

УДК 621.311

**БЕСПРОВОДНАЯ ПЕРЕДАЧА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ  
WIRELESS POWER TRANSMISSION**

А.А. Богдан, Д.Н. Журавлёв

Научный руководитель – Г.А. Михальцевич, старший преподаватель

Белорусский национальный технический университет,

г. Минск, Республика Беларусь

A. Bogdan, D. Zhuravlev

Supervisor – G. Mikhaltsevich, Senior Lecturer

Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

*Аннотация:* В данной работе рассмотрены различные способы беспроводной передачи электроэнергии.

*Abstract:* This paper discusses various methods of wireless power transmission.

*Ключевые слова:* электроэнергия, катушка, расстояние, бесконтактная, индукция, излучение, передача.

*Keywords:* electricity, coil, distance, non-contact, induction, radiation, transmission.

**Введение**

**Беспроводная передача электроэнергии** – это способ передачи электрической энергии без использования проводящих элементов в электрической цепи. Беспроводное зарядное устройство для мобильного телефона стандарта Qi. Зарядная площадка для электробуса с бесконтактной зарядкой на остановке. Приемная индукционная катушка электрической зубной щетки "Braun 4728" с беспроводной зарядкой аккумулятора. Технологические принципы такой передачи включают индукцию (на коротких расстояниях и относительно низкой мощности), резонансную (используется в бесконтактных смарт-картах и RFID-чипах) и направленную электромагнитную на относительно большие расстояния и мощности (в диапазоне от ультрафиолетового до микроволнового излучения). К 2011 году состоялись следующие успешные эксперименты с передачей энергии порядка десятков киловатт в микроволновом диапазоне с КПД около 40%:

Концепция "беспроводной передачи энергии" – это собирательный термин, который относится к ряду различных технологий передачи энергии с использованием электромагнитных полей. Такие технологии в первую очередь характеризуются расстоянием, на которое они могут передавать мощность с максимальной эффективностью, а также типом используемой электромагнитной энергии: изменяющиеся во времени электрические и магнитные поля, радиоволны, сверхвысокочастотное (микроволновое) излучение и волны видимого света.

Беспроводная передача энергии относится к широкому спектру применений, включая беспроводную зарядку аккумуляторов. В последнее время, как производитель, так и потребитель сосредоточили свое внимание на возможности беспроводной передачи электроэнергии в установках, ориентированных на массового потребителя, в частности, на технологии беспроводной зарядки аккумуляторов.

В общих чертах, рассматривая любой из способов беспроводной передачи энергии, мы можем однозначно сказать, что схема передачи энергии основана на передающем элементе (антенне или соединенных катушках), подключенном к источнику питания, и приемном элементе, подключенном к нагрузке (рисунок 1).

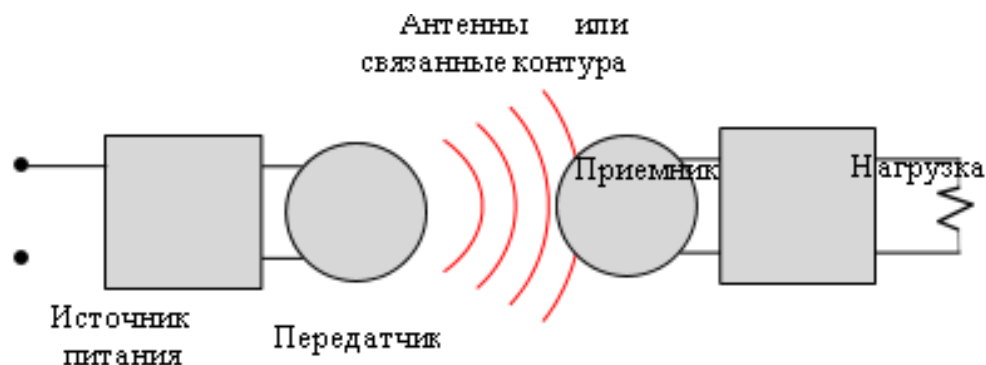


Рисунок 1 – Схема передача энергии беспроводным способом

### Основная часть

#### СПОСОБЫ ПЕРЕДАЧИ

##### Ультразвуковой способ

Ультразвуковой метод передачи энергии был изобретен студентами Пенсильванского университета и впервые представлен широкой публике на выставке "The All Things Digital" (D9) в 2011 году. Как и в других способах беспроводной передачи чего-либо, использовались приемник и передатчик. Передатчик излучал ультразвук; приемник, в свою очередь, преобразовал слышимый звук в электричество. На момент презентации дальность передачи достигала 7-10 метров, и была необходима прямая видимость приемника и передатчика. Передаваемое напряжение достигало 8 вольт; о полученном токе не сообщается. Используемые ультразвуковые частоты никоим образом не воздействуют на человека. Также нет информации о негативном воздействии ультразвуковых частот на животных.

Практическое применение ультразвука для передачи энергии невозможно из-за очень низкой эффективности, ограничений во многих штатах на максимальный уровень звукового давления, который не позволяет передавать приемлемую мощность, и других ограничений.

##### Способ электромагнитной индукции

При беспроводной передаче энергии с помощью электромагнитной индукции используется ближнее электромагнитное поле на расстояниях примерно в одну шестую длины волны. Энергия ближнего поля сама по себе не излучается, но некоторые потери излучения все же происходят. Кроме того, как правило, также возникают потери на сопротивление. Благодаря электродинамической индукции переменный электрический ток, протекающий через первичную обмотку, создает переменное магнитное поле, которое воздействует на вторичную обмотку, индуцируя в ней электрический ток. Для достижения высокой эффективности взаимодействие должно быть достаточно тесным. По мере того как вторичная обмотка удаляется от первичной, все больше и больше магнитного

поля не достигает вторичной обмотки. Даже на относительно небольших расстояниях индуктивная связь становится крайне неэффективной, растрачивая большую часть передаваемой энергии впустую.

**Электрический трансформатор** – это простейшее устройство для беспроводной передачи энергии. Первичная и вторичная обмотки трансформатора напрямую не соединены. Передача энергии осуществляется посредством процесса, известного как взаимная индукция. Основная функция трансформатора заключается в увеличении или уменьшении первичного напряжения. Бесконтактные зарядные устройства мобильных телефонов и электрические зубные щетки являются примерами использования принципа электродинамической индукции. Индукционные плиты также используют этот метод. Основным недостатком метода беспроводной передачи данных является его чрезвычайно малая дальность действия. Приемник должен находиться в непосредственной близости от передатчика, чтобы эффективно взаимодействовать с ним.

Использование резонанса колебательного контура немного увеличивает дальность передачи. При резонансной индукции передатчик и приемник настраиваются на одну и ту же частоту. Производительность может быть улучшена еще больше, за счет изменения формы сигнала, управляющего тока с синусоидальной на несинусоидальную переходную форму сигнала. Импульсная передача энергии происходит в течение нескольких циклов. Таким образом, значительная мощность может передаваться между двумя взаимно настроенными LC-цепями с относительно низким коэффициентом связи. Передающая и приемная катушки, как правило, представляют собой однослойные соленоиды или плоскую спираль с набором конденсаторов, которые позволяют настроить приемный элемент на частоту передатчика.

Распространенным применением резонансной электродинамической индукции является зарядка аккумуляторов портативных устройств, таких как портативные компьютеры и сотовые телефоны, медицинские имплантаты и электромобили. Технология локализованной зарядки использует выбор соответствующей передающей катушки в структуре массива многослойных обмоток. Резонанс используется как в панели беспроводной зарядки (передающая схема), так и в модуле приемника (встроенном в нагрузку) для обеспечения максимальной эффективности передачи энергии. Этот способ передачи подходит для универсальных беспроводных зарядных панелей для зарядки портативной электроники, такой как, например, мобильные телефоны. Этот метод принят как часть стандарта беспроводной зарядки Qi.

Резонансная электродинамическая индукция также используется для питания устройств, в которых нет батарей, таких как RFID-метки и бесконтактные смарт-карты, а также для передачи электрической энергии от первичной катушки индуктивности к винтовому резонатору трансформатора Tesla, который также является беспроводным передатчиком электрической энергии.

### **Электростатическая индукция**

**Электростатическая или емкостная связь** - это прохождение электричества через диэлектрик (рисунок 2).

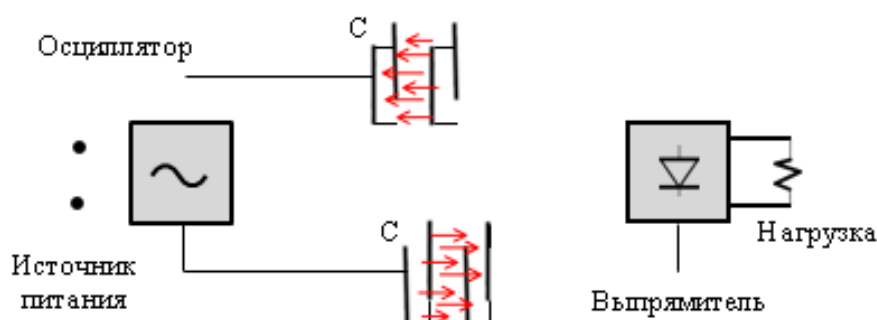


Рисунок 2 – Схема передачи электроэнергии электростатическим методом

На практике это градиент электрического поля или дифференциальная емкость между двумя или более изолированными клеммами, пластинами, электродами или узлами, возвышающимися над проводящей поверхностью. Электрическое поле создается путем зарядки пластин переменным током высокой частоты и высокого потенциала. Емкость между двумя электродами и питаемым устройством образует разность потенциалов.

Электрическая энергия, передаваемая посредством электростатической индукции, может быть использована в приемном устройстве, например, таком как беспроводные лампы. Тесла продемонстрировал беспроводное питание осветительных ламп энергией, передаваемой переменным электрическим полем.

Вместо того чтобы полагаться на электродинамическую индукцию для питания лампы на расстоянии, идеальным способом освещения зала или комнаты было бы создать условия, при которых осветительное устройство можно было бы переносить и размещать в любом месте, и оно работало бы, где бы оно ни находилось, и без проводного подключения. Я смог продемонстрировать это, создав в комнате мощное переменное электрическое поле высокой частоты. Для этой цели я прикрепил к потолку изолированную металлическую пластину и подсоединил ее к одной клемме индукционной катушки, другая клемма была заземлена. В другом случае я подсоединил две пластины, каждую к разным концам индукционной катушки, тщательно подобрав их размеры. Газоразрядная лампа может перемещаться в любое место помещения между металлическими пластинами или даже на некоторое расстояние за ними, непрерывно излучая свет.

Принцип электростатической индукции применим к методу беспроводной передачи данных. В случаях, когда требуется передача небольшого количества энергии, необходимость в размещении электродов на возвышении уменьшается, особенно в случае высокочастотных токов, когда достаточное количество энергии может быть получено терминалом путем электростатической индукции из верхних слоев воздуха, создаваемых передающей терминалом.

### Микроволновое излучение

Передачу энергии радиоволн можно сделать более направленной, значительно увеличив расстояние эффективной передачи энергии за счет уменьшения длины волны электромагнитного излучения, обычно до микроволнового диапазона. Для обратного преобразования микроволновой энергии в электриче-

скую можно использовать рентгену, эффективность преобразования энергии которой превышает 95%. Этот метод был предложен для передачи энергии с орбитальных солнечных электростанций на Землю и питания космических аппаратов, покидающих околоземную орбиту (рисунок 3).

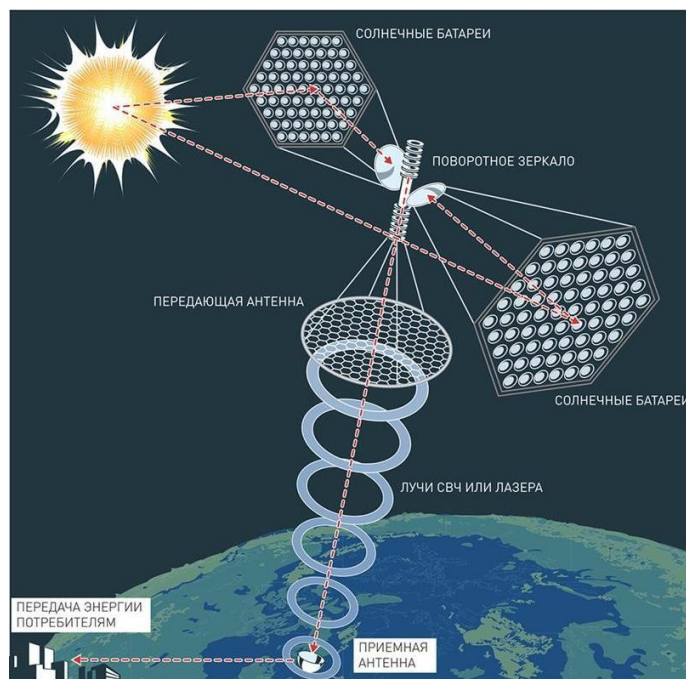


Рисунок 3 – Схема передачи энергии с помощью электромагнитных излучений

Трудность в создании энергичного микроволнового луча заключается в том, что для его использования в космических программах необходима большая диафрагма из-за дифракции, ограничивающей направленность антенны. Например, согласно исследованию НАСА, проведенному в 1978 году, для микроволнового луча с частотой 2,45 ГГц потребуются передающая антенна диаметром 1 км и приемная антенна диаметром 10 км. Эти размеры могут быть уменьшены за счет использования более коротких длин волн, однако короткие волны могут поглощаться атмосферой, а также блокироваться дождем или каплями воды. Из-за "проклятия узкого луча" невозможно сузить луч путем объединения лучей от нескольких небольших спутников без пропорциональной потери мощности. Для использования на земле антенна диаметром 10 км обеспечит значительный уровень мощности при сохранении низкой плотности луча, что важно по соображениям безопасности для людей и окружающей среды. Безопасный уровень плотности мощности для человека составляет  $1 \text{ МВт/см}^2$ , что соответствует мощности в 750 МВт на площади круга диаметром 10 км. Этот уровень соответствует мощности современных электростанций.

Японский исследователь Хидецугу Яги исследовал беспроводную передачу энергии с помощью, созданной им направленной антенной решеткой. В феврале 1926 года он опубликовал статью об устройстве, ныне известном как антенна Яга. Хотя он оказался неэффективным для передачи электроэнергии, сегодня он широко используется в радиовещании и беспроводных телекоммуникациях благодаря своим превосходным эксплуатационным характеристикам.

В 1945 году советский ученый Семен Тетельбаум опубликовал статью, в которой впервые рассмотрел эффективность микроволновой линии для беспроводной передачи электроэнергии. После Второй мировой войны, когда началась разработка мощных микроволновых излучателей, известных как магнетроны, была разработана идея использования микроволн для передачи энергии. В 1964 году был продемонстрирован миниатюрный вертолет, на который энергия передавалась с помощью микроволнового излучения.

Беспроводная передача энергии высокой мощности с использованием микроволн была подтверждена экспериментально. Эксперименты по передаче десятков киловатт электроэнергии были проведены в Голдстоунской обсерватории (Голдстоун, Калифорния) в 1975 году и в 1997 году в Гранд-Бассине на острове Реюньон. В ходе экспериментов была достигнута передача энергии на расстояние около одного километра.

### **Лазерный метод**

В том случае, если длина волны электромагнитного излучения приближается к видимой области спектра (от 10 мкм до 10 нм), энергия может быть передана путем преобразования ее в лазерный луч, который затем может быть направлен на фотоэлемент приемника.

Передача лазерной энергии имеет ряд преимуществ по сравнению с другими методами беспроводной передачи: передача энергии на большие расстояния (из-за малого размера угла расхождения между узкими пучками монохроматической световой волны); простота использования для небольших изделий (благодаря небольшому размеру твердотельного лазера - фотоэлектрического полупроводникового диода); отсутствие радиочастотных помех для существующих средств связи, таких как Wi-Fi и сотовые телефоны (лазер не создает таких помех); возможность контроля доступа (электричество могут получать только приемники, подсвеченные лазерным лучом).

Этот метод имеет ряд недостатков: преобразование низкочастотного электромагнитного излучения в высокочастотное излучение, которое является светом, неэффективно. Преобразование света обратно в электричество также неэффективно, поскольку КПД солнечных элементов достигает 40-50%, хотя эффективность преобразования монохроматического света намного выше, чем эффективность солнечных панелей; атмосферные потери; необходимость наличия прямой видимости между передатчиком и приемником (как при микроволновой передаче).

Технология передачи энергии лазером ранее изучалась в основном при разработке новых систем вооружения и в аэрокосмической промышленности, а в настоящее время разрабатывается для коммерческой и бытовой электроники в устройствах малой мощности. Беспроводные системы передачи энергии, используемые в потребительских целях, должны соответствовать требованиям стандарта лазерной безопасности IEC 60825. Для лучшего понимания лазерных систем следует учитывать, что распространение лазерного луча гораздо меньше зависит от дифракционных ограничений, как пространственное и спектральное согласование характеристик лазеров может увеличить рабочую мощность и расстояние, как длина волны влияет на фокусировку.

Центр летных исследований НАСА имени Драйдена продемонстрировал полет легкой беспилотной модели самолета, приводимой в действие лазерным лучом. Это доказало возможность периодической подзарядки с помощью лазерной системы без необходимости посадки самолета.

Кроме того, подразделение НАСА под названием "Lighthouse DEV" совместно с Мэрилендским университетом разрабатывает лазерную систему питания для небольших беспилотных летательных аппаратов, безопасную для глаз.

С 2006 года компания PowerBeam, которая изобрела лазерную технологию, безопасную для глаз, также разрабатывает компоненты, готовые к коммерческому использованию для различных потребительских и промышленных электронных устройств.

В 2009 году на конкурсе НАСА по передаче лазерной энергии в космосе компания LaserMotive заняла первое место и получила приз в размере 900 тысяч долларов, продемонстрировав собственную разработку, способную работать на расстоянии до одного километра. Лазер победителя смог передавать мощность в 500 Вт на расстояние 1 км с КПД 10%.

**Принцип действия беспроводной передачи электроэнергии на основе явления электромагнитной индукции**

Каждый из вышеперечисленных методов передачи электроэнергии имеет свои особенности, однако использование технологий беспроводной передачи электроэнергии посредством явления электромагнитной индукции получили наибольшее распространение в электротехнике. Также на границе раздела ближней и дальней зон существует переходная промежуточная зона, в которой зона индукции, т.е. ближняя зона переходит в зону излучения.

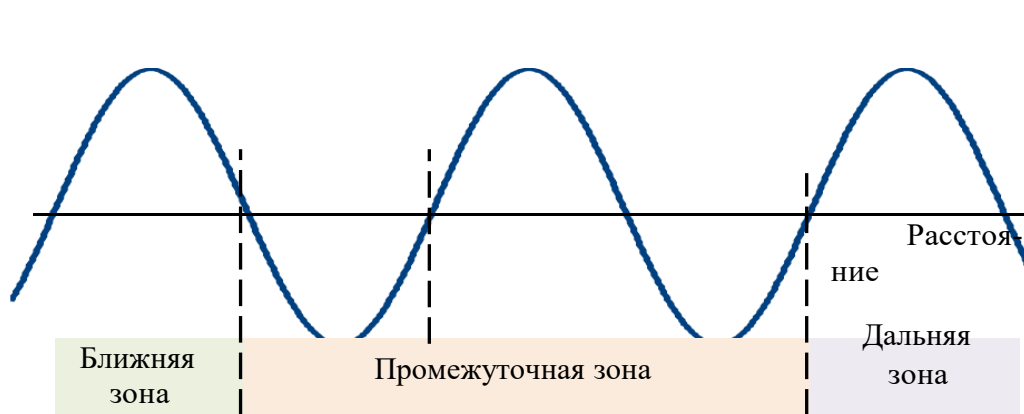


Рисунок 4 – Распространение электромагнитной волны. Ближняя и дальняя зоны

При наличии в непосредственной близости двух катушек индуктивности в последней катушке, благодаря индукции, будет появляться электродвижущая сила (ЭДС) взаимной индукции, определяемая по закону Фарадея – Максвелла. Таким образом, между катушками установится индуктивная связь.

Система состоит из первичной цепи  $L_1$  (источник питания) и вторичной цепи  $L_2$  (приемная катушка). При протекании переменного тока в первичной цепи создается магнитное поле, которое в свою очередь индуцирует напряжение в приемной цепи, которое используют в качестве источника энергии для зарядки

аккумуляторов или для питания устройств. По мере удаления приемной катушки от источника питания основная часть магнитного поля рассеивается и не пронизывает линиями магнитного поля приемную катушку.

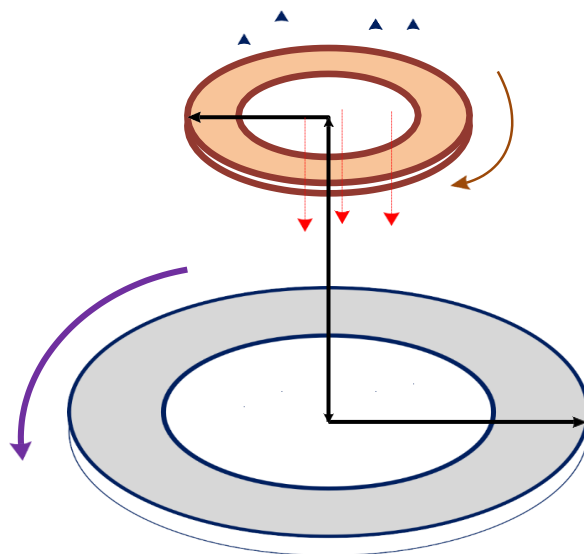


Рисунок 5 – Система двух индуктивно связанных катушек

Коэффициент связи зависит от многих факторов, таких как: расстояние между катушками  $l$ , соотношения диаметров первичной и вторичной катушек, расположение вторичной катушки относительно первичной, формы катушек (единичное кольцо или сложная геометрия катушки) и т.д.

В практических целях витки двух катушек, так же, как и различные витки одной и той же катушки, пронизываются неодинаковыми магнитными потоками, и поэтому коэффициент индуктивности связи  $k < 1$ .

Изменения индуктивной связи между двумя катушками можно достигнуть перемещением одной катушки относительно другой, т.е. значение  $k$  может изменяться от 0 (отсутствие связи между катушками) до 1 (жесткая связь катушек).

Для увеличения эффективности передачи энергии между индуктивно-связанными контурами используют резонансные контуры с индуктивной связью. Такие системы применяются в разнообразных радиотехнических устройствах на протяжении последних десятков лет. Рассмотрим явление резонанса в индуктивно связанных контурах.

### Заключение

В результате проведённой работы мы изучили большое количество теории, связанной со способами беспроводной передачи энергии. Так же мы поняли, что устройства, способные осуществлять беспроводную передачу энергии, различными способами.

Также мы узнали, что различные технологии беспроводной передачи энергии получает довольно широкое распространение в современном мире. Из ре-



результатов проведённой нами аналитики, можно судить о том, что беспроводная передача энергии может быть достигнута различными способами.

Более подробно разобрали принцип действия беспроводной передачи электроэнергии на основе явления электромагнитной индукции.

Подводя итог нашей работы, мы можем сказать, что гипотеза нашего проекта: беспроводная передача энергии обладает не очень большим КПД, и будет выполнять нужную задачу.

Технология беспроводной передачи энергии поистине является революционной для нынешнего общества, т.к. начинает получать широкое распространение уже сегодня. Хотя первые масштабные опыты были проведены Николой Тесла, данная технология только сейчас перешла на более глобальный уровень. И можно с уверенностью сказать, что в ближайшее время именно она в процессе непосредственного развития станет одной из основополагающих в будущем.

### Литература

1. Иваненко, В.П. Микроволновые печи и безопасность их эксплуатации / В.П. Иваненко, А.Ф. Мусаев, В.В. Кузьмин, Д.А. Бобряков, Р.А. Азаев, Н.А. Зуев // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств». 2007 г.
  2. Калашников, С.Г. Электричество / С.Г. Калашников // — М.: Гостехтеориздат, 1956.
  3. Миллер, М.А. Электромагнитная индукция / М.А Миллер, Г.В. Пермитин // Физическая энциклопедия: [в 5 т.] / Гл. ред. А.М. Прохоров: Большая российская энциклопедия, 1999.
  4. Ржонсницкий, Б.Н. Выдающийся электротехник Никола Тесла / Б.Н. Ржонсницкий // (1856—1943) / Б.Н. Ржонсницкий // Вопросы естествознания и техники. Институт естествознания и техники АН СССР. — Вып. I. — М., 1956. — С. 192.
  5. Тарасов, Л.В. Физика процессов в генераторах когерентного оптического излучения / Л.В. Тарасов — М.: Радио и связь, 1981. — 440 с.;
  6. Технология беспроводной зарядки: принцип действия, стандарты, производители. // Режим доступа: <http://www.russianelectronics.ru>. — Дата доступа: 10.04.2024.
  7. Тамм, И.Е. Основы теории электричества / И.Е. Тамм // — М.: Физматлит, 2003. — 618 с.
  8. Фейгин, О. Никола Тесла: Наследие великого изобретателя.
- Беспроводная передача электричества и их способы / О. Фейгин // Режим доступа: [https://ru.m.wikipedia.org/wiki/Беспроводная\\_передача\\_электричества](https://ru.m.wikipedia.org/wiki/Беспроводная_передача_электричества) — Дата доступа: 10.04.2024.