



## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ КАТУШЕК ИНДУКТИВНОСТИ УСТРОЙСТВА ИНДУКЦИОННОГО ЗАРЯДНОГО ДЛЯ БЕСКОНТАКТНОГО СПОСОБА ЗАРЯДКИ ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТА

Сафин <sup>1</sup>А.Р., Козырев <sup>2</sup>А.Б., Петров <sup>1</sup>Т.И., Низамиев <sup>1</sup>М.Ф., Басенко <sup>1</sup>В.Р., Лямзина <sup>1</sup>Д.Ю.

<sup>1</sup>Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

<sup>2</sup>Общество с ограниченной ответственностью «Инзарус», г. Москва, Россия

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1792-8780>, [sarkazan@bk.ru](mailto:sarkazan@bk.ru)

**Резюме:** ЦЕЛЬ. Отсутствие зарядной инфраструктуры является одной из главных причин отказа от использования электромобилей в России. Решением может стать разработка мобильных установок заряда электротранспорта (МУЗЭ). Для реализации действительно конкурентоспособного продукта необходимо учесть все возможные типы зарядок электротранспорта, и не только стандартные, CHAdeMO, CCS и т.д., но и беспроводную зарядку на базе устройства индукционного зарядного (УИЗ). Поэтому цель данной работы – начальный этап разработки УИЗ, путем моделирования двух вариантов реализации блока согласования УИЗ, сравнение полученных результатов, и для выбранной схемы разработка устройства физического моделирования, разработка рабочей конструкторской документации (РКД) оснастки и инструмента для изготовления УИЗ. МАТЕРИАЛЫ. УИЗ основан на принципе магнитной индукции, поэтому моделирование производилось для двух вариантов реализации блока согласования бесконтактной зарядки, рассчитывались частота и значение индуктивностей связанных катушек, и на базе полученных результатов сделаны выводы о оптимальном расстоянии, при котором сохраняется необходимое значение КПД. Для физического моделирования процесса бесконтактной зарядки электротранспорта разработана модель калибратора, и рассчитаны и выбраны топологии и геометрия ферритовых пластин. РЕЗУЛЬТАТЫ. На основе моделирования выбрана схема реализации УИЗ с регулировкой емкости конденсатора и разработана конструкторская документация калибратора б-осного для тестирования, на базе этих результатов разработана рабочая конструкторская документация оснастки и инструмента для изготовления МУЗЭ, где представлены топологии антенн и геометрия ферритовых пластин передатчика и приемника. НИОКТР выполнены в ООО «Инзарус» и ФГБОУ ВО «КГЭУ». ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Использование УИЗ дает большие возможности для развития мобильных зарядных станций, так как увеличивает количество возможных подключений. Однако для данного оборудования критично важен КПД и расстояние, на котором возможна передача электроэнергии, без больших потерь, поэтому уже на этапе моделирования необходимо максимально точно выбрать параметры катушек, и используемую схему. Для разрабатываемой МУЗЭ определены оптимальные решения в области моделирования и тестирования УИЗ.

**Ключевые слова:** устройство индукционное зарядное; беспроводная передача; платформа, конденсатор; зарядка электротранспорта, передатчик, приемник.

**Для цитирования:** Публикация статьи осуществлена в рамках проекта «Организация высокотехнологичного производства мобильных установок заряда электротранспорта высокой мощностью с интегрированной системой накопления электроэнергии», Соглашение №075-11-2021-048 с Минобрнауки РФ от 25 июня 2021 г.

**Для цитирования:** Сафин А.Р., Козырев А.Б., Петров Т.И., Низамиев М.Ф., Басенко В.Р., Лямзина Д.Ю. 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:10.30724/1998-9903-2022-24-5-74-83.

## DETERMINATION OF INDUCTOR PARAMETERS OF INDUCTION CHARGING DEVICE FOR CONTACTLESS METHOD OF CHARGING ELECTRIC TRANSPORT

AR. Safin<sup>1</sup>, AB. Kozyrev<sup>2</sup>, TI. Petrov<sup>1</sup>, MF. Nizamiev<sup>1</sup>, VR. Basenko<sup>1</sup>, DYu. Lyamzina<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

<sup>2</sup>Limited Liability Company "Inzarus", Moscow, Russia

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1792-8780>, sarkazan@bk.ru

**Abstract: THE PURPOSE.** The lack of charging infrastructure is one of the main reasons for the refusal to use electric vehicles in Russia. The solution could be the development of mobile electric vehicle charge units (MCSEU). To implement a truly competitive product, it is necessary to take into account all possible types of electric vehicle charging, and not only standard ones, CHAdeMO, CCS, etc., but also wireless charging based on an induction charger (IC). Therefore, the purpose of this work is to model the two main types of IC implementation, compare the results obtained, and develop a physical modeling model for the selected scheme.

**MATERIALS.** IC is based on the principle of magnetic induction, so the simulation was carried out for two options for implementing contactless charging, the frequency and value of the inductances of the coupled coils were calculated, and based on the results obtained, conclusions were drawn about the optimal distance at which the required efficiency value is maintained. For physical modeling of the process of non-contact charging of electric vehicles, a calibrator model has been developed, and ferrite plates have been calculated.

**RESULTS.** Based on the simulation, a scheme for the implementation of the IC with adjustable capacitor capacitance was chosen, the topologies of antennas and the geometry of ferrite plates and a design documentation of a 6-axis calibrator for testing were developed. R&D was carried out at the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "KSPEU".

**CONCLUSION.** The use of IC provides great opportunities for the development of mobile charging stations, as it increases the number of possible connections. However, efficiency and charging distance are critical for this equipment, therefore, already at the modeling stage, it is necessary to select the parameters of the coils as accurately as possible, and the circuit used. For the developed MCSEU, within the framework of Resolution 218, optimal solutions were identified in the field of modeling and testing of IC.

**Keywords:** induction charger; wireless transmission; platform; capacitor; electric vehicle charging; transmitter, receiver.

The publication of the article was carried out within the framework of the project «Organization of high-tech production of mobile high-power electric transport charge units with an integrated energy storage system», Agreement No. 075-11-2021-048 with the Ministry of Education and Science of the Russian Federation dated June 25, 2021.

**For citation:** Safin AR, Kozyrev AB, Petrov TI, Nizamiev MF, Basenko VR, Lyamzina DYu. Determination of inductor parameters of induction charging device for contactless method of charging electric transport. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2022;24(5):74-83. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-5-74-83.

### Введение

Перспективы применения резонансной беспроводной передачи электроэнергии существуют во многих сферах, в частности, данную технологию можно эффективно использовать для заряда электротранспорта [1].

В литературе представлены различные методы беспроводной передачи энергии, такие как индуктивная передача энергии, беспроводная передача энергии с помощью магнитной передачи [2], емкостная беспроводная передача энергии [3] и беспроводная передача энергии с помощью индуктивной связи [4]. Последний метод является одним из наиболее широко используемых методов, который был признан подходящим для зарядки электроавтомобиля. Математическое представление данного метода зарядки широко представлено в литературе.

Текущие разработки автомобильных компаний и исследовательских институтов показывают, что в течение следующих десяти-двадцати лет инфраструктура зарядки во

время вождения может быть развернута для широкого использования. Многие компании ищут способы не только расширить диапазон электромобилей за счет беспроводной зарядки, но и сделать процесс зарядки полностью автоматическим [5]. Но одной из больших проблем, с которыми сталкиваются производители электромобилей, является проблема динамической зарядки. Для беспроводной зарядки электромобилей можно выделить емкостную и резонансную индуктивную беспроводную передачу энергии. Некоторые исследования показывают, что эффективность и удельная мощность при индуктивной зарядке намного выше, чем при емкостной [6]. В то же время индуктивные параметры существенно зависят от типоразмера катушек связи [7]. Многие исследователи работают над тем, как можно передать максимальную мощность на приемную площадку и повысить общую эффективность электромобилей в динамических условиях. Но эффективность большинства работ для индуктивной зарядки ниже 90 процентов [8]. Другим фактором, влияющим на общую эффективность, является несоосность передающей и принимающей катушки при зарядке электромобиля. Эффективность будет уменьшаться с увеличением рассогласования между катушкой передатчика и катушкой приемника, в работе [9] коэффициент связи уменьшается с 1,6 до 0,2 при 20%-ной несоосности между катушками по сравнению с состоянием без несоосности. Для выравнивания магнитного поля и уменьшения потока рассеяния можно использовать различные типы экранирующих материалов [10]. Таким образом, существует проблема в низком КПД беспроводной зарядки, и проблемы несоосности между приемником и передатчиком.

По результатам исследований в устройствах, с большим энергопотреблением, таких как зарядные устройства для гибридных автомобилей, КПД достигает 90% [11]. Таким образом, каждая стадия преобразования энергии при беспроводной зарядке (DC/AC/DC преобразование) требует от себя КПД в 97 - 98%. Для достижения таких значений КПД необходимо тщательное предварительное проектирование данных устройств [12].

Рассмотрим основные преимущества системы беспроводной системы на базе индуктивно-резонансного метода:

1. Удобство и простота системы в эксплуатации вследствие того, что существует большое количество вариантов расположения источника относительно приемника.
2. Универсальность источника – данное преимущество выражается в возможности заряда нескольких приемников, даже с учетом разных требований к электропитанию.
3. Расстояние для эффективной передачи энергии может быть увеличено за счет использования резонансных ретрансляторов.

Высокая степень управления уровнем мощности и расстояний между устройствами на основе высоко резонансной беспроводной передачи энергии позволяет разнообразить конфигурацию устройств [13].

Область применения этих устройств находится в очень больших границах, от очень низких уровней мощности для беспроводных датчиков и электронных устройств, потребляющих менее одного Вт и до мощных устройств для промышленных систем и электрических транспортных средств, требующих более чем 3 кВт [14,15].

Научная значимость заключается в усовершенствовании конструкции устройств беспроводной передачи данных, основанное на моделировании двух вариантов реализации блока согласования УИЗ. Практическая значимость – получение новых типов устройств беспроводной передачи данных, предназначенных для заряда электротранспорта, и разработка конструкторской документации для создания 6-осного калибратора.

#### **Материалы и методы моделирования беспроводной системы передачи электроэнергии**

На рисунке 1 изображен внешний вид (общий и без верхней крышки) разработанной платформы индукционного устройства индукционного зарядного.

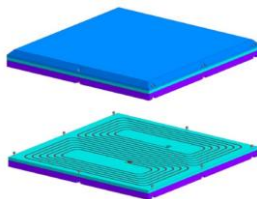


Рис.1 Модель платформы индукционной (сверху – внешний вид, снизу – вид без верхней крышки)

Fig. 1. Induction platform model (top view, bottom view without top cover)

За основу устройства индукционного зарядного взята схемотехника, аналогичная промышленным индукционным нагревателям. Для выполнения требований по уровню

зарядной мощности была выбрана установка ВЧ-20А, позволяющая обеспечить частоту 85 кГц. За основу линейного преобразователя напряжения взят *Siemens Sinamics DCP 4Q*.

Основными параметрами систем беспроводной передачи энергии являются частота и значение индуктивностей связанных катушек. В данном разделе представлены результаты математического моделирования эквивалентной схемы УИЗ (рис.2.), включающие в себя моделирование влияния параметров блока генераторного (влияние потерь на генерацию) и блока согласования (параметров конденсатора с переменной ёмкостью) на параметры УИЗ (Отчет ООО «Инзарус» - Схема деления МУЗЭ (в части УИЗ)).

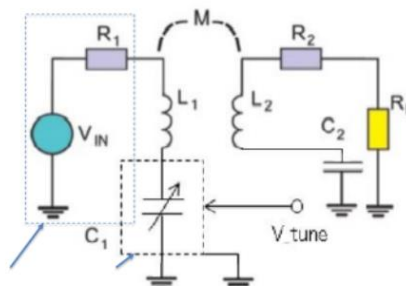


Рис. 2. Эквивалентная схема УИЗ: 1 – Блок генераторный, 2 – Блок согласования *Fig. 2. Equivalent circuit UIC: 1 - Generator unit, 2 - Matching unit*

Математическое моделирование №1.

По стандарту беспроводной передачи энергии *A4WP* была выбрана резонансная частота  $\omega=6.78$  МГц, индуктивность передающей катушки  $L1=362,6$  мкГн и ёмкость конденсатора с переменной ёмкостью (блока согласования)  $C1=60$  пФ. Блок согласования предназначен для сохранения КПД системы, при изменении расстояния между передающим и принимающим устройствами.

Для принимающего резонатора было решено использовать катушку индуктивностью  $L2=30,4$  мкГн и конденсатор ёмкостью  $C2= 0,7$  нФ. В соответствии со всеми заявленными параметрами катушки индуктивности имеют следующие характеристики, представленные в таблицах 1 и 2.

Таблица 1

Характеристики источника

Внутренний диаметр, мм	50
Внешний диаметр $D_i$ , мм	122,8
Диаметр проводника $d$ , мм	1
Расстояние между витками $s$ , мм	0,5
Число витков катушки $N$	60

Таблица 2

Характеристики приемника

Внутренний диаметр, мм	5
Внешний диаметр $D_i$ , мм	0,6
Диаметр проводника $d$ , мм	0,1
Расстояние между витками $s$ , мм	45
Число витков катушки $N$	70

Представленные параметры катушек индуктивности определяются по формуле 1:

$$L = \frac{r^2 + N^2}{8r + 11w} \tag{1}$$

где

- $L$  - Индуктивность в мкГн,
  - $r$  - радиус до центра намотки,
  - $w$  - ширина намотки,
  - $N$  - число витков.
- Введем понятие  $k = d + s$  – шаг намотки.

Тогда  $r = \frac{D_i + kN}{2}$  и  $w = kN$ , в итоге, задавшись требуемой индуктивностью,

диаметром провода, шагом намотки и внутренним диаметром катушки мы можем найти число витков и внешний диаметр катушки.

Используя стандартные формулы для расчета катушек индуктивности, получаем, что добротности катушек соответственно равны  $Q_1=245,8$  и  $Q_2=92,8$ . Учитывая, что  $k$  - коэффициент связи между катушками, взаимная индуктивность будет определяться по формуле 2. Результат представлен на рисунке 3.

$$M = k\sqrt{L_1L_2} \quad (2)$$

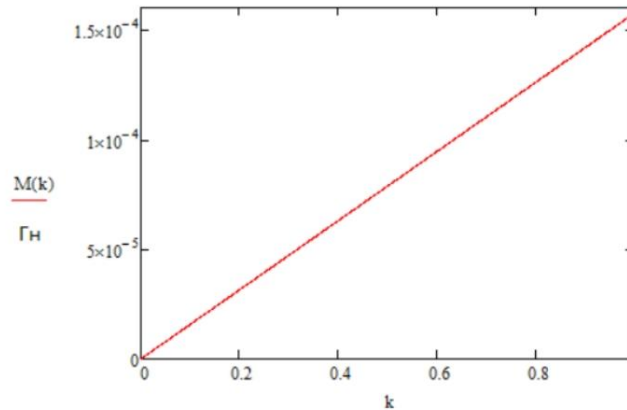


Рис. 3. График зависимости взаимной индукции  $M$  от коэффициента связи между катушками  $k$  *Fig. 3. Mutual inductance  $M$  vs. coupling coefficient between coils  $k$*

Сопротивления потерь в системе равны  $R_1=1,5$  Ом (потери в блоке генераторном) и  $R_2=1$  Ом. Исходя из значения индуктивной связи  $M=3$  мкГн, используя формулу 3, получаем сопротивление нагрузки устройства  $R_L=16,6$  Ом.

$$R_L = R_2 \sqrt{1 + \frac{\omega_0^2 M^2}{R_1 R_2}} \quad (3)$$

Эффективная добротность всей системы  $Q_m$  определяется по формуле 4 и равняется  $Q_m=151$  при  $k=1$ .

$$Q_m = k\sqrt{Q_1 Q_2} \quad (4)$$

Из результатов моделирования можно сделать вывод, что данная система имеет максимальную добротность  $Q_m=151$ . При максимальной добротности КПД системы составляет 98,6 %.

При увеличении расстояния между устройствами можно сохранить КПД системы регулируя параметры блока согласования, можно определить, что сохранение КПД системы возможно при изменении расстояния не более чем на 1 мм. Следовательно, данное решение не имеет практического применения из-за слишком малого расстояния. Соответственно сравнивая случаи, когда в блоке согласования используется линейный конденсатор и нелинейный, можно сказать, что такой конденсатор не повышает КПД.

Математическое моделирование №2.

Проведём математическое моделирование для высоко резонансных систем с теми же катушками и конденсаторами и посмотрим, как в них может влиять блок согласования с переменной емкостью на КПД системы.

Опираясь на результаты ранее проведённого моделирования, можем выделить некие особенности высоко резонансной системы по сравнению с нерезонансной.

Коэффициент связи между катушками находится по формуле 5:

$$k = \frac{\omega M}{2\sqrt{L_1 L_2}} \quad (5)$$

Следует заметить, что расстояние между передатчиком и приёмником в разы больше, и составляет 200 мм (рис. 4.).

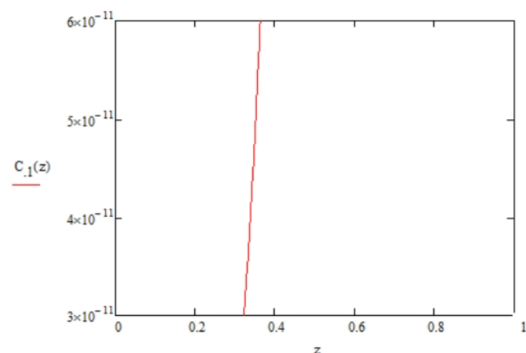


Рис. 4. График зависимости коэффициента связи от расстояния *Fig. 4. Plot of relationship coefficient versus distance*

Если включить регулировку и поменять ёмкость блока согласования с 30 пФ до 19,5 пФ, то на некотором расстоянии можно будет сохранить КПД, влияние регулировки продемонстрировано на рисунке 5.

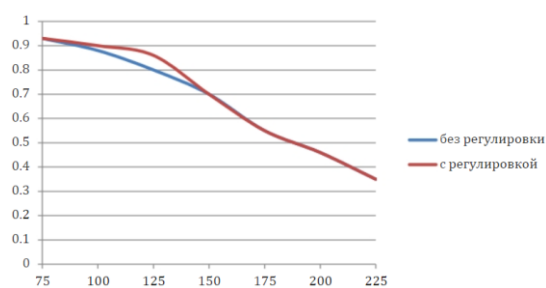


Рис. 5 График зависимости КПД от расстояния при изменении ёмкости C1 *Fig. 5. Plot of dependence of efficiency on distance when capacitance C1 changes*

Из рисунка 4 видно, что КПД такой системы можно удержать на высоком уровне на расстоянии до 12 сантиметров.

Отдельно стоит упомянуть, что в такой системе существуют свои недостатки. Например, при использовании регулировки нелинейного конденсатора увеличиваются потери в системе, которые напрямую влияют на КПД всего устройства. Потери возникают из-за увеличения сопротивления конденсатора, т. е. из-за увеличения ESR (эквивалентного последовательного сопротивления) управляемого конденсатора.

При проектировании систем беспроводной передачи электроэнергии главным образом стоит обратить внимание на характеристики и параметры элементов, входящих в эту систему. Потери в каждом из элементов определяют КПД всей системы.

*Разработка оборудования, предназначенного для проверки характеристик УИЗ*

Для проверки характеристик устройства индукционного зарядного ФГБОУ ВО «КГЭУ» разработана конструкторская документация на «Калибратор 6-осный» ЛРЕН. 296375.001 СБ (рис. 6), который предназначен для физического моделирования процесса беспроводной передачи энергии между платформой индукционной и принимающим устройством, расположенным на электромобиле.



Рис. 6 Сборочный чертеж Калибратора 6-осного

*Fig. 6. Assembly drawing of the Calibrator 6-axis*



Комплект приемников (принимающих устройств) являются устройствами для моделирования эквивалентной нагрузки электромобиля и соответственно планируются к вхождению в состав технологической оснастки.

Передачик предназначен для передачи энергии переменного электромагнитного поля при бесконтактном способе зарядки на приемник. Формованная топология передатчика (ЛРЕН. 411519.001) включается в состав платформы индукционной. Является разъемным устройством.

Несколько приемников требуются для тестирования различных конструктивных вариантов беспроводной передачи энергии заряжаемого электромобиля. Различные марки электромобилей с функцией беспроводной зарядки имеют разные конфигурации приемных антенн, дорожные просветы и соответственно расстояние от передающей до приемной антенны. Расположение обмоток, площадей передатчика и приемника напрямую определяют эффективность беспроводной передачи энергии.

Исходя из теории распространения радиоволн и антенн – эффективная площадь, коэффициент использования, ширина апертуры антенн, расстояние между передатчиком и приемником, геометрия антенн являются основополагающими физическими параметрами, определяющими энергетическую эффективность передачи.

Планируется, что индукционная платформа будет выносным коммутируемым для беспроводной зарядки электромобиля. Данное устройство должно располагаться на асфальтовом, бетонном или грунтовом покрытии на достаточном удалении от контейнера. Процесс заряда должен происходить следующим образом: автомобиль должен заехать визуально таким образом, чтобы индукционная платформа оказалась примерно на уровне встроенного приемного устройства под капотом. Руководство по выставлению автомобиля устанавливается каждым автопроизводителем.

Индукционная платформа должна содержать систему связи на основе Bluetooth, которую она использует для связи с зарядным устройством на автомобиле, чтобы определить максимальную скорость заряда, состояние заряда и другую информацию.

Несколько датчиков в принимающем устройстве должны использовать сигнал от индукционной платформы, работающей на холостом ходу, для триангуляции площадки и отображения информации о целеуказании водителю на дисплее в автомобиле.

На основе результатов, полученных ООО «Инзарус» (Технический отчет - Исходные данные к рабочей конструкторской документации (РКД) оснастки и инструмента для изготовления МУЗЭ (1 очередь)), ФГБОУ ВО «КГЭУ» была разработана рабочая конструкторская документация (РКД) оснастки и инструмента для изготовления МУЗЭ. В данном документе была разработана документация для создания калибратора (для примера на рисунке 7 представлен сборочный вид передатчика).

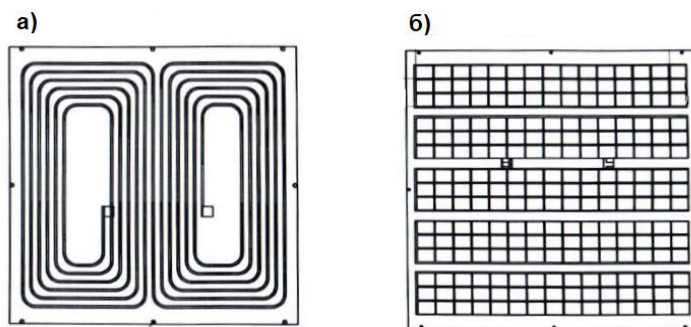


Рис.7. Сборочный вид передатчика оснастки и инструмента: а) вид сверху; б) вид снизу *Fig. 7. Assembly view of the repetition: a) top view; b) type of base*

Разные классы транспорта различаются, в том числе дорожным просветом (клиренсом). Поэтому были разработаны 3 вида приемников на 3 вида клиренса. Различие приемников заключается в количестве и радиусе витков, а также количеством и толщиной используемых ферритовых пластин. На рисунке 8 представлена топология и геометрия разработанных антенн, используемых в приемниках и передатчике.

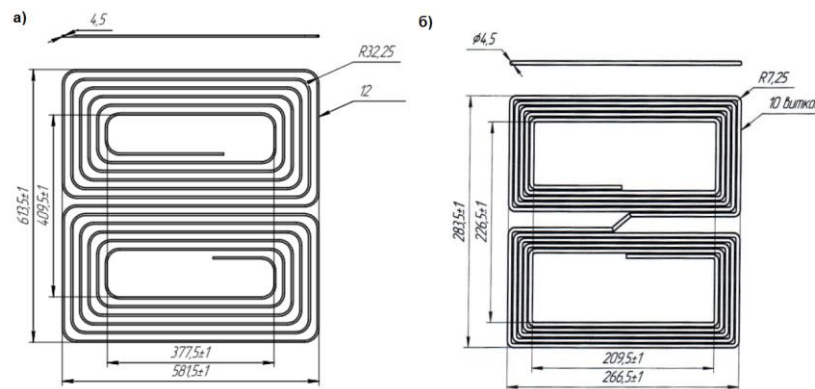


Рис. 8. Топология и геометрия антенн:  
а) передатчика; б) приемник

Fig. 8. Topology and geometry of antennas: a) transmitter; b) receiver

### Результаты

Таким образом, на основе результатов анализа существующих литературных данных и моделирования различных типов резонансных систем выбрана схема с регулировкой емкости в блоке согласования (Отчет ООО «Инзарус» - Схема деления МУЗЭ (в части УИЗ)).

Разработана конструкторская документация калибратора 6-осного для проверки характеристик устройства индукционного зарядного (ЛРЕН. 296375.001).

Разработаны топологии антенн и геометрия ферритовых пластин, используемых в комплекте оснастки и инструмента для изготовления МУЗЭ (ЛРЕН. 296375.002, ЛРЕН. 296375.003)

Полученные результаты использованы при разработке РКД на комплект приемников, предназначенных для приема электромагнитного излучения, а также РКД на передатчик, предназначенного для передачи электромагнитного излучения на приемник.

### Заключение

Из литературного обзора [1-6] сделан вывод, что наиболее перспективным вариантом реализации беспроводной зарядки электротранспорта является резонансная индуктивная зарядка. Однако главным недостатком является снижение КПД в зависимости от расстояния, таким образом, необходимо правильно рассчитать параметры катушек УИЗ [7], что и было проведено в данной статье.

Расчеты, приведенные в главе «Методы и материалы моделирования беспроводной системы передачи электроэнергии», подтверждают, что возможно получение КПД выше 90% для индуктивной беспроводной зарядки, по сравнению с работами [9,11], и доказывают результаты, полученные в работе [12].

В работе сравниваются самые известные технологии беспроводной зарядки и моделируется резонансная индуктивная зарядка. Ключевые компоненты УИЗ были изучены с точки зрения компенсационной топологии и конструкции катушки. Разработаны и определены две модели, без регулирования и с регулированием емкости конденсатора. В результате две используемые модели были рассмотрены для получения значений взаимной индуктивности, результаты были сопоставлены и сделаны выводы, что при регулировании емкости, необходимое КПД сохраняется на большем расстоянии, что позволит получить устройства, описываемые в работах [13-15].

Метод используется для резонанса частоты катушки передатчика и частоты катушки приемника. Показан расчет мощности нагрузки и КПД для воздушного зазора до 200 мм. В статье определяются основные принципы УИЗ, и данное исследование будет расширено для будущих работ в этой области.

Представленная работа включала моделирование нового типа устройства УИЗ для обеспечения высокоэффективной зарядки аккумулятора электромобиля. Извлеченные данные из экспериментов по моделированию демонстрируют общую хорошую производительность предложенного алгоритма. В статье также рассмотрены конструктивные особенности антенн передатчика и приемников УИЗ, разработана конструкторская документация калибратора 6-осного.

В качестве последующего исследования будут рассмотрены вопросы, связанные с эффективностью используемых преобразователей, при этом будут рассмотрены трудности управления системой.



### Литература

1. Сафин А.Р., Ившин И.В., Цветков А.Н. и др. Развитие технологии мобильных зарядных станций для электромобилей // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2021. – Т. 23. – № 5. – С. 100-114.
2. Y. Shin, J. Park, H. Kim, S. Woo, B. Park, S. Huh, et al. Design Considerations for Adding Series Inductors to Reduce Electromagnetic Field Interference in an Over-Coupled WPT System. *Energies*. 14 (2021), p. 2791.
3. J. Dai, D.C. Ludois. «Capacitive Power Transfer Through a Conformal Bumper for Electric Vehicle Charging». *IEEE J Emerg Sel Top Power Electron*, 4 (2016), pp. 1015-1025.
4. F. Musavi, W. Eberle. Overview of wireless power transfer technologies for electric vehicle battery charging. *IET Power Electron*, 7 (2014), pp. 60-66.
5. Y. Yang, M. El Baghdadi, U. Lan, Y. Benomar, J. Van Mierlo, and O. Hegazy, Design methodology, modeling, and comparative study of wireless power transfer systems for electric vehicles, *Energies*. 2018. V. 11. no. 7. p. 1716.
6. Z. Younes, I. Alhamrouni, S. Mekhilef, M. Reyasudin, A memory-based gravitational search algorithm for solving economic dispatch problem in micro-grid. *Ain Shams Eng J*, 12 (2021), pp. 1985-1994.
7. A.M. Hussien, H.M. Hasanien, S.F. Mekhamer, Sunflower optimization algorithm-based optimal PI control for enhancing the performance of an autonomous operation of a microgrid, *Ain Shams Eng J*. 12 (2021), pp. 1883-1893.
8. R. Godoy, E. Maddalena, G. Lima, L. Ferrari, V. Pinto, and J. Pinto. Wireless charging system with a non-conventional compensation topology for electric vehicles and other applications, *Eletrônica de Potência*. 2016. V. 21, no. 1. pp. 42–51.
9. D. Baros, N. Rigogiannis, P. Drougas, D. Voglitsis, and N. P. Papanikolaou, «Transmitter side control of a wireless EV charger employing IoT,» *IEEE Access*. V. 8, pp. 227834–227846, 2020.
10. Сафин А.Р., Ившин И.В., Цветков А.Н. 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.
11. D. Niculae, M. Iordache, M. Stanculescu, M. L. Bobaru and S. Deleanu, "A Review of Electric Vehicles Charging Technologies Stationary and Dynamic," 2019 11th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE), 2019, pp. 1-4
12. Mehrjerdi H., Hemmati R. Stochastic model for electric vehicle charging station integrated with wind energy // *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. - 2020. - № 37. - P. 157-177.
13. Добровольская Л.А. Передача энергии в системе из двух контуров для беспроводной зарядки технических устройств // *The Scientific Heritage*. 2020. №44-1 (44).
14. Z. Danping, L. Juan, C. Yuchun, L. Yuhang and C. Zhongjian, "Research on Electric Energy Metering and Charging System for Dynamic Wireless Charging of Electric Vehicle," 2019 4th International Conference on Intelligent Transportation Engineering (ICITE), 2019, pp. 252-255.
15. R. Yuan, Z. Jiang, Z. Yi, S. Zhao, S. Wang and K. Song, «Research on electric energy metering key technology of electric vehicle wireless charging», *Electrical Measurement & Instrumentation*, Vol. 55, pp. 11-16, Aug. 2018.

### Авторы публикации

**Сафин Альфред Робертович** – профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», Казанский государственный энергетический университет.

**Козырев Андрей Борисович** – сотрудник ООО «Инзарус».

**Петров Тимур Игоревич** – ассистент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», Казанский государственный энергетический университет.

**Низамиев Марат Фирденатович** – доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», Казанский государственный энергетический университет.

**Басенко Василий Романович** – ассистент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», Казанский государственный энергетический университет.

**Лямзина Дарья Юрьевна** – ассистент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», Казанский государственный энергетический университет.

### References

1. Safin AR, Ivshin IV, Tsvetkov AN, et.al. Development of technology of mobile charging stations for electric vehicles. *Energy problems*. 2021;23(5);100-114.
2. Shin Y, Park J, Kim H, et al. Design Considerations for Adding Series Inductors to Reduce Electromagnetic Field Interference in an Over-Coupled WPT System. *Energies*. 2021;14;2791.
3. Dai J, Ludois DC. *Capacitive Power Transfer Through a Conformal Bumper for Electric Vehicle Charging*. IEEE J Emerg Sel Top Power Electron. 2016;4;1015-1025.
4. Musavi F, Eberle W. *Overview of wireless power transfer technologies for electric vehicle battery charging*. IET Power Electron. 2014;7;60-66.
5. Y. Yang, M. El Baghdadi, U. Lan, Y. Benomar, J. Van Mierlo, and O. Hegazy, «Design methodology, modeling, and comparative study of wireless power transfer systems for electric vehicles» *Energies*. 2018;11(7):1716.
6. Younes Z, Alhamrouni I, Mekhilef S, et.al. A memory-based gravitational search algorithm for solving economic dispatch problem in micro-grid. *Ain Shams Eng J*. 2021;12;1985-1994.
7. Hussien AM, Hasanien HM, Mekhamer SF. Sunflower optimization algorithm-based optimal PI control for enhancing the performance of an autonomous operation of a microgrid. *Ain Shams Eng J*. 2021;12;1883-1893.
8. Godoy R, Maddalena E, Lima G, et.al. ‘Wireless charging system with a non-conventional compensation topology for electric vehicles and other applications. *Eletrônica de Potência*. 2016;21;1;42-51.
9. Baros D, Rigogiannis N, Drougas P, et.al. *Transmitter side control of a wireless EV charger employing IoT*. IEEE Access. 2020;8;227834–227846.
10. Safin AR, Ivshin IV, Tsvetkov AN, et.al. The study of the design features of mobile electric transport charge installations for the development of draft design documentation. *Vestnik KSPEU*. 2021;13;3(51);15-24.
11. Niculae D, Iordache M, Stanculescu M, et.al. *A Review of Electric Vehicles Charging Technologies Stationary and Dynamic*. 2019 11th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE). 2019;1-4.
12. Mehrjerdi H, Hemmati R. Stochastic model for electric vehicle charging station integrated with wind energy. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2020;37;157-177.
13. Dobrovolskaya LA. Power transfer in a two-loop system for wireless charging of technical devices. *The Scientific Heritage*. 2020;44-1;44.
14. Danping Z, Juan L, Yuchun C, et.al. *Research on Electric Energy Metering and Charging System for Dynamic Wireless Charging of Electric Vehicle*. 2019 4th International Conference on Intelligent Transportation Engineering (ICITE). 2019;252-255.
15. Yuan R, Jiang Z, Yi Z, et.al. Research on electric energy metering key technology of electric vehicle wireless charging. *Electrical Measurement & Instrumentation*. 2018;55;11-16.

### Authors of the publication

**Alfred R. Safin** – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

**Andrey B. Kozyrev** – LLC «Inzarus», Moscow, Russia.

**Timur I. Petrov** – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

**Marat F. Nizamiev** – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

**Vasily R. Basenko** – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

**Darya Yu. Lyamzina** – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

**Получено** 13.08.2022г.

**Отредактировано** 09.09.2022г.

**Принято** 10.09.2022г.