

## ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ/ELECTRICAL COMPLEXES AND SYSTEMS

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.162.122>

### МОДЕЛЬ БЕСПРОВОДНОГО ЗАРЯДНОГО УСТРОЙСТВА, РАЗРАБОТАННАЯ В ПРОГРАММЕ SIMINTECH

Научная статья

**Коловский А.В.<sup>1,\*</sup>, Платонова Е.В.<sup>2</sup>, Глушкин Е.Я.<sup>3</sup>, Торопов А.С.<sup>4</sup>, Рузиев З.А.<sup>5</sup>**

<sup>1, 2, 3, 4</sup> Сибирский федеральный университет, Абакан, Российская Федерация

<sup>5</sup> Хакасский технический институт – филиал СФУ, Абакан, Российская Федерация

\* Корреспондирующий автор (aleksey\_a\_v[at]list.ru)

#### Аннотация

Беспроводные зарядные устройства находят все более широкое применение в современном мире и отличаются большим разнообразием по назначению, принципу действия, конструктивному исполнению. Наибольшее распространение получили устройства, построенные на принципе индуктивной и магнитно-резонансной связи. Компьютерное моделирование таких устройств является удобным инструментом для анализа переходных процессов в элементах электрической схемы при взаимодействии передающей и принимающей катушками, в том числе изменение выделяемой энергии магнитного поля.

В работе представлена динамическая модель беспроводного зарядного устройства, разработанная в программном комплексе SimInTech. Модель позволяет описывать переходные процессы в инверторе и выпрямителе и оценивать коэффициент полезного действия системы.

Для проверки адекватности модели было выполнено сравнение результатов моделирования динамических процессов с экспериментальными данными, описанными в научных публикациях. Сравнение показало высокую степень сходимости полученных на модели результатов.

Также была получена зависимость коэффициента полезного действия устройства от частоты, проведена оценка потерь энергии при варьировании параметров вольт-амперной характеристики.

Предложенная в работе модель может использоваться при проектировании беспроводных зарядных устройств и анализе их свойств в процессе эксплуатации.

**Ключевые слова:** беспроводное зарядное устройство, коэффициент полезного действия, магнитно-резонансная связь, выпрямитель, инвертор.

### WIRELESS CHARGING DEVICE MODEL DEVELOPED IN THE SIMINTECH PROGRAMME

Research article

**Kolovskii A.V.<sup>1,\*</sup>, Platonova Y.V.<sup>2</sup>, Glushkin Y.Y.<sup>3</sup>, Toropov A.S.<sup>4</sup>, Ruziev Z.A.<sup>5</sup>**

<sup>1, 2, 3, 4</sup> Siberian Federal University, Abakan, Russian Federation

<sup>5</sup> Khakass Technical Institute – branch of SFU, Abakan, Russian Federation

\* Corresponding author (aleksey\_a\_v[at]list.ru)

#### Abstract

Wireless chargers are becoming increasingly widespread in the modern world and vary greatly in terms of their purpose, operating principle and design. The most common devices are those based on inductive and magnetic resonance coupling. Computer modelling of such devices is a convenient tool for analysing transient processes in electrical circuit elements during the interaction of transmitting and receiving coils, including changes in the energy released by the magnetic field.

The work presents a dynamic model of a wireless charger developed in the SimInTech software package. The model allows to describe transient processes in the inverter and rectifier and to evaluate the efficiency of the system.

To verify the adequacy of the model, the results of modelling dynamic processes were compared with experimental data described in scientific publications. The comparison showed a high degree of convergence of the results obtained in the model.

The dependence of the device's efficiency ratio on frequency was also obtained, and energy losses were estimated when varying the parameters of the volt-ampere characteristic.

The model proposed in this work can be used in the design of wireless chargers and the analysis of their properties during operation.

**Keywords:** wireless charger, efficiency ratio, magnetic resonance communication, rectifier, inverter.

#### Введение

Технология беспроводного заряда применима для многих видов электрооборудования, начиная от маломощных бытовых приборов до промышленных потребителей [1], [2]. Наибольшее распространение данная технология получила на рынке портативных устройств. Например, беспроводные зарядные устройства (БЗУ) могут быть использованы для зарядки имплантируемых медицинских устройств, таких как сердечные кардиостимуляторы, слуховые аппараты и др. Преимуществом применения БЗУ для технологического электротранспорта является возможность повышения автономности хода и снижения числа аккумуляторных батарей [3], [4], [5], [6]. Применение зарядных устройств особенно актуально на горно-металлургических предприятиях для заряда шахтного электротранспорта [7], [8], [9].

Наиболее широкое распространение получили БЗУ, построенные на принципе индуктивной и магнитно-резонансной связи благодаря большей безопасности по сравнению с использованием электромагнитного излучения

радиочастотного или микроволнового диапазона [5], [6], [10], [11]. Функциональная схема такого БЗУ приведена на рисунке 1. Основой схемы является индуктивно-емкостная компенсационная цепь резонансного контура, в который входят передающая и приемная катушки. На резонансный контур подается напряжение от высокочастотного инвертора. Высокочастотное магнитное поле, созданное передающей катушкой, наводит в приемной катушке напряжение, подаваемое в цепь заряда через выпрямитель. Высокая эффективность беспроводной передачи имеет место при ее работе в резонанском или близком к нему режиме.

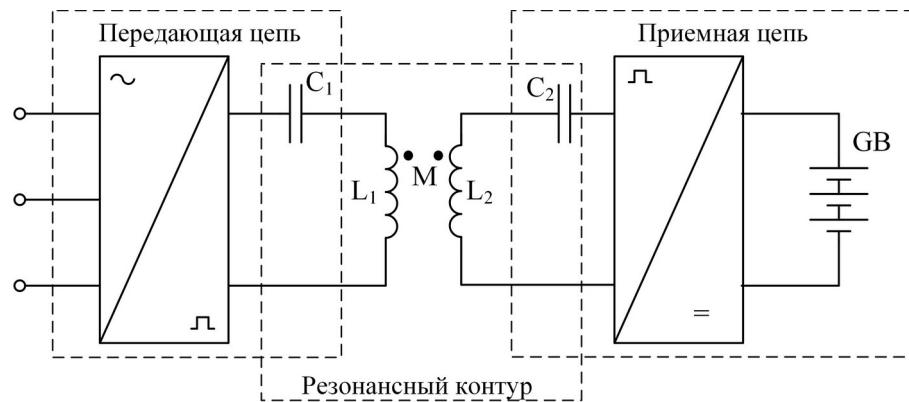


Рисунок 1 - Функциональная схема системы беспроводной передачи энергии

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.162.122.1>

Цель данного исследования — повысить эффективность проектирования БЗУ путем разработки в SimInTech динамической модели, реалистично отражающей переходные процессы и потери в системе.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- создание базовой модели в SimInTech для упрощенного представления БЗУ;
- верификация модели путем сопоставления с опубликованными экспериментальными данными;
- анализ влияния рабочей частоты на коэффициент полезного действия (КПД) БЗУ;
- разработка усовершенствованной модели, включающей характеристики транзисторных ключей (ВАХ);
- оценка воздействия характеристик транзисторных ключей на общий КПД БЗУ.

### Методы исследования

Рост потребности в различных БЗУ актуализирует работы по их проектированию. В процессе эксплуатации БЗУ часто требуется анализ возможностей их применения в конкретных условиях. Для решения таких задач целесообразно развивать компьютерное моделирование БЗУ. Моделирование в программных комплексах получило широкое распространение при разработке электротехнических устройств [11], [12], [13]. Нами предложена динамическая модель БЗУ на основе магнитно-резонансной связи. Модель разработана с использованием программы SimInTech, которая позволяет оценить переходные процессы в магнитно-резонансном контуре, потери в ключах инвертора, зависимость КПД от частоты инвертора.

Работа БЗУ строится на принципе индуктивной и магнитно-резонансной связи между стационарно размещаемой передающей катушкой и подвижной приемной катушкой. Передающая и приемная катушки входят в индуктивно-емкостную компенсационную цепь резонансного контура, на который подается напряжение с помощью специального высокочастотного инвертора. Создаваемое передающей катушкой высокочастотное магнитное поле наводит напряжение в приемной катушке, которое через силовой преобразователь постоянного тока передается в цепь заряда аккумулятора [5], [8], [12]. Когда система работает в резонанском режиме, беспроводная передача энергии осуществляется с высокой эффективностью.

Эквивалентная схема замещения моделируемого БЗУ представлена на рисунке 2.

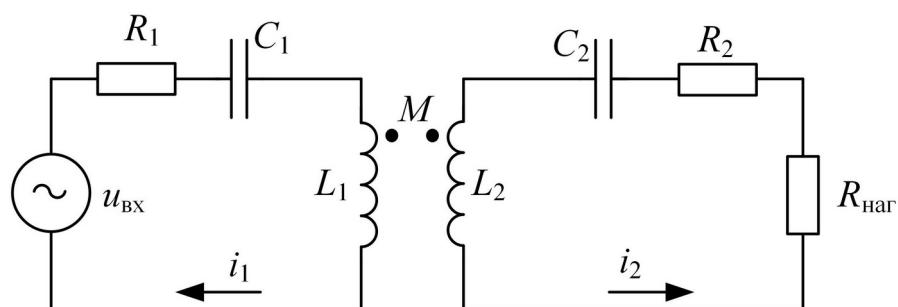


Рисунок 2 - Эквивалентная схема замещения БЗУ

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.162.122.2>

На рисунке 3 представлена упрощенная модель БЗУ, разработанная в программе SimInTech.

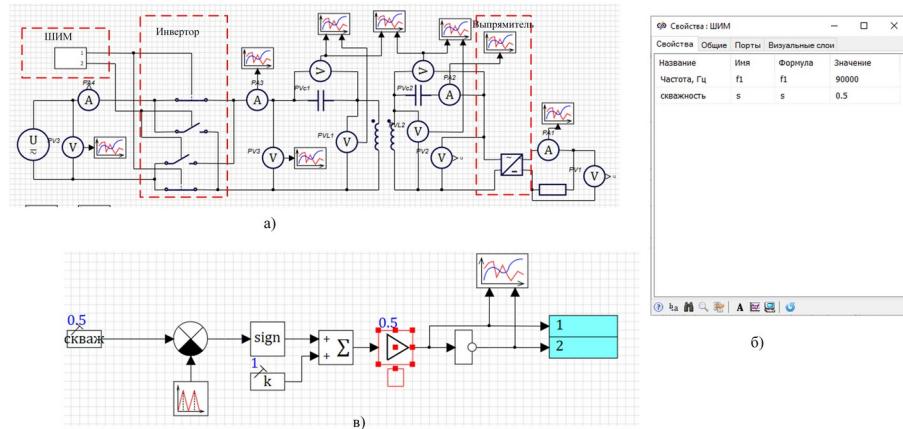


Рисунок 3 - Упрощенная модель БЗУ в SimInTech:

а – динамическая модель силовой части; б – окно настройки свойств блока ШИМ;  
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.162.122.3>

Полупроводниковые элементы инвертора представлены идеальными ключами. Выпрямитель в модели является идеальным, поэтому напряжение цепи постоянного тока будет неизменным. Однако разработанная модель учитывает высокочастотный инвертор и выпрямитель в цепи заряда. Управление процессом беспроводной передачи энергии выполняется с заданной частотой и широтно-импульсной модуляцией (ШИМ). Реализация ШИМ представлена в виде субмодели (рисунок 3б), в качестве параметров которой выступает частота и скважность сигнала.

С целью повышения КПД установки из-за пульсаций напряжения в схему был добавлен сглаживающий фильтр. Сглаживание напряжения в цепи заряда приводит к увеличению действующего значения напряжения, и, следовательно, к росту полезной мощности. При моделировании сглаживающий фильтр был представлен емкостью  $C$ , рассчитываемой по формуле 1:

$$C = \frac{q}{p\pi f(R_{\text{наг}} + R_{VD})K_{p.\text{вх}}} \quad (1)$$

где  $q$  — коэффициент сглаживания пульсаций,

$p$  — пульсность схемы (для однофазной мостовой схемы  $p = 2$ ),

$f$  — частота, Гц,

$R_{\text{наг}}$  — сопротивление нагрузки, Ом,

$R_{VD}$  — сопротивление диода в прямом направлении, Ом,

$K_{p.\text{вх}}$  — коэффициент пульсаций выпрямителя без фильтра (для однофазной мостовой схемы  $K_{p.\text{вх}} = 2/3$ ),

Коэффициент сглаживания пульсаций рассчитывается по формуле 2:

$$q = \frac{K_{p.\text{вх}}}{K_p} \quad (2)$$

где  $K_p$  — желаемый коэффициент пульсаций.

Сопротивление нагрузки рассчитывается как отношение напряжение заряда к току заряда.

Представленная упрощенная модель не учитывает форму ВАХ транзисторов инвертора, а именно падение напряжения в прямом направлении, сопротивление транзисторов, ток утечки закрытого транзистора и аналогичные характеристики обратных диодов. Перечисленные факторы могут оказать влияние на потери мощности в системе и снизить ее КПД. Для учета влияния характеристик транзисторов на работу беспроводного зарядного устройства собрана модель инвертора на базе элементов «полупроводниковый безынерционный элемент» с типом ВАХ IGBT+диод. Модель инвертора реализована в виде субмодели «инвертор ВЧ», приведенной на рисунке 4.

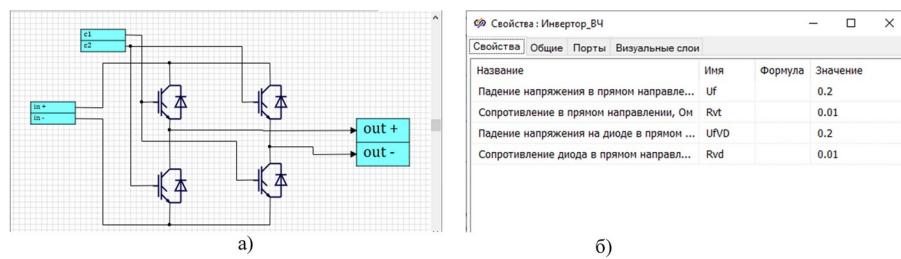


Рисунок 4 - Субмодель «инвертор\_ВЧ»:

а – субмодель блока «инвертор\_ВЧ»; б – окно настройки параметров блока «инвертор\_ВЧ»

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.162.122.4>

Для удобства параметры транзисторов (падения напряжения и сопротивление) в прямом направлении и аналогичные параметры диодов задаются через свойства субмодели.

### Основные результаты

Для проверки адекватности разработанной модели сравнивались результаты моделирования с результатами экспериментальных исследований, выполненных на лабораторном образце и представленных в работе [8]. Осциллограммы напряжений, полученные на лабораторном образце, показаны на рисунке 5. Исследованное беспроводное зарядное устройство является макетным образцом беспроводного зарядного устройства электровоза А5,5 600-У5 в масштабе 1:10. Для устройства были заданы следующие параметры:  $L_1 = L_2 = 100 \text{ мкГн}$ ;  $M = 10 \text{ мкГн}$ ;  $R_1 = R_2 = 0,01 \text{ Ом}$ ;  $C_1 = C_2 = 33 \text{ нФ}$ ;  $R_{\text{наг}} = 6 \text{ Ом}$ ; частота ШИМ 91 кГц; скважность 0,28; выпрямленное напряжение 24 В. Цена деления шкалы времени равна 2 мс, а шкалы напряжения — 100 В. На рисунке 5 приведены следующие обозначения:  $u_{L1}$  и  $u_{C1}$  – напряжения на катушке и конденсаторе передающей цепи,  $u_{L2}$  и  $u_{C2}$  – напряжения на катушке и конденсаторе приемной цепи.

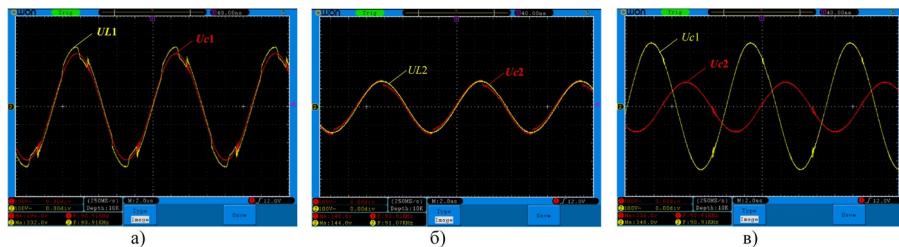


Рисунок 5 - Экспериментальные осциллографы напряжений:

а –  $u_{L1}$  и  $u_{C1}$ ; б –  $u_{L2}$  и  $u_{C2}$ ; в –  $u_{C1}$  и  $u_{C2}$ DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.162.122.5>

Моделирование средствами SimInTech проводилось для схемы замещения с теми же параметрами и при той же частоте и скважности сигналов. Осциллограммы напряжений, полученных в результате моделирования, показаны на рисунке 6. Обозначения напряжений аналогичны рисунку 5.

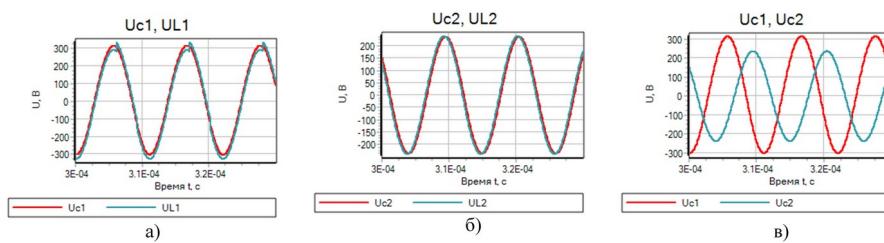


Рисунок 6 - Результаты моделирования в SimInTech:

а –  $u_{L1}$  и  $u_{C1}$ ; б –  $u_{L2}$  и  $u_{C2}$ ; в –  $u_{C1}$  и  $u_{C2}$ DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.162.122.6>

Сравнение результатов, полученных в работе [9], с результатами моделирования показало не только качественное совпадение результатов, но и незначительное расхождение мгновенных значений. Таким образом, можно сделать вывод об адекватности разработанной динамической модели беспроводного зарядного устройства в SimInTech.

После оценки адекватность модели было исследовано влияние задаваемой скважности на мощность заряда аккумулятора. Сравнивались результаты моделирования с разной скважностью, а также с фильтром и без фильтра. Результаты сравнения приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Изменение параметров установки при изменении скважности

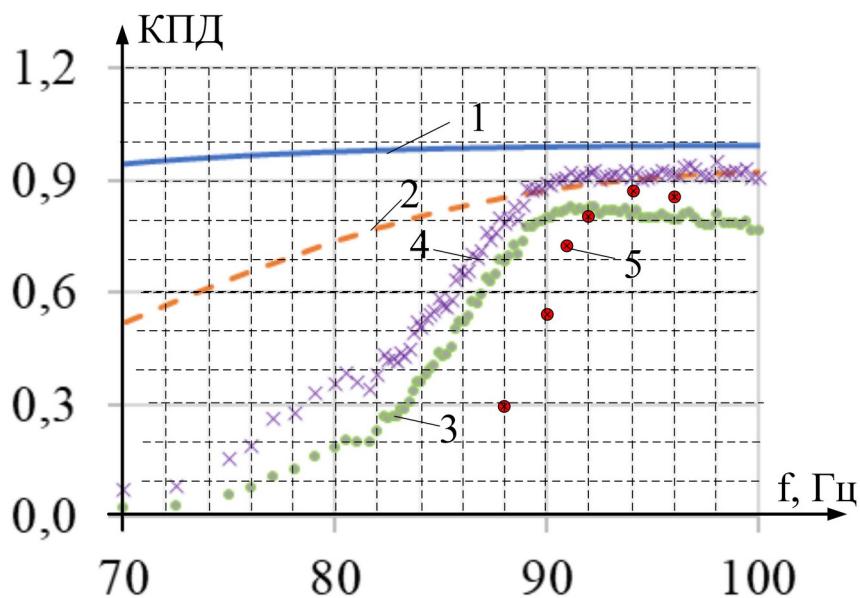
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.162.122.7>

Скважность/ фильтр	Ток цепи DC, А	Действующий ток заряда, А	Напряжение заряда, В	Мощность первичной цепи, Вт	Мощность заряда, Вт	КПД, %
0,28/нет	4,13	2,86	17,15	99,2	49,1	49,50
0,28/есть	4,22	3,33	19,995	101,4	66,62	65,5
0,5/нет	5,365	3,72	23,33	128,8	83,1	64,52
0,5/есть	5,5	4,34	26,06	131,6	113	85,87

Как видно из результатов моделирования, изменение скважности влияет на мощность заряда аккумулятора, а, следовательно, и на КПД установки. Максимальный КПД наблюдается при скважности 0,5.

В работе также было проведено сравнение экспериментальных результатов и результатов моделирования в различном частотном диапазоне. Сравнивался полученный на модели КПД системы с данными, приведенными в [9] для лабораторного образца мощностью 3,6 кВт. Были заданы следующие параметры установки: зарядное напряжение 100 В, зарядный ток 36 А,  $L_1 = 23,3 \text{ мкГн}$ ,  $L_2 = 23,1 \text{ мкГн}$ ,  $C_1 = C_2 = 0,104 \text{ мкФ}$ ,  $R_1 = 14,361 \text{ мОм}$ ,  $R_2 = 14,237 \text{ мОм}$ ,  $M = 5,9 \text{ мкГн}$ , расчетная резонансная частота составляла 90 кГц, а фактическая составила 91,3 кГц.

По результатам моделирования была построена зависимость КПД от частоты. Зависимость для сравнения была графически совмещена с экспериментальными данными. Совмещенная диаграмма приведена на рисунке 7.

Рисунок 7 - Зависимость КПД от частоты  
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.162.122.8>

Примечание: 1 – идеальная модель; 2 – модель с учетом скин-эффекта; 3 – эксперимент; 4 – эксперимент с коррекцией потерь; 5 – разработанная модель

На рисунке 7 кроме экспериментальных данных приведены также данные идеальной модели, модели с учетом скин-эффекта и экспериментальные данные без учета потерь в трансформаторе, транзисторах и диодах.

Как следует из рисунка 7 форма зависимости совпадает с экспериментальными данными, но смешена вправо и вверх. Наибольшее совпадение результатов наблюдается в области 92-100 кГц, что соответствует окрестности резонансной частоты. Следует отметить, что в указанной области результаты обладают соизмеримой точностью с моделью разработанной автором работы [9].

Моделирование также показало, что при частоте инвертора 92 кГц потери в инверторе снижают КПД установки примерно на 1%.

## Обсуждение

Рассмотренная выше модель не учитывает потери в трансформаторе, диодах выпрямителя, а также пульсации выпрямленного напряжения, однако, учитывая многократную разницу в частотах пульсаций выпрямленного напряжения и инвертора, можно предположить, что пульсации выпрямленного напряжения могут привести к медленным колебаниям напряжения и тока заряда, а, следовательно, и КПД системы. Учет потерь в трансформаторе требует моделирование хотя бы 0,04–0,06 секунды, а учитывая, что инвертор имеет частоту порядка 90–100 кГц, данный интервал соответствует минимум 72–100 тысячам шагов интегрирования.

Ввиду сложности динамической модели расчет занимает порядка 30 минут и возможны нестабильные решения из-за большого количества коммутаций, что эквивалентно разрыву функций. Поэтому составление модели с учетом трансформатора и выпрямительного звена не является рациональным.

## Заключение

В работе представлено решение актуальной инженерной задачи, позволяющей облегчить проектирование беспроводного зарядного устройства, а именно разработка динамической модели, описывающей переходные процессы и позволяющей определить КПД системы.

Основные результаты работы заключаются в следующем:

- разработана упрощенная модель беспроводного зарядного устройства в SimInTech, учитывающая процессы в инверторе и в выпрямителе находящимся в цепи заряда;
- сравнение результатов моделирования динамических процессов в беспроводном зарядном устройстве уменьшенного макета электровоза с экспериментальными данными, полученными в работах других авторах, показало высокую степень сходимости результатов моделирования с экспериментом. Максимальное расхождение составляет не более 5%;
- зависимость КПД от частоты для разработанной модели имеет форму близкую к полученной по экспериментальным данным, но смещена вправо и вверх. Наибольшее совпадение результатов наблюдается в области 92–100 кГц, что соответствует окрестности резонансной частоты. Стоит отметить, что в указанной области результаты обладают соизмеримой точностью с моделями других авторов;
- построена уточненная модель, учитывающая вольт-амперные характеристики транзисторных ключей инвертора. Модель инвертора реализована в субмодели, а в ее свойствах задаются основные параметры полупроводниковых элементов;
- моделирование беспроводного зарядного устройства с учетом влияния вольт-амперных характеристик транзисторных ключей при различных их параметрах показало увеличение потерь энергии до 1,5%.

## Конфликт интересов

Не указан.

## Рецензия

Борисов А.Н., Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ, Казань Российская Федерация  
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.162.122.9>

## Conflict of Interest

None declared.

## Review

Borisov A.N., Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI, Kazan Russian Federation  
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.162.122.9>

## Список литературы / References

1. Мещеряков Е.М. История, устройство и принцип работы беспроводного зарядного устройства. / Е.М. Мещеряков, П.С. Пономарев. // Тенденции развития современной науки: сборник трудов научно-практической конференции студентов и аспирантов Липецкого государственного технического университета; под ред. Ивановской И. И. — Липецк: Липецкий государственный технический университет, 2023. — С. 843–846.
2. Гарист Е.А. Беспроводная передача электроэнергии. / Е.А. Гарист, Н.Р. Деркач. // Актуальные проблемы энергетики — 2021: Материалы студенческой научно-технической конференции; под ред. Пономаренко Е. Г. — Минск: Белорусский национальный технический университет, 2021. — С. 566–568.
3. Пантелеев В.И. Обзор схемотехники силовой электроники беспроводного зарядного устройства для электротранспорта. / В.И. Пантелеев, А.С. Амузаде, В.В. Шевченко. // Борисовские чтения: Материалы IV Всероссийской научно-технической конференции с международным участием; — Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2024. — С. 118–122.
4. Калугин В.В. Беспроводное зарядное устройство для электромобилей. / В.В. Калугин, Д.С. Желнин, И.В. Калугина // Школа Науки. — 2021. — № 12 (49). — С. 9–10.
5. Лу С. Технологии беспроводной зарядки. Часть 1. Теоретические основы и способы аппаратной реализации. / С. Лу, П. Ванг, Д. Ниято // Беспроводные технологии. — 2017. — № 3 (48). — С. 56–64.
6. Лу С. Технологии беспроводной зарядки. Часть 2. Стандарты и их реализация. / С. Лу, П. Ванг, Д. Ниято // Беспроводные технологии. — 2017. — № 4 (49). — С. 37–43.
7. Завьялов В.М. Испытания прототипа системы беспроводного заряда аккумуляторов электротележки. / В.М. Завьялов, Е.А. Дубков, А.С. Велиляев и др. // Энергетика и энергосбережение: теория и практика : Сборник материалов VI Всероссийской научно-практической конференции памяти доктора технических наук, профессора В.Г. Каширских в рамках проведения Года науки и технологий в Российской Федерации и празднования 300-летия

Кузбасса; под ред. Беляевский Р. В., Лобур И. А. — Кемерово: Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 2022. — С. 312-1–312-6.

8. Завьялов В.М. Система беспроводного заряда аккумуляторов для рудничного электровоза. / В.М. Завьялов, И.Ю. Семыкина, Е.А. Дубков и др. // Записки Горного института. — 2023. — 261. — С. 428–442.

9. Дубков Е.А. Обоснование применимости систем беспроводного заряда для шахтного аккумуляторного электротранспорта dis.. ...Candidate of Technical Sciences: 2.4.2 - Электротехнические комплексы и системы : защищена 2023-12-22 : утв. 2024-02-26 / Е.А. Дубков. — Кемерово: 2023. — 177 с.

10. Нааянан Р. Выбор катушек для беспроводных зарядных устройств. / Р. Нааянан, В. Рентюк // Компоненты и технологии. — 2015. — № 9 (170). — С. 26–32.

11. Куркова О.П. Численное компьютерное моделирование и оптимизация схемотехнических решений бесконтактных зарядных устройств для электроприводных транспортных средств. / О.П. Куркова, В.В. Ефимов // Системы управления, связи и безопасности. — 2019. — № 3. — С. 64–88.

12. Золотарев А.В. Синтез имитационной модели связанных катушек в системе беспроводной зарядки электрического транспорта. / А.В. Золотарев, Г.В. Демидова, А.С. Цыринова и др. // Электротехника. — 2024. — 1. — С. 80–86. — URL: [https://elibrary.ru/download/elibrary\\_59938800\\_66087624.pdf](https://elibrary.ru/download/elibrary_59938800_66087624.pdf) (дата обращения: 25.08.25). — DOI: 10.53891/00135860\_2024\_1\_80

13. Гилемханов Т.Ф. Автоматизированный стенд для измерения параметров источников электропитания. / Т.Ф. Гилемханов, Р.Ф. Гибадуллин // Международный научно-исследовательский журнал. — 2024. — 10(148). — URL: <https://research-journal.org/archive/10-148-2024-october/10.60797/IRJ.2024.148.70> (дата обращения: 25.08.25). — DOI: 10.60797/IRJ.2024.148.70

### Список литературы на английском языке / References in English

1. Meshheryakov E.M. Istorija, ustrojstvo i princip raboty' besprovodnogo zaryadnogo ustrojstva [History, device and principle of operation of a wireless charger]. / E.M. Meshheryakov, P.S. Ponomarev. // Trends in the development of modern science: Proceedings of the Scientific and Practical Conference of students and postgraduates of Lipetsk State Technical University; edited by Ivanovskaya I. I. — Lipeczk: Lipeczkij gosudarstvennyj texnicheskij universitet, 2023. — P. 843–846. [in Russian]

2. Garist E.A. Besprovodnaya peredacha e'lektroe'nergii [Wireless transmission of electricity]. / E.A. Garist, N.R. Derkach. // Current Problems of Energy — 2021: Materials of the Student Scientific and Technical Conference; edited by Ponomarenko E. G. — Minsk: Belorusskij nacional'nyj texnicheskij universitet, 2021. — P. 566–568. [in Russian]

3. Pantaleev V.I. Obzor sxemotexniki silovoj e'lektroniki besprovodnogo zaryadnogo ustrojstva dlya e'lektrotransporta [Review of circuit design of power electronics of a wireless charger for electric vehicles]. / V.I. Pantaleev, A.S. Amuzade, V.V. Shevchenko. // Borisov readings: Proceedings of the IV All-Russian Scientific and Technical Conference with international participation; — Krasnoyarsk: Sibirskij federal'nyj universitet, 2024. — P. 118–122. [in Russian]

4. Kalugin V.V. Besprovodnoe zaryadnoe ustrojstvo dlya e'lektromobilej [Wireless charger for electric vehicles]. / V.V. Kalugin, D.S. Zhelnin, I.V. Kalugina // School of Science. — 2021. — № 12 (49). — P. 9–10. [in Russian]

5. Lu S. Texnologii besprovodnoj zaryadki. Chast' 1. Teoreticheskie osnovy' i sposoby' apparatnoj realizacii [Wireless Charging Technologies. Part 1. Theoretical Foundations and Hardware Implementation Methods]. / S. Lu, P. Vang, D. Niyato // Wireless Technologies. — 2017. — № 3 (48). — P. 56–64. [in Russian]

6. Lu S. Texnologii besprovodnoj zaryadki. Chast' 2. Standarty' i ix realizaciya [Wireless Charging Technologies. Part 1. Theoretical Foundations and Hardware Implementation Methods]. / S. Lu, P. Vang, D. Niyato // Wireless Technologies. — 2017. — № 4 (49). — P. 37–43. [in Russian]

7. Zav'yalov V.M. Isp'yaniya prototipa sistemy' besprovodnogo zaryada akkumulyatorov e'lektrotelezhki [Testing of a Prototype of a Wireless Charging System for Electric Trolleys]. / V.M. Zav'yalov, E.A. Dubkov, A.S. Velilyaev et al. // Energy and Energy Saving: Theory and Practice: Collection of Materials of the VI All-Russian Scientific and Practical Conference in Memory of Doctor of Technical Sciences, Professor V.G. Kashirskikh, held as part of the Year of Science and Technology in the Russian Federation and the celebration of the 300th Anniversary of Kuzbass; edited by Belyaevskij R. V., Lobur I. A. — Kemerovo: Kuzbasskij gosudarstvennyj texnicheskij universitet imeni T.F. Gorbacheva, 2022. — P. 312-1–312-6. [in Russian]

8. Zav'yalov V.M. Sistema besprovodnogo zaryada akkumulyatorov dlya rudnichnogo e'leketrovoza [Wireless Battery Charging System for Mine Electric Locomotives]. / V.M. Zav'yalov, I.Yu. Semy'kina, E.A. Dubkov et al. // Notes of the Mining Institute. — 2023. — 261. — P. 428–442. [in Russian]

9. Dubkov E.A. Obosnovanie primenimosti sistem besprovodnogo zaryada dlya shaxtnogo akkumulyatornogo e'lektrotransporta [Justification of the Applicability of Wireless Charge Systems for Mine Battery Electric Vehicles: Dissertation for the Degree of Candidate of Technical Sciences] dis....of PhD in : 2.4.2 - Электротехнические комплексы и системы : defense of the thesis 2023-12-22 : approved 2024-02-26 / Е.А. Дубков. — Кемерово: 2023. — 177 p. [in Russian]

10. Narayanan R. Vy'bor katushek dlya besprovodnyx zaryadnyx ustrojstv [Selection of Coils for Wireless Chargers]. / R. Narayanan, V. Rentyuk // Components and Technologies. — 2015. — № 9 (170). — P. 26–32. [in Russian]

11. Kurkova O.P. Chislennoe kompyuternoe modelirovanie i optimizaciya sxemotexnicheskix reshenij beskontaktnyx zaryadnyx ustrojstv dlya e'lektroprivodnyx transportnyx sredstv [Numerical computer modeling and optimization of circuit solutions of contactless charging devices for electric vehicles]. / O.P. Kurkova, V.V. Efimov // Control, communication and security systems. — 2019. — № 3. — P. 64–88. [in Russian]

12. Zolotarev A.V. Sintez imitacionnoj modeli svyazannyx katushek v sisteme besprovodnoj zaryadki e'lektricheskogo transporta [Synthesis of a simulation model of coupled coils in an electric vehicle wireless charging system]. / A.V. Zolotarev, G.V. Demidova, A.S. Cy'rinova et al. // Russian Electrical Engineering. — 2024. — 1. — P. 80–86. — URL:

[https://elibrary.ru/download/elibrary\\_59938800\\_66087624.pdf](https://elibrary.ru/download/elibrary_59938800_66087624.pdf) (accessed: 25.08.25). — DOI: 10.53891/00135860\_2024\_1\_80 [in Russian]

13. Gilemhanov T.F. Avtomatizirovannyj stend dlya izmereniya parametrov istochnikov elektrichestvennoj energii [Automated test bench for measuring power supply parameters]. / T.F. Gilemhanov, R.F. Gibadullin // International Research Journal. — 2024. — 10(148). — URL: <https://research-journal.org/archive/10-148-2024-october/10.60797/IRJ.2024.148.70> (accessed: 25.08.25). — DOI: 10.60797/IRJ.2024.148.70 [in Russian]