

Рубрика 1. ТЕХНОЛОГИИ И ПРОЕКТЫ

Направление – Электротехнические комплексы и системы

<https://doi.org/10.17816/transsyst630045>

© А.А. Лисов, С.А. Панишев

Южно-Уральский государственный университет  
(Челябинск, Россия)

## RFID ИДЕНТИФИКАЦИЯ КАК ДОПОЛНЕНИЕ СИСТЕМЫ БЕСПРОВОДНОЙ ЗАРЯДКИ ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

**Цель.** Проведение обзора существующих методов беспроводной зарядки электротранспортных средств, а также предложение наиболее оптимального варианта для реализации идентификации транспортного средства с помощью RFID для автоматизированной, безопасной и удобной авторизации и оплаты владельцами электромобилей в процессе зарядки.

**Материалы и методы.** Для определения наиболее оптимального варианта реализации системы беспроводной зарядки был проведен анализ современных исследований в данной области. На основании этого анализа для выбранной системы индуктивной зарядки было предложено расширить стандартный функционал зарядки с помощью контроллера серии «STWBC Qi» для интеграции RFID и других датчиков.

**Результаты.** Существует 4 основных типа систем беспроводной зарядки: индуктивная передача энергии, емкостная передача энергии, зарядка на основе вращающихся постоянных магнитов, способ передачи энергии с использованием микроволнового излучения и радиоволн. Индукционный метод является наиболее эффективным среди указанных выше. Беспроводные зарядные устройства также могут быть оснащены специальной системой RFID-идентификации для автоматизации процесса оплаты.

**Заключение.** Беспроводная зарядка является лучшей альтернативой традиционным проводным системам зарядки в городских условиях, поскольку парковочные места не заняты дополнительной инфраструктурой, необходимой для проводной зарядки. Индуктивные зарядные станции являются наиболее предпочтительным вариантом с точки зрения параметров: цена – производительность – качество. Контроллер серии «STWBC Qi» не только обеспечивает интеграцию RFID-идентификации, а также является ключевым компонентом для управления системой индуктивной беспроводной зарядки.

**Ключевые слова:** беспроводная передача энергии; электромобили; RFID; STM.

### Как цитировать:

Лисов А.А., Панишев С.А. RFID идентификация как дополнение системы беспроводной зарядки электротранспортных средств // Инновационные транспортные системы и технологии. 2024. Т. 10. № 2. С. 171–187. doi: 10.17816/transsyst630045

## Section 1. TECHNOLOGY AND PROJECTS

Subject – Electrotechnical complexes and systems

© A.A. Lisov, S.A. Panishev

South Ural State University

(Chelyabinsk, Russia)

## RFID IDENTIFICATION AS AN ADDITION WIRELESS CHARGING SYSTEMS FOR ELECTRIC VEHICLES

**Aim:** The aim of this study is to review existing methods for wireless charging of electric vehicles and propose the most optimal option for implementing vehicle identification using RFID. This will ensure automated, secure, and convenient authorization and payment of electric vehicle owners during the charging process.

**Materials and Methods.** To determine the most optimal wireless charging system, we conducted an analysis of modern research in this field. Based on this analysis, we selected inductive charging as the preferred method and proposed enhancing its standard functionality by integrating RFID and other sensors using the STWBC Qi series controller.

**Results.** There are four main types of wireless charging systems: inductive energy transfer, capacitive energy transfer, rotating permanent magnet charging, and microwave and radio wave energy transfer methods. Among these, the induction method is the most effective. Additionally, wireless chargers can be equipped with a special RFID system to automate the payment process.

**Conclusion.** Wireless charging offers a superior alternative to traditional wired charging systems in urban environments as it eliminates the need for additional infrastructure that occupies parking spaces. Inductive charging stations are the most preferable option when considering parameters such as price, performance, and quality. The “STWBC Qi” series controller not only facilitates RFID integration but also serves as a key component for controlling the inductive wireless charging system.

**Keywords:** wireless power transfer; electric vehicles; RFID; STM.

### To cite this article:

Lisov AA, Panishev SA. RFID as an addition of wireless charging systems for electric vehicles. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2024;10(2):171–187. doi: 10.17816/transsyst630045

## ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день наблюдается устойчивая тенденция к развитию электротранспорта по всему миру. Не последнюю роль в этом играет развитие литиевых батарей [1]. Ожидается, что в будущем электротранспорт и дальше будет развиваться и распространяться, поскольку он играет ключевую роль в снижении выбросов вредных веществ и уменьшении зависимости от ископаемых топлив, а также является наиболее подходящей платформой для развития автономного транспорта.

В тоже время транспортный сектор оказывает наибольшее воздействие на окружающую среду и является одним из крупнейших потребителей энергии. На его долю приходится более 20% потребления [2]. Растущее присутствие электромобилей (ЭМ) на улицах заметно повлияло на электрические сети [3]. Преобладающий метод зарядки большинства существующих электромобилей, как дома, так и в дороге, предполагает зарядку по кабелю.

Однако, этот подход требует физического подключения кабелей к электромобилям, что является потенциально опасной задачей, особенно при неблагоприятных погодных условиях. Кроме того, следует принять во внимание, что искрение при подключении и отключении кабелей значительно ограничивает использование электромобилей в определенных ситуациях, таких как близость к заправочным станциям и аэропортам. Решением указанных проблем является беспроводная зарядка. Первые эксперименты по беспроводной передаче энергии (БПЭ) провел Никола Тесла в конце XIX века [4, 5]. История развития методов беспроводной передачи энергии кратко отражена в [6]. БПЭ — это процесс передачи мощности из одной цепи в другую без использования каких-либо подключенных проводящих элементов.

Предложенная нами идея автоматизации идентификации при помощи RFID-меток при зарядке электромобиля заключается в использовании технологии RFID для безопасной и удобной идентификации владельцев электромобилей в процессе зарядки. Каждый владелец электромобиля имеет уникальную RFID-метку, которая идентифицирует его в системе. При подъезде к зарядной станции владелец прикладывает метку к считывателю RFID, который автоматически распознает его и разрешает доступ к зарядной станции. Это обеспечивает безопасность и контроль доступа, предотвращает несанкционированное использование зарядных станций и облегчает процесс зарядки и оплаты для владельцев электромобилей.

## 1. МЕТОДЫ БЕСПРОВОДНОЙ ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ

Прежде, чем приступить к реализации системы идентификации транспортных средств посредством RFID-меток следует рассмотреть существующие методы беспроводной передачи энергии и выбрать из них наиболее оптимальный, на базе которого будет осуществляться идея, описанная ранее. Классические методы беспроводной зарядки можно разделить на емкостную передачу энергии (ЕПЭ) и индуктивную передачу энергии (ИПЭ), среди них индуктивная передача энергии обычно считается более выгодным вариантом беспроводной зарядки [7–9]. Кроме этих вариантов есть еще и альтернативные электромагнитные и механические варианты: зарядка на основе вращающихся постоянных магнитов и способ передачи энергии с использованием микроволнового излучения и радиоволн.

### 1.1. Емкостная передача энергии (ЕПЭ)

В этом случае, система беспроводной зарядки ЕПЭ использует электрическое поле для передачи электроэнергии с минимальными потерями мощности, когда электрическое поле проходит через электрически изолированные металлические барьеры [10]. Мощность передается с помощью конденсаторов, изготовленных из металлических пластин, которые значительно дешевле катушек индуктивности.

Точное выравнивание между транспортным средством и зарядной площадкой имеет первостепенное значение в настройке зарядки с емкостной передачей энергии [11]. В этой установке используются четыре металлические пластины, которые образуют две емкостные связи для передачи энергии. Ориентация этих пластин может быть горизонтальной или вертикальной, в зависимости от конкретного применения. Система зарядки ЕПЭ особенно хорошо подходит для сценариев, связанных с короткими расстояниями и низкими требованиями к мощности [12].

Вместе с тем, расстояние между зарядной площадкой и транспортным средством обычно ограничено всего 1 мм, что снижает диапазон применения системы зарядки ЕПЭ. Топологию схемы ЕПЭ можно разделить на резонансную и нерезонансную. В нерезонансной топологии для процесса преобразования используется широтно-импульсная модуляция (ШИМ), а конденсатор связи действует как элемент накопления энергии, обеспечивая стабильное питание схемы. С другой стороны, резонансная топология включает преобразователь класса «Е» и последовательный

резонансный преобразователь, в которой конденсатор связи резонирует вместе с дросселем [13].

### **1.2. Беспроводная зарядка на основе вращающихся постоянных магнитов**

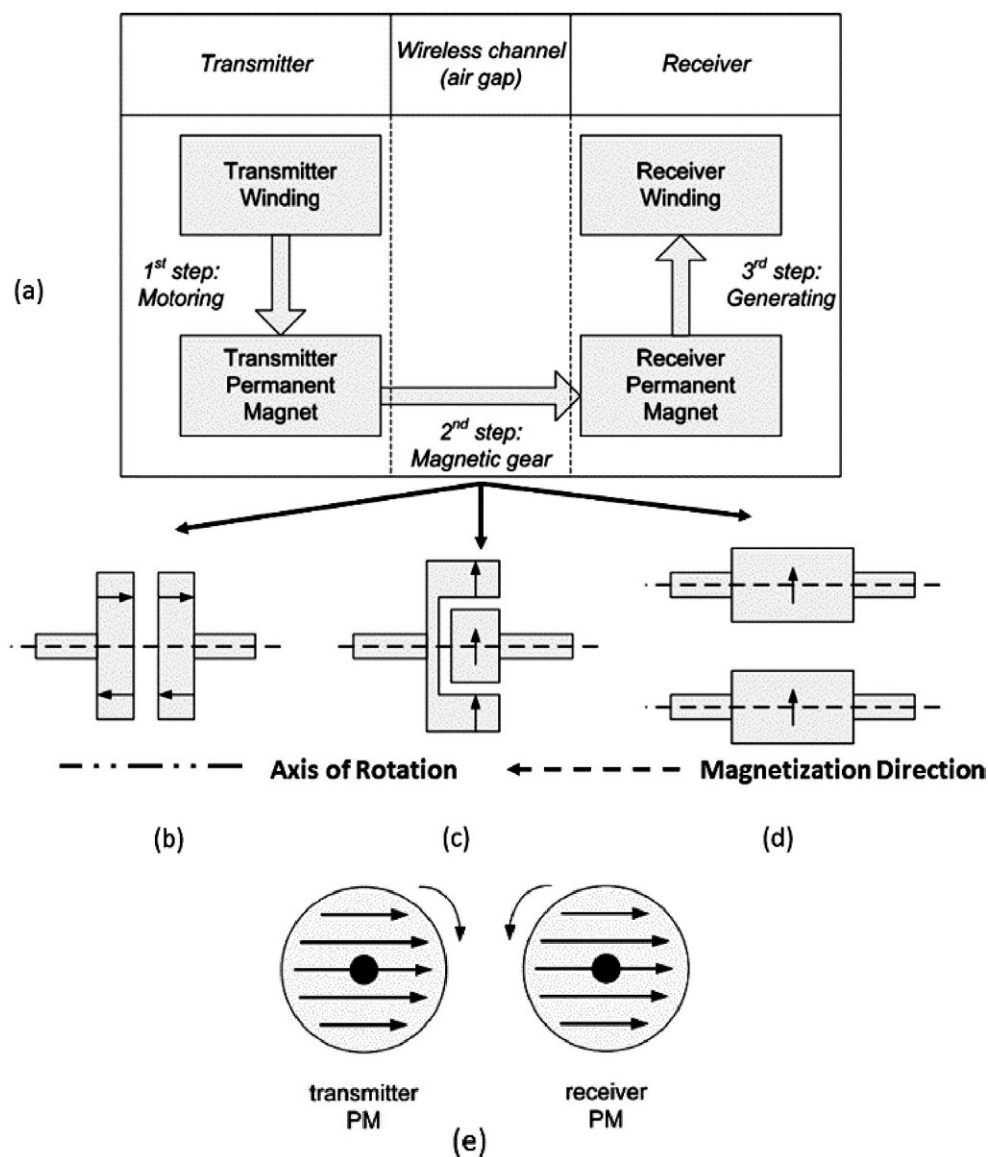
В университете Британской Колумбии разработан метод, использующий эффект магнитной передачи, при котором неодимовый постоянный магнит действует как магнитная муфта [14]. Ротор первичной стороны, намагниченный постоянным магнитом, вращает вторичный ротор с той же синхронной скоростью. Чович и др. [15] создали прототип с беспроводной системой передачи энергии на основе данной системы, достигнув эффективности 81% при передаче мощности на расстояние более 150 мм и частоте 150 Гц.

В исследовании [14] представлена диаграмма потока энергии (показанная на Рис. 1), иллюстрирующая механизм беспроводной передачи энергии и его реализацию. В указанном исследовании, кроме того, предложены три типа магнитной передачи, на Рис. 1(е) показана ориентация магнитного механизма. В случае передачи большой мощности муфта требует магнита большого размера, что значительно удорожает конструкцию.

Важно отметить, что эта система имеет ряд ограничений, в том числе, вибрации и шум, создаваемые ее механическими компонентами. Еще одним существенным недостатком является необходимость точного выравнивания и постоянного обслуживания механики. Следовательно, этот подход непригоден для зарядки электромобилей из-за его крупногабаритной конструкции, низкой эффективности, механического вращения и других связанных с этим факторов.

### **1.3. Беспроводная зарядка с использованием микроволнового излучения и радиоволн.**

Впервые способ беспроводной зарядки с использованием микроволнового излучения и радиоволн был применен в 1904 году Николой Тесла, который осуществил передачу энергии с помощью радиоволн частотой 150 кГц. Браун, в своём исследовании [6], изобрел и продемонстрировал БПЭ, управляя беспроводным вертолетом без батареи в 1964 году, используя магнетрон с частотой 2,45 ГГц. Дикинсон [15] добился передачи энергии с помощью микроволнового излучения на расстояние 1,6 км на частоте 2,45 ГГц и мощностью передачи 450 кВт в Голдстоуне, США, используя параболическую антенну и клистрон.



**Рис. 1.** Ориентация магнитного механизма для системы БПЭ (а) поток мощности; (б) роторы с аксиальным намагничиванием; (с) роторы с радиальным намагничиванием; (д) параллельные оси вращения (пунктирные линии) с радиально намагниченными роторами [14]

**Fig. 1.** Magnetic gear orientation for the WPT system (a) Power flow; (b) Axially magnetized rotors; (c) Radially magnetized rotors; (d) Parallel axes of rotation (dotted lines) with radially magnetized rotors [14]

После 1980-х годов исследования БПЭ получили импульс в контексте спутников солнечной энергии в Японии [16], при этом, значительную роль сыграл Киотский университет. Синохара [17], сотрудничающий с Киотским университетом, проводил исследования различных приложений микроволновых волн для коммерческих целей. Сотрудничая с Nissan Motors в период с 2003 по 2008 год, Синохара [17] разработал систему передачи энергии для зарядки электромобилей, в процессе движения по дороге, на частоте 2,45 ГГц [18]. В системе использовались щелевые антенны и магнетрон для снижения затрат, достигая эффективности зарядки аккумулятора на уровне 76%. Для дальнейшего повышения эффективности и сокращения времени зарядки они ввели диод Шоттки из нитрида галлия для выпрямления мощности.

Несмотря на то, что такая система зарядки и показала себя довольно хорошо, стоит отметить сложность ее применения в реальных условиях и, самое главное, ее дороговизну. Все ранее представленные способы зарядки электромобилей так или иначе не подходят для массового внедрения. Поэтому наиболее оптимальным и, как следствие, самым популярным в реализации на практике с точки зрения затрат, допустимого расстояния от зарядного устройства и простоты использования является индукционный способ зарядки [19].

#### 1.4. Индукционная передача энергии

В 1999 году Сакамото и его коллеги [20] представили новый индуктивный способ передачи энергии, который достиг КПД 97% при выходной мощности 8,3 кВт через воздушный зазор 3 мм на частоте 100 кГц. В настоящее время индуктивная зарядка эффективна на коротких расстояниях, обычно в районе десятка сантиметров. Небольшие электронные устройства можно заряжать по беспроводной сети с воздушным зазором в несколько метров, но по мере увеличения требований к мощности передача энергии становится значительно сложнее [21].

Если необходимо зарядить мощное устройство, то следует использовать одно- или трехфазную систему зарядки [22]. Индуктивная передача энергии (ИПЭ) в настоящее время является основным методом беспроводной зарядки электромобилей [23, 24]. Система ИПЭ работает на принципе электромагнитной индукции, который является тем же принципом, который используется в трансформаторах для передачи мощности от первичной катушки к вторичной обмотке. Эффективность

передачи мощности в системе ИПЭ можно повысить за счет использования резонанса [25]. Электромобили можно заряжать как в неподвижном состоянии, так и в движении [25].

Система индуктивной беспроводной зарядки состоит из двух основных компонентов: передатчика, расположенного на подземной зарядной станции, и приемника, встроенного в электромобиль (см. Рис. 2). На функциональной схеме индукционного зарядного устройства, представленного на Рис. 2,  $V_{in}$  представляет входное напряжение постоянного тока.  $L_1$  и  $L_2$  обозначают индуктивность обмоток передатчика и приемника, а  $M$  представляет собой взаимную индуктивность между ними.  $C_1$  и  $C_2$  используются для обозначения компенсирующих конденсаторов. Следует отметить, что резисторы  $r_1$  и  $r_2$  обозначают совокупные потери катушек передатчика и приемника, включая потери в меди индуктивности и потери эквивалентного последовательного сопротивления (ESR) конденсаторов. Наконец,  $V_o$  обозначает напряжение зарядки.

Сторона передатчика включает в себя: преобразователь постоянного тока, инвертор, работающий на резонансной частоте установки беспроводной передачи энергии для минимизации рассеиваемой мощности [26], и блок управления для регулирования работы инвертора. На стороне приемника имеется выпрямитель и встроенное зарядное устройство, которое служит мостом между системой беспроводной передачи энергии и аккумулятором. Бортовое зарядное устройство отвечает за управление профилем зарядки аккумулятора электромобиля.

Функциональную схему можно обозначить эквивалентной электрической схемой, представленной на Рис. 3. Источник синусоидального напряжения передатчика,  $V_{inv}$ , отражает основную составляющую

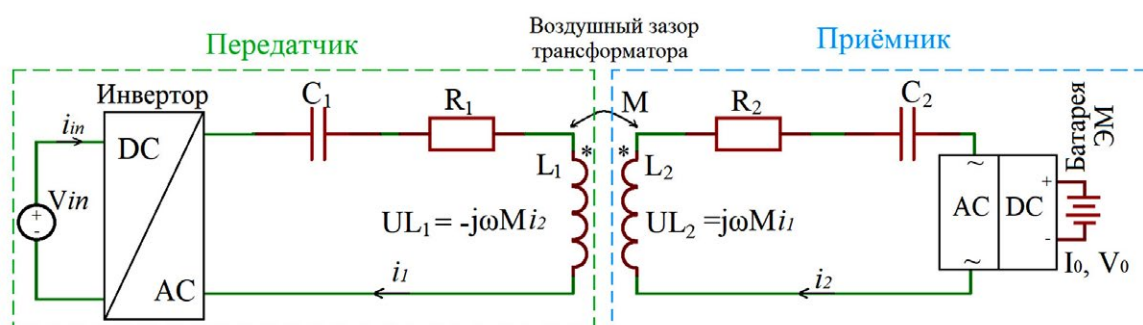
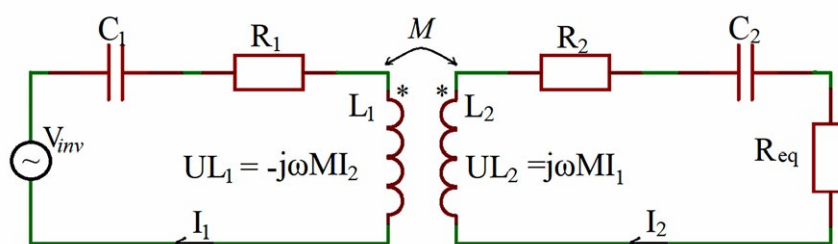


Рис. 2. Схема индукционного зарядного устройства (составлено авторами)

Fig. 2. Induction charger circuit



**Рис. 3.** Эквивалентная схема индукционного зарядного устройства  
(составлено авторами)

**Fig 3.** Equivalent circuit of induction charger

выходного напряжения высокочастотного инвертора.  $I_1$  и  $I_2$  обозначают основные составляющие тока на концах передатчика и приемника соответственно. Нагрузку аккумулятора в сочетании со встроенным зарядным устройством (одноступенчатым или двухступенчатым) можно адекватно смоделировать, используя эквивалентное сопротивление  $R_{eq}$ .

## 2. ИНТЕГРАЦИЯ RFID В СИСТЕМУ БЕСПРОВОДНОЙ ЗАРЯДКИ ПРИ ПОМОЩИ МИКРОКОНТРОЛЛЕРА СЕРИИ STM

В последние годы технология радиочастотной идентификации (RFID) получила широкое распространение в различных приложениях. RFID – удобное средство передачи информации. Другие преимущества включают длительный срок службы, доступность, а также возможность повторного использования и переработки [27]. RFID-метки состоят из микрочипа и антенны, которые обмениваются данными со считывателем по беспроводной сети.

RFID-метки можно разделить на пассивные и активные. Пассивные RFID-карты работают на частоте 125 кГц и используют энергию магнитного поля, создаваемого модулем считывания. Эта мощность используется для подачи питания в цепи микрочипа, обеспечивая передачу информации обратно к считывателю.

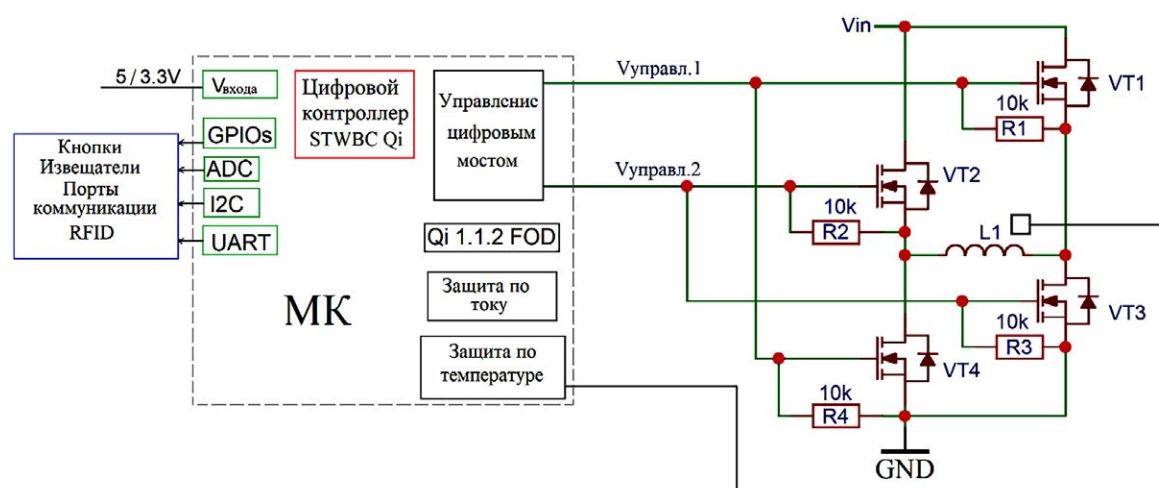
Активные RFID-метки требуют отдельного источника питания и могут вмещать до 1 МБ памяти для чтения/записи. Каждая RFID-карта имеет уникальный идентификатор, который может быть расшифрован RFID-считывателем. Например, RFID-считыватель EM-18 работает на частоте 125 кГц и питается от источника питания 5 В. Он обеспечивает как последовательный выход, так и выход Weigand и охватывает диапазон около 8–12 см. Данные, создаваемые RFID-считывателем EM-18, имеют

12-значный формат ASCII, где первые 10 цифр обозначают номер карты, а последние две цифры являются результатом вычисления XOR, используемого для проверки ошибок.

RFID можно подключить к микроконтроллеру STM в несколько этапов:

- Выбрать RFID-модуль, совместимый с микроконтроллером STM32. Доступны различные типы модулей RFID, например, RC522 и PN532.
- Подключить RFID-модуль к микроконтроллеру STM, используя соответствующие контакты. Модуль RFID обычно имеет контакты для питания, заземления, ввода и вывода данных.
- Настроить микроконтроллер STM для связи с RFID-модулем. Это предполагает программирование микроконтроллера для отправки команд RFID-модулю и получения от него данных. Мы можем использовать интерфейс SPI, I<sup>2</sup>C или UART для связи с модулем RFID, в зависимости от протокола связи модуля.
- Написать код интерфейса для связи с RFID-модулем, его инициализации, отправки команд и получения данных.

Например, контроллер «STWBC Qi» можно использовать в качестве управляющего устройства для беспроводной передачи энергии посредством магнитной индукции (см. Рис. 4). Кроме того, его наличие упрощает подключение RFID-приемника, датчиков температуры, тока, устройств защиты и иных средств связи для передачи данных с возможностью



**Рис. 4.** Функциональная схема индукционной зарядки на примере STWBC Qi  
(составлено авторами)

**Fig. 4.** Functional diagram of induction charging based on STWBC Qi

производства вычислений в облачных сервисах, проще говоря внедриться в IoT-систему целого города.

Функциональная схема на Рис. 4 дает обзор ключевых компонентов «STWBC Qi» и того, как они взаимодействуют для обеспечения беспроводной зарядки в соответствии со стандартом Qi. Разбивку его основных элементов можно представить в следующем виде:

1. Управление входной мощностью. Этот раздел управляет подачей питания на передатчик. Он может включать в себя такие компоненты, как выпрямители, регуляторы напряжения и фильтры, чтобы обеспечить стабильную подачу электроэнергии в остальную часть системы.
2. Блок микроконтроллера (МК). Он служит мозгом передатчика, координируя различные функции и процессы. Он может контролировать поток энергии, управлять связью с приемным устройством, отслеживать состояние зарядки и реализовывать функции безопасности.
3. Интерфейс связи. Это позволяет передатчику взаимодействовать с приемным устройством по протоколу Qi. Он выполняет такие задачи, как обнаружение устройств, согласование уровней мощности и обмен данными, связанными с состоянием и параметрами зарядки.
4. Схема драйвера катушки. Эта секция приводит в действие катушку(и) передатчика для создания переменного магнитного поля, необходимого для беспроводной передачи энергии. Обычно он включает в себя усилители мощности и схемы управления для регулировки частоты и амплитуды передаваемого сигнала.
5. Обратная связь и контуры управления. Эти контуры постоянно контролируют процесс зарядки и при необходимости корректируют параметры для оптимизации эффективности и обеспечения безопасной работы. Обратная связь может исходить от датчиков, измеряющих такие факторы, как температура катушки, напряжение и ток.
6. Механизмы защиты. В передатчике реализованы различные функции защиты для предотвращения перезаряда, перегрева, короткого замыкания и других потенциально опасных условий. К ним могут относиться датчики температуры, ограничители тока и мониторы напряжения.
7. Пользовательский интерфейс (например, через UART). Некоторые передатчики включают элементы пользовательского интерфейса,

такие как кнопки или сенсорные элементы управления для ручного взаимодействия. Они могут позволить пользователям инициировать зарядку, изменять настройки или выполнять другие действия.

В целом функциональная схема Qi Transmitter STWBC иллюстрирует, как он сочетает в себе аппаратные и программные компоненты для обеспечения эффективной и надежной беспроводной зарядки в соответствии со стандартом Qi.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Индуктивные зарядные станции являются наиболее предпочтительным вариантом, поскольку площадь приема и передачи электрической энергии измеряется несколькими сантиметрами, что достаточно для преодоления воздушного зазора между поверхностью дороги и днищем автомобиля, где потенциально может располагаться приемник.

С другой стороны, было показано, что емкостная беспроводная зарядка не подходит для зарядки электромобилей из-за требуемого минимального воздушного зазора (несколько миллиметров) и высоких требований к расположению пластин конденсатора.

Результаты исследования продемонстрировали, что контроллер серии «STWBC Qi» не только обеспечивает интеграцию RFID-идентификации, но также является ключевым компонентом для управления системой индуктивной беспроводной зарядки.

### Авторы заявляют что:

1. У них нет конфликта интересов;
2. Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей в качестве объектов исследований.

### The authors state that:

1. They have no conflict of interest;
2. This article does not contain any studies involving human subjects.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Возмилов А.Г., Панишев С.А., Лисов А.А. Исследование и математическое моделирование литий-ионного аккумулятора // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2022. Т. 22, №. 2. С. 30–36. EDN: OJAEVM doi: 10.14529/power220203
2. Heubbaum H., Biermann F. Integrating global energy and climate governance: The changing role of the International Energy Agency // Energy Policy. 2015. Vol. 87. P. 229–239. doi: 10.1016/j.enpol.2015.09.009

3. Sachan S., Adnan N. Stochastic charging of electric vehicles in smart power distribution grids // *Sustainable cities and society*. 2018. Vol. 40. P. 91–100. doi: 10.1016/j.scs.2018.03.031
4. Tesla N. Experiments with alternate currents of very high frequency and their application to methods of artificial illumination // *Trans. Am. Inst. Electr. Eng.* 1891. Vol. 8, N. 1. P. 266–319.
5. Patent U.S.A. 1119732. 1914. Tesla N. Apparatus for transmitting electrical energy. Accessed: 23.07.2023. Available from: <https://patentimages.storage.googleapis.com/8a/95/f3/1b1780c6941fb9/US1119732.pdf>
6. Brown W.C. The history of power transmission by radio waves // *IEEE Transactions on microwave theory and techniques*. 1984. Vol. 32, N. 9. P. 1230–1242. doi: 10.1109/TMTT.1984.1132833
7. Dai J., Ludois D.C. A survey of wireless power transfer and a critical comparison of inductive and capacitive coupling for small gap applications // *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2015. Vol. 30, N. 11. P. 6017–6029. doi: 10.1109/TPEL.2015.2415253
8. Wang Y., Dongye Z., Zhang H., et al. A domino-type load-independent inductive power transfer system with hybrid constant-current and constant-voltage outputs. // *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2021. Vol. 36, N. 8. P. 8824–8834. doi: 10.1109/TPEL.2021.3055363
9. Mahesh A., Chokkalingam B., Mihet-Popa L. Inductive wireless power transfer charging for electric vehicles—a review. *IEEE access*. 2021; 9:137667–713. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3116678
10. Mostafa T.M., Muharam A., Patrick Hu.A., Hattori R. Improved CPT system with less voltage stress and sensitivity using a step-down transformer on receiving side // *IET Power Electronics*. 2018. Vol. 12, N. 10. P. 2634–2641. doi: 10.1049/iet-pel.2018.6206
11. Luo B., Mai R., Guo L., et al. LC–CLC compensation topology for capacitive power transfer system to improve misalignment performance // *IET Power Electronics*. 2019. Vol. 12, N. 10. P. 2626–2633. doi: 10.1049/iet-pel.2018.5606
12. Pardo-Bosch F., Pujadas P., Morton C., Cervera C. Sustainable deployment of an electric vehicle public charging infrastructure network from a city business model perspective // *Sustainable Cities and Society*. 2021. Vol. 71. P. 102957. doi: 10.1016/j.scs.2021.102957
13. Vu V.B., Dahidah M., Pickert V., Phan V.T. An improved LCL-L compensation topology for capacitive power transfer in electric vehicle charging // *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 27757–27768. doi: 10.1109/ACCESS.2020.2971961
14. Li W. High efficiency wireless power transmission at low frequency using permanent magnet coupling [dissertation]. University of British Columbia, 2009. doi: 10.14288/1.0067661
15. Dickinson R.M. Performance of a high-power, 2.388-GHz receiving array in wireless power transmission over 1.54 km. In: *IEEE-MTT-S International Microwave Symposium*. 1976. P. 139–141. doi: 10.1109/MWSYM.1976.1123672

16. Matsumoto H. Research on solar power satellites and microwave power transmission in Japan // IEEE microwave magazine. 2002. Vol. 3, N. 4. P. 36–45. doi: 10.1109/MMW.2002.1145674
17. Shinohara N. Wireless power transmission progress for electric vehicle in Japan. In: IEEE Radio and Wireless Symposium. 2013. P. 109–111. doi: 10.1109/RWS.2013.6486657
18. Shinohara N. Beam efficiency of wireless power transmission via radio waves from short range to long range // Journal of the Korean Institute of Electromagnetic and Science. 2010. Vol. 10, N. 4. P. 224–230.
19. Лисов А.А. Обзор способов передачи энергии для беспроводной зарядки электромобилей. В кн.: Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. 2023. Т. 11, № 1. С. 33–35. EDN: LBCMAA
20. Sakamoto H., Harada K., Washimiya S., Takehara K., Matsuo Y., Nakao F. Large air-gap coupler for inductive charger [for electric vehicles] // IEEE Transactions on Magnetics. 1999. Vol. 35, N. 5. P. 3526–3528. doi: 10.1109/20.800578
21. Hui S.Y. Planar wireless charging technology for portable electronic products and Qi // Proceedings of the IEEE. 2013. Vol. 101, N. 6. P. 1290–1301. doi: 10.1109/JPROC.2013.2246531
22. El-Shahat A., Ayisire E., Wu Y., et al. Electric vehicles wireless power transfer state-of-the-art // Energy Procedia. 2019. Vol. 62, N. 1. P. 24–37. doi: 10.1016/j.egypro.2019.04.004
23. Gönül Ö., Duman A.C., Güler Ö. Electric vehicles and charging infrastructure in Turkey: An overview // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2021. Vol. 143. P. 110913. doi: 10.1016/j.rser.2021.110913
24. Abdelhalim E.A., Ei-Khayat G.A. A survey on analytical approaches used in RFID based applications. In: International Conference on Computer Applications Technology (ICCAT). 2013. P. 1–6. doi: 10.1109/ICCAT.2013.6521960
25. Mou X., Gladwin D.T., Zhao R., Sun H. Survey on magnetic resonant coupling wireless power transfer technology for electric vehicle charging // IET Power Electronics. 2019. Vol. 12, N. 12. P. 3005–3020. doi: 10.1049/iet-pel.2019.0529
26. Baros D., Rigogiannis N., Drougas P., et al. Transmitter side control of a wireless EV charger employing IoT // IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 227834–227846. doi: 10.1109/ACCESS.2020.3045803
27. Landt J. The history of RFID // IEEE potentials. 2005. Vol. 24, N. 4. P. 8–11. doi: 10.1109/MP.2005.1549751

## REFERENCES

1. Vozmilov AG, Panishev SA, Lisov AA. Study and mathematical modeling of a lithium-ion battery. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*. 2022;22(2):30–36. (In Russ.) EDN: OJAEVM doi: 10.14529/power220203

2. Heubaum H, Biermann F. Integrating global energy and climate governance: The changing role of the International Energy Agency. *Energy Policy*. 2015;87:229–239. doi: 10.1016/j.enpol.2015.09.009
3. Sachan S, Adnan N. Stochastic charging of electric vehicles in smart power distribution grids. *Sustainable cities and society*. 2018;40:91–100. doi: 10.1016/j.scs.2018.03.031
4. Tesla N. Experiments with alternate currents of very high frequency and their application to methods of artificial illumination. *Trans. Am. Inst. Electr. Eng.* 1891;8(1):266–319.
5. Patent U.S.A. 1119732. 1914. Tesla N. Apparatus for transmitting electrical energy. Accessed: 23.07.2023. Available from: <https://patentimages.storage.googleapis.com/8a/95/f3/1b1780c6941fb9/US1119732.pdf>
6. Brown WC. The history of power transmission by radio waves. *IEEE Transactions on microwave theory and techniques*. 1984;32(9):1230–42. doi: 10.1109/TMTT.1984.1132833
7. Dai J, Ludois DC. A survey of wireless power transfer and a critical comparison of inductive and capacitive coupling for small gap applications. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2015;30(11):6017–29. doi: 10.1109/TPEL.2015.2415253
8. Wang Y, Dongye Z, Zhang H, et al. A domino-type load-independent inductive power transfer system with hybrid constant-current and constant-voltage outputs. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2021;36(8):8824–34. doi: 10.1109/TPEL.2021.3055363
9. Mahesh A, Chokkalingam B, Mihet-Popa L. Inductive wireless power transfer charging for electric vehicles—a review. *IEEE access*. 2021;9:137667–713. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3116678
10. Mostafa TM, Muharam A, Patrick Hu A, Hattori R. Improved CPT system with less voltage stress and sensitivity using a step-down transformer on receiving side. *IET Power Electronics*. 2018;12(10):2634–41. doi: 10.1049/iet-pel.2018.6206
11. Luo B, Mai R, Guo L, Wu D, He Z. LC–CLC compensation topology for capacitive power transfer system to improve misalignment performance. *IET Power Electronics*. 2019;12(10):2626–33. doi: 10.1049/iet-pel.2018.5606
12. Pardo-Bosch F, Pujadas P, Morton C, Cervera C. Sustainable deployment of an electric vehicle public charging infrastructure network from a city business model perspective. *Sustainable Cities and Society*. 2021;71:102957. doi: 10.1016/j.scs.2021.102957
13. Vu VB, Dahidah M, Pickert V, Phan VT. An improved LCL-L compensation topology for capacitive power transfer in electric vehicle charging. *IEEE Access*. 2020;8:27757–68. doi: 10.1109/ACCESS.2020.2971961
14. Li W. High efficiency wireless power transmission at low frequency using permanent magnet coupling [dissertation] University of British Columbia; 2009. doi: 10.14288/1.0067661
15. Dickinson RM. Performance of a high-power, 2.388-GHz receiving array in wireless power transmission over 1.54 km. In: *IEEE-MTT-S International Microwave Symposium*. 1976:139–141. doi: 10.1109/MWSYM.1976.1123672

16. Matsumoto H. Research on solar power satellites and microwave power transmission in Japan. *IEEE microwave magazine*. 2002;3(4):36–45. doi: 10.1109/MMW.2002.1145674
17. Shinohara N. Wireless power transmission progress for electric vehicle in Japan. In: *IEEE Radio and Wireless Symposium*. 2013:109–111. doi: 10.1109/RWS.2013.6486657
18. Shinohara N. Beam efficiency of wireless power transmission via radio waves from short range to long range. *Journal of the Korean Institute of Electromagnetic and Science*. 2010;10(4):224–30.
19. Lisov AA. Обзор способов передачи энергии для беспроводной зарядки электромобилей. In: *Energo- i resursosberezhenie v teploenergetike i social'noj sfere: materialy Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii studentov, aspirantov, uchennyh*. 2023;11(1):33–35. EDN: LBCMAA
20. Sakamoto H, Harada K, Washimiya S, et al. Large air-gap coupler for inductive charger [for electric vehicles]. *IEEE Transactions on Magnetics*. 1999;35(5):3526–8. doi: 10.1109/20.800578
21. Hui SY. Planar wireless charging technology for portable electronic products and Qi. *Proceedings of the IEEE*. 2013;101(6):1290–301. doi: 10.1109/JPROC.2013.2246531
22. El-Shahat A, Ayisire E, Wu Y, Rahman M, Nelms D. Electric vehicles wireless power transfer state-of-the-art. *Energy Procedia*. 2019;62(1):24–37. doi: 10.1016/j.egypro.2019.04.004
23. Gönül Ö, Duman AC, Güler Ö. Electric vehicles and charging infrastructure in Turkey: An overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021;143:110913. doi: 10.1016/j.rser.2021.110913
24. Abdelhalim EA, Ei-Khayat GA. A survey on analytical approaches used in RFID based applications. In: *International Conference on Computer Applications Technology (ICCAT)*. 2013:1–6. doi: 10.1109/ICCAT.2013.6521960
25. Mou X, Gladwin DT, Zhao R, Sun H. Survey on magnetic resonant coupling wireless power transfer technology for electric vehicle charging. *IET Power Electronics*. 2019;12(12):3005–20. doi: 10.1049/iet-pel.2019.0529
26. Baros D, Rigogiannis N, Drougas P, et al. Transmitter side control of a wireless EV charger employing IoT. *IEEE Access*. 2020;8:227834–46. doi: 10.1109/ACCESS.2020.3045803
27. Landt J. The history of RFID. *IEEE potentials*. 2005;24(4):8–11. doi: 10.1109/MP.2005.1549751

### Сведения об авторах:

**Лисов Андрей Анатольевич**, аспирант;  
eLibrary SPIN: 1956-3662; ORCID: 0000-0001-7282-8470;  
E-mail: lisov.andrey2013@yandex.ru

**Панишев Сергей Алексеевич**, аспирант;  
eLibrary SPIN: 2676-5207; ORCID: 0000-0003-2753-2341;  
E-mail: panishef.serega@mail.ru

**Information about the authors:**

**Andrey A. Lisov**, postgraduate student,  
eLibrary SPIN: 1956-3662; ORCID: 0000-0001-7282-8470;  
E-mail: lisov.andrey2013@yandex.ru

**Sergei A. Panishev**, postgraduate student;  
eLibrary SPIN: 2676-5207; ORCID: 0000-0003-2753-2341;  
E-mail: panishef.serega@mail.ru