, T., El Fadil, H., Lassioui, A., Bentalhik, I. et al. 2023. Methodology and circuit analysis of wireless power transfer systems applied to electric vehicles wireless chargers. *World Electric Vehicle Journal*, 14(5). Article number: 117. DOI: <https://doi.org/10.3390/wevj14050117>.
- Buja, G., Bertoluzzo, M., Mude, K. N. 2015. Design and experimentation of WPT charger for electric city car. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62(12), pp. 7436–7447. DOI: <https://doi.org/10.1109/tie.2015.2455524>.
- Cui, H., Zhong, W., Li, H., He, F. et al. 2018. A study on the shielding for wireless charging systems of electric vehicles. *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*. San Antonio, TX, USA, pp. 1336–1343. DOI: <https://doi.org/10.1109/apec.2018.8341190>.
- Jiao, C., Xu, Y., Li, X., Zhang, X. et al. 2021. Electromagnetic shielding techniques in the wireless power transfer system for charging inspection robot application. *International Journal of Antennas and Propagation*. Article number: 9984595. DOI: <https://doi.org/10.1155/2021/9984595>.
- Kerid, R., Bourouina, H. 2019. Analysis of wireless power transfer system with new resonant circuit for high efficiency using perforated capacitors. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 44, pp. 2445–2451. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13369-018-3579-2>.
- Kim, H., Song, C., Kim, D.-H., Jung, D. H. et al. 2016. Coil design and measurements of automotive magnetic resonant wireless charging system for high-efficiency and low magnetic field leakage. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 64(2), pp. 383–400. DOI: <https://doi.org/10.1109/tmtt.2015.2513394>.
- Kuzey, S., Balci, S., Altin, N. 2017. Design and analysis of a wireless power transfer system with alignment errors for electrical vehicle applications. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(28), pp. 17928–17939. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.03.160>.
- Lassioui, A., El Fadil, H., Rachid, A., El-Idrissi, Z. et al. 2020. Modelling and sliding mode control of a wireless power transfer system for BEV charger. *International Journal of Modelling, Identification and Control*, 34(2), pp. 171–186. DOI: <https://doi.org/10.1504/IJMIC.2020.110358>.
- Lu, F., Zhang, H., Hofmann, H., Mi, C. C. 2016. An inductive and capacitive combined wireless power transfer system with LC-compensated topology. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 31(12), pp. 8471–8482. DOI: <https://doi.org/10.1109/tpel.2016.2519903>.
- Lukic, S., Pantic, Z. 2013. Cutting the cord: Static and dynamic inductive wireless charging of electric vehicles. *IEEE Electrification Magazine*, 1(1), pp. 57–64. DOI: <https://doi.org/10.3390/wevj13070121>.
- Nemirovskiy, A., Gracheva, E., Bashirov, M. 2021. Experimental study of the relationship between the technical state of a power transformer and the parameters of the higher harmonic components of currents and voltages generated by it. In *Sustainable Energy Systems: Innovative Perspectives*. Eds.: A. Sinitsyn. Vol. 141, pp. 155–166. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-67654-4_18.
- Panchal, C., Stegen, S., Lu, J. 2018. Review of static and dynamic wireless electric vehicle charging system. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 21(5), pp. 922–937. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2018.06.015>.
- Tabachnikova, T. V., Gracheva, E. I., Naumov, O. V., Gorlov, A. N. 2020. Forecasting technical state and efficiency of electrical switching devices at electric complexes in oil and gas industry. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 860. Article number: 012014. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/860/1/012014>.

- Thein, M. E., Charoensuk, J., Masomtob, M., Onreabroy, W. et al. 2021. Investigation of power transfer efficiency: Utilizing different coil designs in wireless charging of electric vehicles. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1137. Article number: 012019. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1137/1/012019>.
- Zhang, X., Kan, T., You, C., Mi, C. 2017. Modeling and analysis of AC output power factor for wireless chargers in electric vehicles. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 32(2), pp. 1481–1492. DOI: <https://doi.org/10.1109/tpel.2016.2542163>.
- Zhu, T., Feng, P., Li, X., Li, F. et al. 2013. The study of the effect of magnetic flux concentrator to the induction heating system using coupled electromagnetic-thermal simulation model. *International Conference on Mechanical and Automation Engineering*. Jiujiang, China, pp. 123–127. DOI: <https://doi.org/10.1109/maee.2013.40>.

Сведения об авторах

Сафин Альфред Робертович – ул. Красносельская, 51, г. Казань, Россия, 420066;
Казанский государственный энергетический университет, канд. техн. наук, доцент;
e-mail: sarkazan@bk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1792-8780>

Alfred R. Safin – 51 Krasnoselskaya Str., Kazan, Russia, 420066;
Kazan State Power Engineering University, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor;
e-mail: sarkazan@bk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1792-8780>

Цветков Алексей Николаевич – ул. Красносельская, 51, г. Казань, Россия, 420066;
Казанский государственный энергетический университет, канд. техн. наук, доцент;
e-mail: tsvetkov9@mail.ru

Alexey N. Tsvetkov – 51 Krasnoselskaya Str., Kazan, Russia, 420066;
Kazan State Power Engineering University, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor;
e-mail: tsvetkov9@mail.ru

Лямзина Дарья Юрьевна – ул. Красносельская, 51, г. Казань, Россия, 420066;
Казанский государственный энергетический университет, ассистент;
e-mail: sng55555@mail.ru

Daria Yu. Lyamzina – 51 Krasnoselskaya Str., Kazan, Russia, 420066;
Kazan State Power Engineering University, Assistant;
e-mail: sng55555@mail.ru

Петров Тимур Игоревич – ул. Красносельская, 51, г. Казань, Россия, 420066;
Казанский государственный энергетический университет, канд. техн. наук, доцент;
e-mail: tobac15@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8733-8914>

Timur I. Petrov – 51 Krasnoselskaya Str., Kazan, Russia, 420066;
Kazan State Power Engineering University, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor;
e-mail: tobac15@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8733-8914>

Басенко Василий Романович – ул. Красносельская, 51, г. Казань, Россия, 420066;
Казанский государственный энергетический университет, преподаватель;
e-mail: sng55555@mail.ru

Vasily R. Basenko – 51 Krasnoselskaya Str., Kazan, Russia, 420066;
Kazan State Power Engineering University, Lecturer;
e-mail: sng55555@mail.ru