

Міністерство освіти і науки України
Державний вищий навчальний заклад
"Національний гірничий університет"

Електротехнічний
(факультет)

Кафедра Електропривода
(повна назва)

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

дипломної роботи

Магістра

(назва освітньо-кваліфікаційного рівня)

галузь знань 14 Електрична інженерія

(шифр і назва галузі знань)

спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

(код і назва спеціальності)

(освітня програма «Електромеханічні системи автоматизації та електропривод»)

освітній рівень магістр

(назва освітнього рівня)

Кваліфікація 2151.2 (Int) Інженер-електромеханік

(код і назва кваліфікації)

на тему: Розробка схемотехнічних рішень для станції безконтактної зарядки електромобілів

Виконавець:

студент 6 курсу, групи 141М-16-4

(підпис)

Мариненко М.В.

(прізвище та ініціали)

Керівники	Прізвище, ініціали	Оцінка	Підпис
проекту	Балахонцев О.В.		
розділів:			
1,2,3.	Балахонцев О.В.		

Рецензент			
-----------	--	--	--

Нормоконтроль	Казачковський М.М.		
---------------	--------------------	--	--

Дніпропетровськ
2018

Міністерство освіти і науки України
Державний вищий навчальний заклад
"Національний гірничий університет"

ЗАТВЕРДЖЕНО:

завідувач кафедри
Електроприводу
(повна назва)

_____ Казачковський М.М.

(підпис) (прізвище, ініціали)

« ____ » _____ 2017 року

ЗАВДАННЯ

на виконання кваліфікаційної роботи магістра
спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(код і назва спеціальності)

(освітня програма «Електромеханічні системи автоматизації та електропривод»)

студенту 141М-16-4 Мариненко М.В.
(група) (прізвище та ініціали)

Тема дипломної роботи Розробка схемотехнічних рішень для станції
безконтактної зарядки електромобілів

1 ПІДСТАВИ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ РОБОТИ

Наказ ректора ДВНЗ "НГУ" від _____ № _____

2 МЕТА ТА ВИХІДНІ ДАНІ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ РОБІТ

Об'єкт досліджень станція безконтактної зарядки електромобілів

Предмет досліджень оптимальні параметри схеми безконтактної передачі енергії для
зарядки електромобілів

Мета НДР обґрунтувати принцип роботи та фізичні основи технології
використання безконтактних зарядних установок, як основного джерела енергії.
Розробити
схемотехнічні рішення

Вихідні дані для проведення роботи технічні характеристики сучасних електричних
електромобілів

3 ОЧІКУВАНІ НАУКОВІ РЕЗУЛЬТАТИ

Наукова новизна застосування безконтактної зарядної установки, замість
стаціонарних зарядних пристроїв, як основного джерела поповнення заряду

електромобілів

Практична цінність отримання параметрів схеми безконтактної зарядної установки, що дасть змогу зменшити затрати енергії при її передачі

4 ВИМОГИ ДО РЕЗУЛЬТАТІВ ВИКОНАННЯ РОБОТИ

Результати роботи передачі енергії безконтактним методом повинні бути представлені у вигляді числових параметрів та перевірені за допомогою моделювання

5 ЕТАПИ ВИКОНАННЯ РОБІТ

Найменування етапів робіт	Строки виконання робіт (початок-кінець)
Огляд технічних рішень в галузі електромобілів та методи їх зарядки.	26.10.2017-09.11.2017
Дослідження методів безконтактної передачі енергії.	13.11.2017-21.11.2017
Розробка та дослідження схемотехнічних рішень для системи безконтактної зарядки електромобілів.	23.11.2017-30.11.2017
Дослідження існуючих технологій безконтактної передачі енергії електромобілям на проїжджих частинах.	04.12.2017-13.12.2017
Розробка математичної моделі системи безконтактної передачі енергії.	18.12.2017-10.01.2018

6 РЕАЛІЗАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ТА ЕФЕКТИВНІСТЬ

Економічний ефект від реалізації результатів роботи очікується позитивним, оскільки завдяки впровадженню принципово нової технології зарядки, яка не потребує зупинки та підключення транспортного засобу

Соціальний ефект від реалізації результатів роботи очікується позитивним, завдяки поліпшенню екологічної ситуації та просування електромобілів в Україні

7 ДОДАТКОВІ ВИМОГИ

Відповідність оформлення ДСТУ 3008-95. Документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення

Завдання видав _____

(підпис)

Балахонцев. О.В.
(прізвище, ініціали)

Завдання прийняв до виконання _____

(підпис)

Мариненко М.В.
(прізвище, ініціали)

Дата видачі завдання: _____

Термін подання дипломної роботи до ЕК _____

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 72 стор., 32 рис., 1 табл., 11 джерел.

Об'єкт детальної розробки: станція безконтактної зарядки електромобілів.

Мета роботи: розробка схемотехнічних рішень для станцій безконтактної зарядки електромобілів.

Виконано аналіз технології безконтактної передачі енергії. Розкрито перспективність, проблематика, а також принцип роботи і фізичні основи технології використання бездротових зарядних установок як основного джерела електроенергії. Показано схемотехнічні рішення передачі енергії для станцій безконтактної зарядки електромобілів.

Здійснено аналіз впливу на здоров'я людини застосування безконтактних способів передачі енергії.

Розроблено математичну модель системи безконтактної зарядки електромобіля з використанням пакета MATLAB.

ЕЛЕКТРОМОБІЛЬ, ЗАРЯДНІ СТАНЦІЇ, БЕЗКОНТАКТНА ПЕРЕДАЧА
ЕНЕРГІЇ, ЕЛЕКТРОМАГНІТНА ІНДУКЦІЯ, МАТЕМАТИЧНЕ
МОДЕЛЮВАННЯ.

РЕФЕРАТ

Пояснительная записка: 72 стр., 32 рис., 1 табл., 11 источников.

Объект детальной разработки: станция бесконтактной зарядки электромобилей.

Цель работы: разработка схемотехнических решений для станций бесконтактной зарядки электромобилей.

Выполнен анализ технологии бесконтактной передачи энергии. Раскрыто перспективность, проблематика, а также принцип работы и физические основы технологии использования беспроводных зарядных установок как основного источника электроэнергии. Показано схемотехнические решения передачи энергии для станций бесконтактной зарядки электромобилей.

Осуществлен анализ влияния на здоровье человека применение бесконтактных способов передачи энергии.

Разработана математическая модель системы бесконтактной зарядки электромобиля с использованием пакета MATLAB.

ЭЛЕКТРОМОБИЛЬ, ЗАРЯДНЫЕ СТАНЦИИ, БЕЗКОНТАКТНАЯ
ПЕРЕДАЧА ЭНЕРГИИ, ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ,
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ.

ABSTRACT

The Explanatory note: 72 pages, 32 figures, 1 table, 11 sources.

Detailed design of the object: station for the non-contact charging of electric vehicles.

The technology of contactless energy transfer is analyzed. The prospects, problems, as well as the principle of operation and the physical foundations of the technology of using wireless charging units as the main source of electric power are revealed. Shown are circuit-based solutions for power transmission for stations for the non-contact charging of electric vehicles.

The analysis of the impact on human health of the application of non-contact energy transfer methods was carried out.

A mathematical model of a system for contactless charging of an electric vehicle using the MATLAB package was developed.

ELECTROMOBILE, CHARGING EFFECTS, NON-CONTACT
TRANSFER OF ENERGY, ELECTROMAGNETIC INDUCTION,
MATHEMATICAL MODELING.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	9
1.ОБЗОР ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ В ОБЛАСТИ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ И МЕТОДЫ ИХ ЗАРЯДКИ	10
1.1. Общие сведения об электромобиле.....	11
1.2. Достоинства и недостатки электромобилей.....	12
1.3. Перспективы электромобилей.....	14
1.4. Типы зарядок и способы передачи энергии электромобилям.....	15
1.5. Бесконтактная передача.....	16
1.6. Метод передачи энергии на расстоянии.....	17
1.6.1. Метод электромагнитной индукции.....	18
1.6.2. Метод магнитно-резонансной индукции.....	19
1.6.3. Метод электростатической индукции.....	20
1.6.4. Световой метод.....	21
1.6.5. Метод микроволнового излучения.....	22
1.6.6. Звуковой метод.....	24
2.РАЗРАБОТКА И МЕТОДЫ УСТРОЙСТВ БЕСКОНТАКТНОЙ ЗАРЯДКИ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ	25
2.1. Принцип действия беспроводной передачи электроэнергии на основе явления электромагнитной индукции.....	26
2.2. Индуктивно связанные элементы цепи.....	27
2.3. Резонанс в индуктивно связанных контурах.....	30
2.4. Индуктивный метод в качестве бесконтактной передачи энергии при зарядке электромобиля.....	36
2.5. Векторная иллюстрация возбужденного электромагнитного поля.....	40
2.5. Применение индуктивного метода в качестве бесконтактной передачи энергии электромобилям на проезжих частях.....	43
2.6. Безопасность и влияние на здоровье человека применение бесконтактных способов передачи энергии.....	48

3.РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ БЕСКОНТАКТНОЙ ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ	51
3.1. Автономный инвертор.....	52
3.2. Высокочастотный трансформатор	59
3.3. Зарядное устройство	63
3.4. Моделирование системы беспроводной передачи энергии.....	64
ВЫВОД	70
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	72

ВВЕДЕНИЕ

Хотя беспроводная зарядка еще находится на зачаточной стадии, у этой технологии все же есть большой потенциал сделать электромобили более удобными и практичными в использовании. Одним из главных недостатков, существующих в настоящее время электромобилей, является нехватка заряда аккумуляторов для длительной езды.

В данной магистерской работе раскрыта перспективность, проблематика, а также принцип работы и физические основы технологии использования беспроводных зарядных установок как основного источника электроэнергии, взамен стационарным зарядным станциям для восполнения заряда электромобилей. Исследованы простые и реализуемые технологии бесконтактной передачи энергии. Показаны и смоделированы схемотехнические решения беспроводной передачи энергии. Отображен функционирующий проект использования системы непосредственно на дорогах общего пользования.

1. ОБЗОР ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ В ОБЛАСТИ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ И МЕТОДЫ ИХ ЗАРЯДКИ

1.1. Общие сведения об электромобиле

Электромобили - это такие автомобили, которые приводятся в движение электродвигателем, а не двигателем внутреннего сгорания. Питаются электромобили от топливных элементов или аккумуляторов, заряжающихся от обычной домашней сети. Вначале электроэнергия приходит на электромагнитный разъём, затем под управлением водителя она поступает к электродвигателю, который вращает колёса. Вал двигателя в электромобилях присоединён непосредственно к колесу, поэтому таким машинам не нужна коробка передач. И это второе отличие электромобилей от бензиновых.



Рис.1.1. Электромобиль и его основные части

Для большинства современных электромобилей кузов, шасси и многие другие механические узлы и агрегаты позаимствованы от серийных автомобилей с ДВС. Лишь немногие модели с самого начала проектировались как электромобили, например, GMEV1 или Honda EV-plus. Но те и другие имеют примерно одинаковый состав основных функциональных и вспомогательных компонентов, показанных на рис.1.2.

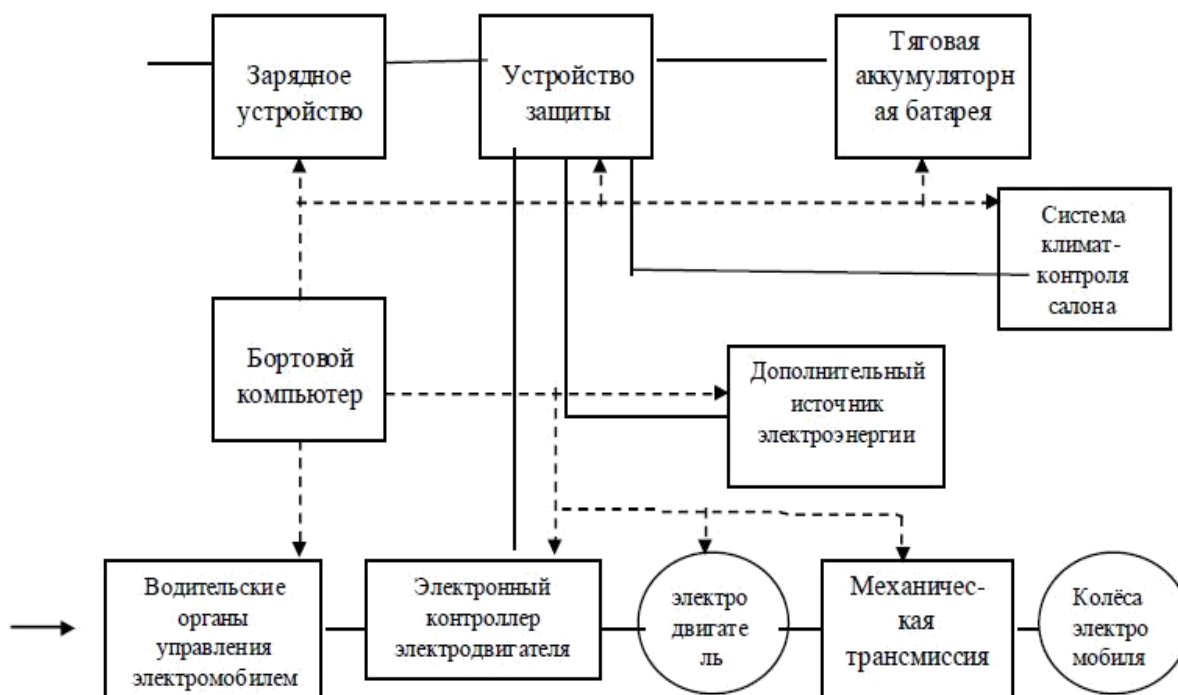


Рис.1.2. Блок-схема электромобиля

1.2. Достоинства и недостатки электромобилей

Преимуществ у такого транспорта много, и, наиболее важные из них рассмотрим далее.

1. Экологичность и отсутствие выхлопных газов. Электромобили не используют нефтепродукты, антифризные смеси, моторные и прочие масла, следовательно, не происходит выброса вредных выхлопных газов. Кроме того такой вид транспорта становится более безопасным в плане эксплуатации, поскольку максимально снижена его пожаро - и взрывоопасность.
2. Низкая стоимость обслуживания и эксплуатации. Поскольку электроэнергия в разы дешевле топлива для автомобилей, экономия для водителя в финансовом плане очевидна.
3. Высокий показатель КПД электродвигателя по сравнению с бензиновым двигателем. КПД электродвигателя достигает 95%, в то время как топливного двигателя – всего лишь 45%.

4. Более простая, доступная, надежная и безопасная конструкция автомобиля.
5. Возможность своевременной подзарядки двигателя, как от высоковольтного зарядного устройства (зарядной станции), так и от обычной домашней электросети.
6. Низкий уровень шума благодаря небольшому количеству подвижных частей автомобиля и механической передачи.

Помимо явных достоинств, электромобиль имеет и недостатки.

1. Несовершенство электрических аккумуляторов для электромобилей. В настоящее время перед производителями стоит задача номер один – обеспечить массовый выпуск емких, безопасных и недорогих аккумуляторов для электрокаров. Те аккумуляторы, которые используются в большинстве моделей электрокаров, работают только при очень высоких температурах, а также являются достаточно дорогостоящими из-за применения драгоценных металлов для их производства.
2. Быстрая потеря заряда. Кроме всего прочего такие батареи очень быстро теряют заряд и требуют постоянной длительной подзарядки. При этом большая часть энергии аккумулятора расходуется не на езду, а на обогрев/охлаждение автомобиля, питание бортовых систем и прочее.
3. Утилизация. Не менее важным является вопрос безопасной утилизации электрических аккумуляторов, ведь многие из них содержат ядовитые вещества и даже кислоты.
4. Возможный перегруз сетей электроснабжения при массовом заряде электрических аккумуляторов.
5. Сравнительно небольшой пробег электромобилей на одной подзарядке аккумулятора. В среднем одна батарея емкостью до 24 кВт/ч позволяет электрокару преодолеть расстояние в 140-165 км. При использовании дополнительных систем (кондиционирования, охлаждения, радио,

перевоз дополнительного груза) расстояние может сократиться до 85 км.

1.3. Перспективы электромобилей

Сколько бы ни говорили о пользе развития электромобилей для экологии, единственной причиной их распространения остается экономическая ситуация. Неизбежное постоянное подорожание нефтепродуктов подталкивает человечество на поиск нового источника энергии для транспорта. И самым перспективным здесь выглядит электроэнергия. Поэтому в ближайшие годы ожидается уверенный рост доли электрокаров в мировом транспорте.

Однако не стоит ожидать какого-либо гиперскачка или бума, поскольку развитие электротранспорта имеет ряд сложных проблем, решить которые еще только предстоит. Тем не менее, электромобили совершили огромный шаг на пути к коммерциализации отрасли. Они стали более доступными потребителю, разнообразие их моделей увеличилось, а инфраструктура их обслуживания постоянно растет.

Не менее важным фактором, влияющим на перспективы развития электрокаров, является государственная поддержка. Все больше стран предоставляют покупателям экологического транспорта всевозможную помощь в виде субсидий, кредитов и лизинга. Это делает электромобиль намного привлекательнее с чисто экономической точки зрения.

В общем, можно сказать, что рынок электрокаров находится только в начале своего пути и его ждет непременный рост. Интенсивность этого роста во многом будет зависеть от динамики цен на нефть. Однако постоянное развитие технологий и экономические реалии неизбежно приведут к тому, что электромобили станут равноценными участниками рынка, а возможно даже будут на нем доминировать.

1.4. Типы зарядок и способы передачи энергии электромобилям

Типы зарядок:

Mode 1 – однофазная зарядка. Считается самой «медленной» зарядкой, так как выдает мощность равную обычной бытовой розетке (до 240 В, до 16 А, до 3,8 кВт).

Mode 2 — то же, что и Mode 1, но с гораздо лучшими защитными характеристиками.

Mode 3 Type 1— однофазная зарядка. Немного «быстрее» Mode 1, за счет возрастания допустимой силы тока (до 240 В, до 32 А, до 7,7 кВт). Этого вполне достаточно для зарядки к примеру, Nissan Leaf, так как встроенное зарядное устройство этого автомобиля имеет мощность до 7,7 кВт.

Mode 3 Type 2 – Трехфазная зарядка переменным током. Наиболее распространенный вид зарядки в Европе (до 63 А, до 43 кВт).

Важное замечание: даже при том, что Mode 3 Type 2 гораздо мощнее, чем Mode 3 Type 1, тот же Nissan Leaf будет заряжаться по времени так же, как и на Mode 3 Type 1, так как встроенное зарядное устройство автомобиля не позволит «дать» автомобилю мощность более 7,5 кВт.

Mode 4 – зарядка постоянным током. На данный момент – это наиболее мощная зарядка, не считая Tesla (до 600 В, до 400 А, до 240 кВт)

На деле, на рынке представлены зарядные станции Mode 4 до 100 кВт.

Tesla Supercharger- наиболее «быстрая» зарядка, представленная сегодня на рынке. Имеет мощность до 130 кВт. Tesla Model S (80 кВт·ч) зарядится за 35 минут.

На данный момент существует два основных способа передачи электромобилю энергии:

- зарядка от проводов, работающая по принципу троллейбуса, но не требующая для длительной работы постоянного контакта с электросетью;

- беспроводной способ зарядки с использованием явления электромагнитной индукции.

1.5. Бесконтактная передача

Беспроводная передача электричества на расстоянии известна с тех пор, как в 1831 году Майкл Фарадей открыл явление электромагнитной индукции. На этом принципе работает множество приборов, однако массово использовать его в быту именно для передачи энергии без проводов человечество начало только в конце двадцатого века. А сегодня мы стоим на пороге серьезного прорыва, который сделает нас еще немного свободнее.

Экспериментируя с магнитами, Фарадей ставил перед собой конкретную цель: добыть электричество с помощью магнетизма. Ученый воспринимал магниты как источник электроэнергии - и его опыты увенчались успехом 29 августа 1831 года, по крайней мере если верить дате, указанной в дневнике. Фарадей доказал, что при изменении магнитного потока, проходящего через замкнутый контур, в последнем возникает электрический ток. Именно этот принцип и лежит сегодня в основе большинства способов беспроводной передачи электроэнергии.

Использование электрической энергии в качестве движущей силы для индивидуального транспортного средства заключается еще и в том, что электромагнитная энергия может распространяться непосредственно в пространстве без использования дополнительных проводников и контактов.

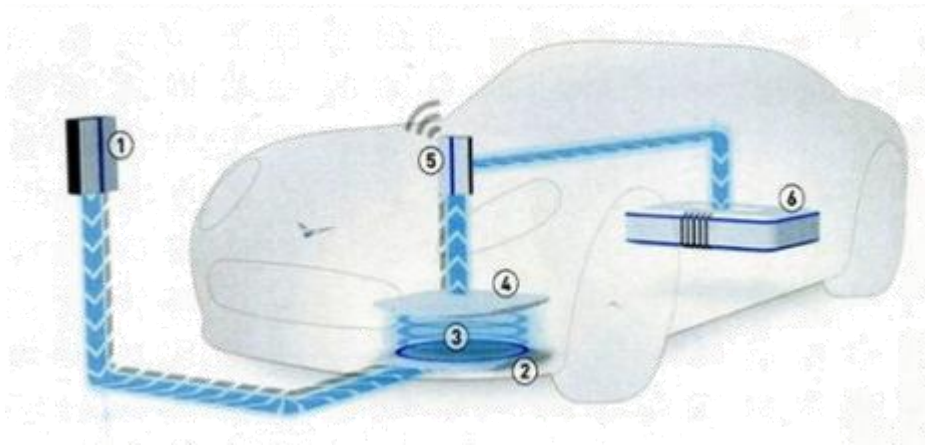


Рис.1.3. Принцип работы бесконтактной станции зарядки электромобиля: 1-источник; 2-передатчик; 3-беспроводное электричество; 4-приемник; 5-контроллер; 6- батарея.

1.6. Метод передачи энергии на расстоянии

Понятие «беспроводная передача энергии» является собирательным термином, который относится к числу различных технологий для передачи энергии с помощью электромагнитных полей. Такие технологии, прежде всего, характеризуются расстоянием, на которое они могут передавать мощность с максимальной эффективностью, а также используемым типом электромагнитной энергии: изменяющиеся во времени электрические и магнитные поля, радиоволны, сверхвысокочастотные (СВЧ) излучения и видимые световые волны. Возможные методы передачи беспроводной передачи электроэнергии представлены на рисунке 1.4.

Беспроводная передача энергии касается многочисленного разнообразия сфер применения, в том числе и беспроводной зарядки аккумуляторов. В последнее время, как производитель, так и потребитель устремили свое внимание на возможность беспроводной передачи энергии в установках, нацеленных на массового потребителя, в частности, на технологию беспроводной зарядки аккумуляторов.

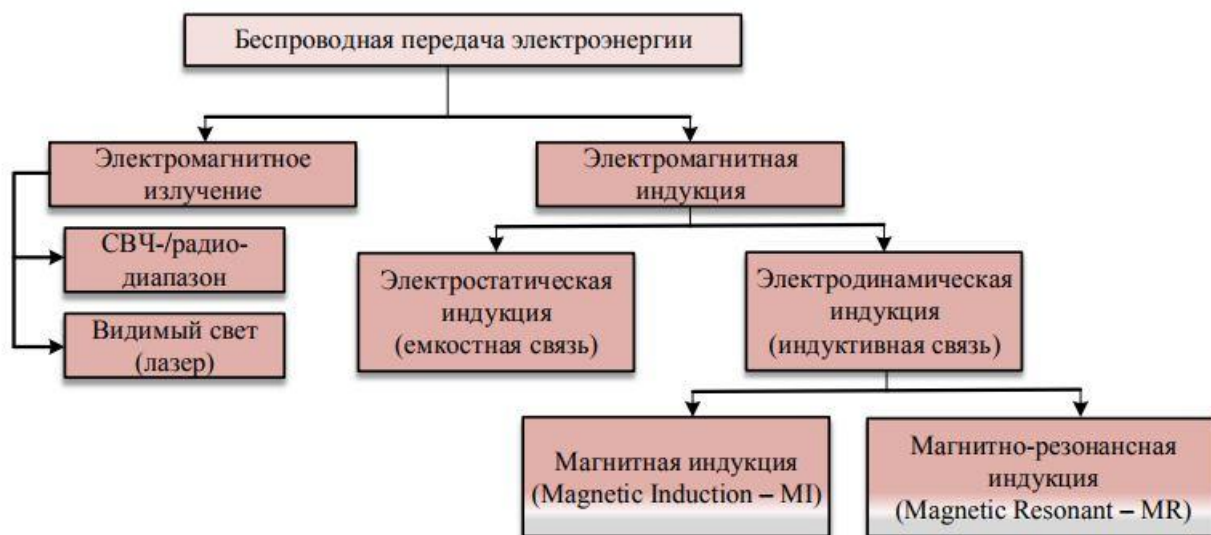


Рис. 1.4. Технологии беспроводной передачи электроэнергии, используемые для построения устройств зарядки аккумуляторов

В общем понятии, рассматривая любой из методов беспроводной передачи энергии, можно однозначно сказать, что схема осуществления передачи энергии основана на передающем элементе (антенна или связанные катушки), подключенного к источнику питания, и принимающем элементе, подключенного на нагрузку (рис. 1.5).

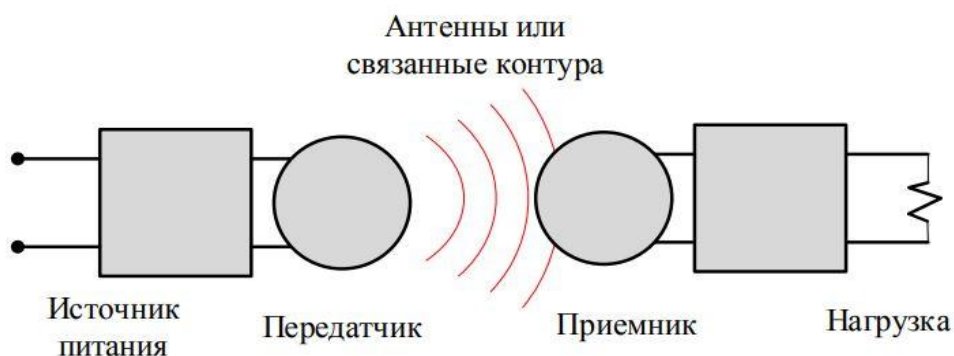


Рис. 1.5. Схема передачи энергии беспроводным способом.

1.6.1. Метод электромагнитной индукции

В этом случае используется электромагнитное поле. Благодаря явлению взаимной индукции, на вторичной обмотке устройства создается наведенный

ток с первичной обмотки. Для эффективного взаимодействия необходимо близкое расположение обмоток, так как в противном случае большая часть энергии поля тратится впустую. Описанное устройство представляет собой знакомый всем трансформатор. Действительно, раз обмотки не связаны физически, то электричество передается беспроводным способом (рис.1.6). Применяется данный способ для зарядки мобильных устройств, медицинских имплантатов и электромобилей. Кроме того, метод нашел применение в технологиях радиочастотной идентификации (RFID).

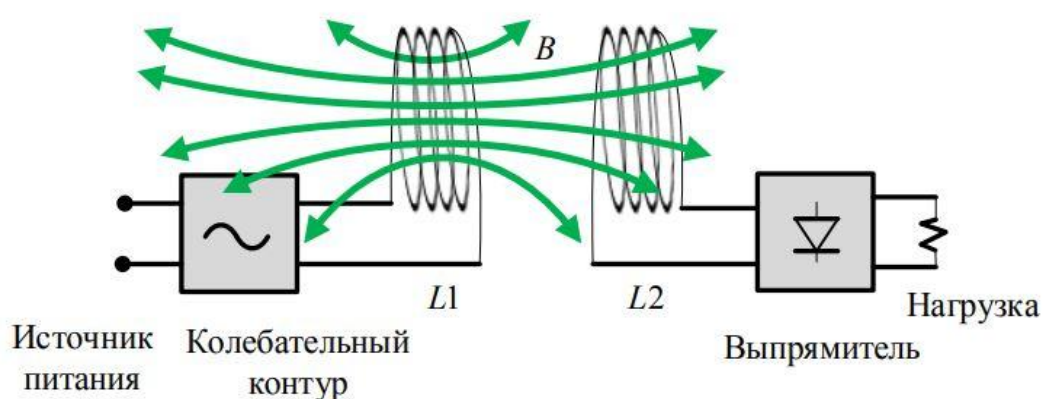


Рис. 1.6. Схема передачи энергии методом магнитной индукции

1.6.2. Метод магнитно-резонансной индукции

Данный метод отличается от вышеприведенного метода в том, что использование резонанса между двумя катушками увеличивает дальность передачи. Действительно, при магнитно-резонансной индукции передающая и принимающая катушка настроены на одинаковую частоту, поэтому амплитуда электромагнитных волн возрастает, следовательно, передача энергии происходит более эффективно, чем в методе электромагнитной индукции (рис.1.7).

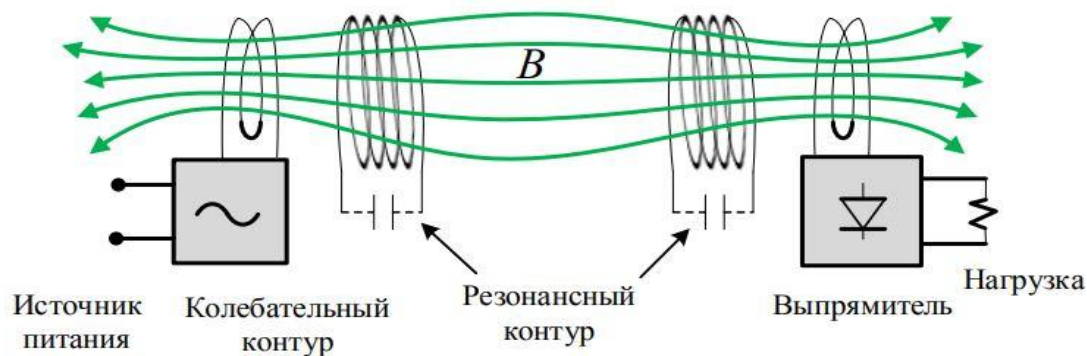


Рис. 1.7. Схема передачи энергии методом магнитно-резонансной индукции.

В связи с этим, значительная величина мощности передается между двумя LC-катушками, настроенными в резонанс, при относительно невысоком коэффициенте связи между ними. Обычно, передающая и принимающая катушка представляет собой спираль или один или несколько однослойных витков.

1.6.3. Метод электростатической индукции

Метод электростатической индукции. Представляет собой процесс передачи энергии через диэлектрик (рис.1.8). Метод был впервые применен Теслой для питания беспроводных ламп по воздуху (который является диэлектриком). В будущем планируется, что устройства будут получать энергию из воздуха, посредством передающего терминала. По сути, этот процесс схож с разрядом конденсатора.

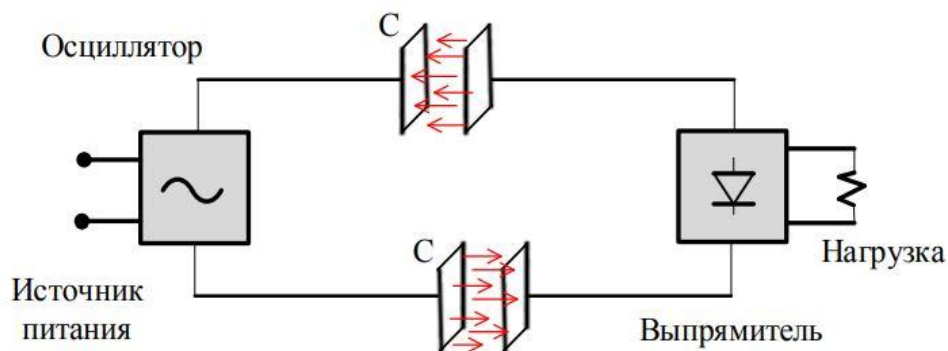


Рис. 1.8. Схема передачи энергии методом электростатической индукции.

1.6.4. Световой метод

Электромагнитная индукция не единственный метод передачи энергии на расстоянии, существуют и другие способы. В 2009 году в конкурсе NASA по беспроводной передаче энергии победила технологическая группа, использовавшая 500-ваттный лазерный луч рис.1.9. КПД передачи на 1 км составлял около 10%. Экономным такой метод не назовешь, и это при том, что у технологии есть целый ряд ограничений, начиная от громоздкости и сложности оборудования и заканчивая тем фактом, что приемник должен находиться в зоне прямой видимости передатчика.

Тем не менее эта технология дает возможность гарантированно передавать энергию на достаточно большие расстояния, причем адресно - от точки до точки. Легко представить ситуации, когда проще не тянуть провода на сотни метров в неблагоприятных условиях, а просто установить передатчик и приемник и отправлять энергию напрямую. Перед этой технологией открываются перспективы в космической области (именно поэтому ею и интересуется NASA).

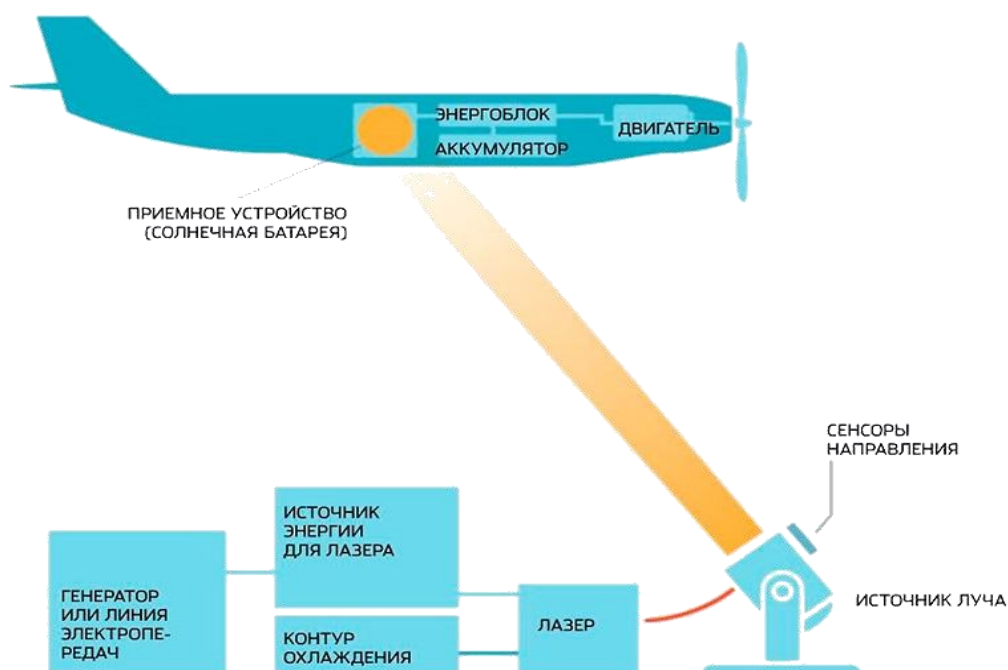


Рис. 1.9. Схема передачи энергии беспилотнику посредством лазера.

А компания PowerBeam уже сегодня готова осуществить беспроводное освещение квартир, зарядку телефонов и крупных бытовых приборов. Их методика основана на инфракрасном лазерном луче, переносящем электроэнергию от передатчика к приемнику. PowerBeam предлагает три варианта передачи:

- передача 100 мВт (наушники, игровые контроллеры, датчики дыма);
- передача 2,5 Вт (смартфоны, КПК, нетбуки, беспроводные колонки);
- передача 10 Вт (ноутбуки, LED-телевизоры, цифровые фоторамки).

Технология позволяет питать устройства на расстоянии до 30 м. В случае, если на пути луча встанет человек или животное, обратная связь (менее мощный луч от приемника к передатчику) автоматически выключит питание.

1.6.5. Метод микроволнового излучения

Применение сверхвысоких частот для передачи электроэнергии - это относительно несложно. Любой обладатель микроволновой печи может (с риском для прибора и пробок) положить в камеру металлический предмет - например, простую стальную вилку - и увидеть, как будут искрить зубцы. Но применять этот эффект можно не только для опасных фокусов, но и на благо всего человечества: в данный момент разрабатывается несколько глобальных проектов, в которых предполагается развертывание в космосе станций аккумулирующих солнечную энергию и передающих ее на Землю в виде узкого пучка микроволн.

Подобный принцип неоднократно демонстрировался в лаборатории. Известен опыт американского физика Уильяма Брауна, который в 1976 году

передал СВЧ-пучком энергию (рис.1.10) мощностью 30 кВт на расстояние более 1,5 км.

В качестве приемника при таком методе применяется так называемая ректенна (rectifying antenna, выпрямляющая антенна), способная преобразовывать энергию улавливаемой волны в электроэнергию (сегодня ректенны используются, например, для радиочастотной идентификации, RFID). Но есть у данного метода недостатки. Например, чтобы передать с орбиты 5 ГВт, придется построить наверху передающую антенну диаметром в 1 км, а на Земле - 10-километровый приемник.

Технологии передачи электричества с помощью инфракрасного лазера и ультразвука, скорее всего, будут развиваться и наверняка найдут свои узкие ниши - вполне возможно, даже в быту. Орбитальные спутники с огромными солнечными батареями потребуют другого подхода - там уже будет иметь значение возможность прицельной передачи электроэнергии, а значит, в дело вступят СВЧ или лазер. Идеального решения пока не существует, но есть много вариантов, каждый из которых имеет свои преимущества и недостатки.

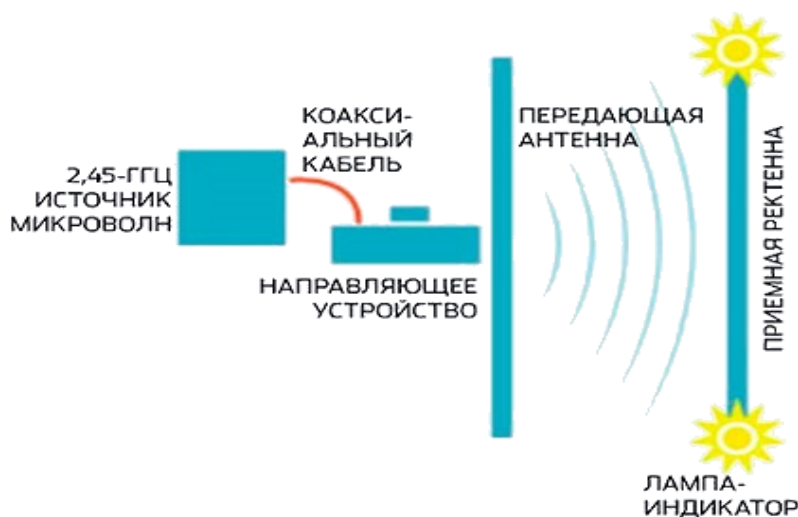


Рис 1.10. Схема опыта Уильяма Брауна по передаче энергии посредством микроволн.

1.6.6. Звуковой метод

В июне 2011 года две студентки Пенсильванского университета - Мередит Перри и Нора Дуэк - продемонстрировали на технической конференции D9, проводимой The Wall Street Journal, способ передачи электричества с помощью ультразвука. Пока что результаты не слишком впечатляют: им удалось передать полезную мощность всего в 0,25 Вт на расстояние чуть меньше одного метра. Кроме того, эта энергия «транслируется» не адресно, а широким лучом, и во время презентации авторы указали, что лучшим местом для установки передатчика будет потолок комнаты. Тем не менее этот способ имеет интересные перспективы. Он безопасен для человека и может использоваться в тех случаях, когда другие способы невозможны - например, в жидких проводящих средах, скажем, для питания различных датчиков на дне акватории или имплантатов в человеческом организме.



Рис 1.11. Схема передачи электроэнергии с помощью ультразвука

В данный момент технология уже получила название - uBeam, создана одноименная компания и проводятся исследования, причем некоторые источники (в том числе журнал Forbes и руководство агентства DARPA) считают их многообещающими. Предполагается, что в ближайшее время будет достигнута мощность передачи в 25 Вт.

**2. РАЗРАБОТКА И МЕТОДЫ
УСТРОЙСТВ
БЕСКОНТАКТНОЙ ЗАРЯДКИ
ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ**

2.1. 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.

В зависимости от того, где расположен источник излучения, область распространения электромагнитного поля можно разделить на две основные зоны: ближняя и дальняя зоны. Ближняя зона – зона индукции, ограничивается расстоянием равным $\lambda \pi / 2$, где λ – длина волны (рис. 2.1). Также на границе раздела ближней и дальней зон существует переходная промежуточная зона, в которой зона индукции, т.е. ближняя зона переходит в зону излучения.

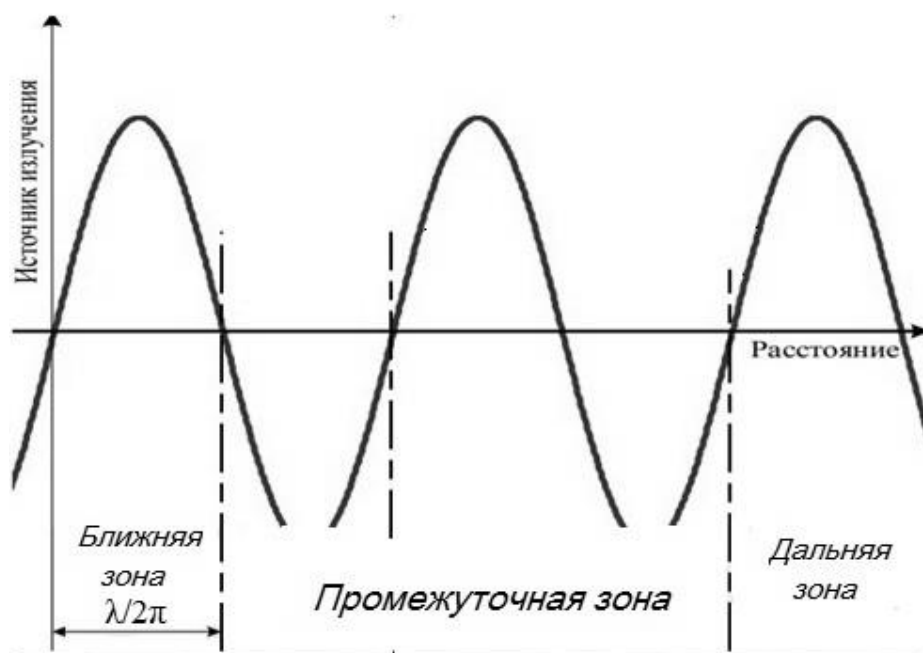


Рис. 2.1. Распространение электромагнитной волны. Ближняя и дальняя зоны

Протяженность ближней зоны рассчитывается по выражению согласно:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2.1)$$

где, C – скорость света, равная $3 \cdot 10^8$ м/с;

f - частота распространения электромагнитной волны, Гц.

Например, при частотах электромагнитной волны 1, 10 и 100 МГц протяженность ближней зоны составит примерно 300, 30 и 3 м соответственно. Рассмотрим более подробно явление электромагнитной индукции, которое используется в системах беспроводной передачи энергии от источника питания к приемнику на примере индуктивно связанных элементов цепи.

Передачу энергии можно представить в виде двух индуктивно связанных катушек.

Когда электрический ток в первой катушке изменяется, меняющийся ток создаёт переменное магнитное поле. Вторая катушка в доступном для него магнитном поле будет испытывать эти изменения магнитного поля как изменения связанного с ним магнитного потока $d\Phi_B / dt$. Электродвижущая сила, возникающая во второй петле, называется индуцированной ЭДС или ЭДС трансформатора. Если два конца этой петли связать через электрическую нагрузку, то через неё потечёт ток.

2.2. Индуктивно связанные элементы цепи

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 (рис. 2.2).

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 пронизывается линиями магнитного поля приемную катушку. Таким образом, даже при весьма малых расстояниях такая связь между катушками становится неэффективной.

Степень индуктивной связи двух элементов цепи оценивается коэффициентом индуктивной связи k , который описывается следующим отношением:

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 \cdot L_2}} \quad (2.2)$$

где, M - взаимная индуктивность элементов цепи;

L_1, L_2 - индуктивность первого и второго элементов цепи

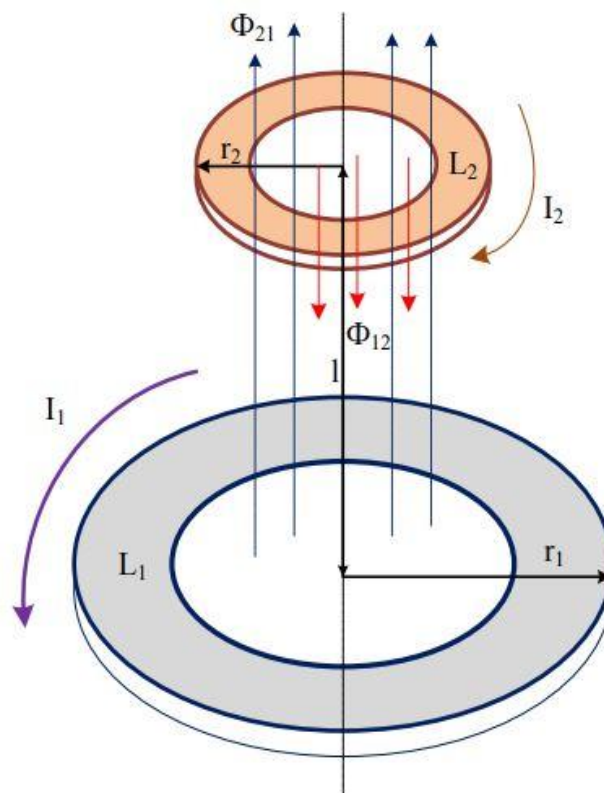


Рис. 2.2. Система двух индуктивно связанных катушек

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).

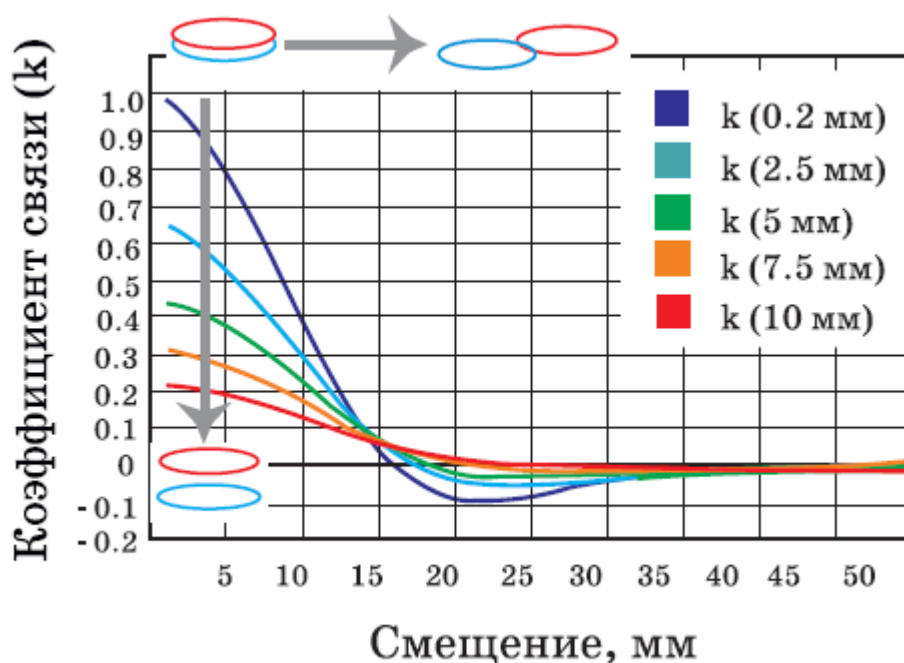


Рис. 2.3. Графики зависимости коэффициента связи от смещения катушек

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.

2.3. Резонанс в индуктивно связанных контурах

В устройствах электроники и радиотехники наряду с одиночными последовательными и параллельными контурами применяются и связанные контуры. Контур может иметь индуктивную связь (трансформаторную или автотрансформаторную) или емкостную различного вида. Рассмотрим резонансные явления для случая двух одинаковых контуров, имеющих индуктивную (трансформаторную) связь (рис. 2.4).

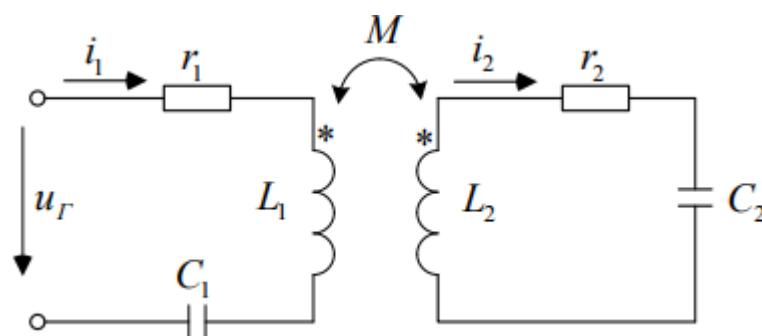


Рис.2.4. Упрощенная эквивалентная схема индуктивно связанных катушек

В электрической схеме индуктивно связанных контуров (рис. 2.4) представлены следующие параметры:

i_1, i_2 - ток протекающей по обмотке, А;

r_1, r_2 - активное сопротивление проводника, Ом;

L_1, L_2 - индуктивность обмотки, Гн;

C_1, C_2 - емкость обмотки, Ф;

M - взаимная индуктивность элементов цепи;

u_2 - напряжение на источнике, В.

Где индекс параметров электрической схемы 1 и 2 обозначает первичную и вторичную обмотку.

Режим цепи определяется двумя уравнениями:

$$\left. \begin{aligned} (r + jx) \cdot I_1 - j\omega MI_2 &= U_1; \\ (r + jx) \cdot I_2 - j\omega MI_1 &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (2.3)$$

где, $x = \omega L - 1/\omega C$.

При частоте $\omega_1 = \omega_2 = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}} = \omega_0$ у каждого контура $x = 0$ (каждый настроен в резонанс) – так называемый «полный резонанс».

$$\left. \begin{aligned} r \cdot I_1 - j\omega M \cdot I_2 &= U_1 \\ r \cdot I_2 - j\omega M \cdot I_1 &= 0 \end{aligned} \right\} \Rightarrow$$

$$I_2 = j\omega M \cdot I_1 / r$$

$$r \cdot I_1 + \frac{\omega^2 \cdot M^2}{r} \cdot I_1 = U_1$$

Из (2.3) следует, что ток $I_{1p} = r \cdot U_1 / (r^2 + \omega_0^2 M^2)$, т.е. совпадает по фазе с напряжением U_1 , и цепь настроена в резонанс. Ток во вторичной обмотке находится как, $I_{2p} = j\omega_0 M \cdot \frac{I_{1p}}{r} = \frac{j\omega_0 M}{r} \cdot \frac{U_{1 \cdot r}}{(r^2 + \omega_0^2 M^2)} = \frac{j\omega_0 M \cdot U_1}{(r^2 + \omega_0^2 M^2)}$

При любой другой частоте из (2.3) ток во вторичной обмотке равен:

$$I_2 = j\omega M \cdot U_1 / [(r + jx)^2 + \omega^2 M^2]$$

В относительных единицах:

$$\begin{aligned} \frac{I_2}{I_{2p}} &= \frac{j\omega M \cdot U_1}{[(r + jx)^2 + \omega^2 M^2]} \cdot \frac{(r^2 + \omega_0^2 M^2)}{j\omega_0 M \cdot U_1} = \\ &= \frac{\omega}{\omega_0} \cdot \frac{r^2 + \omega_0^2 M^2}{[(r + jx)^2 + \omega^2 M^2]} = \omega_* \cdot \frac{r^2 + \omega_0^2 M^2}{[(r + jx)^2 + \omega^2 M^2]} \end{aligned} \quad (2.4)$$

Тогда, поделив числитель и знаменатель на r^2 , получим:

$$\frac{I_2}{I_{2p}} = \omega_* \cdot \frac{1 + \omega_0^2 M^2 / r^2}{(1 + jx/r)^2 + \omega^2 M^2 / r^2}$$

Так как $\frac{\omega_0 M}{r} = \frac{\omega_0 L}{r} \cdot \frac{M}{L} = Q \cdot k$

где, $\omega_* = \omega/\omega_0$ – относительная частота;

Q - добротность каждого из контуров;

$k = M/\sqrt{L_1 \cdot L_2} = M/L$ – коэффициент связи.

Следовательно, подставляя полученные многочлены в выражение (2.4) получается следующее выражение:

$$\frac{I_2}{I_{2p}} = \omega_* \cdot \frac{1+(k \cdot Q)^2}{(1+j\xi)^2+(k \cdot Q)^2} \quad (2.5)$$

где, ξ – обобщенная расстройка.

$$\xi = \frac{x}{r} = \frac{\omega L - 1/\omega C}{r} = \frac{\omega_* \omega_0 L - 1/\omega_* \omega_0 C}{r} = Q \cdot \left(\omega_* - \frac{1}{\omega_*} \right)$$

В выражении (2.5) принято, что при построении резонансной кривой контура с достаточно большой добротностью можно принять множитель $\omega_* = \omega/\omega_0 = 1$ и при вычислении добротности Q считать $\omega L \approx \omega_0 L$, тогда резонансная кривая описывается следующим выражением:

$$\frac{I_2}{I_{2p}} = \frac{1 + (k \cdot Q)^2}{\sqrt{[1 - \xi^2 + (k \cdot Q)^2]^2 + 4 \cdot \xi^2}}$$

Если $k \cdot Q \ll 1$ – сталая связь контуров, то

$$\frac{I_2}{I_{2p}} = \frac{1}{\sqrt{(1 - \xi^2)^2 + 4 \cdot \xi^2}} = \frac{1}{1 + \xi^2}$$

В этом случае, резонансная кривая имеет один максимум при $\xi = 0$, т.е. при $\omega = \omega_0$. Ток I_2 меньше I_{2p} в $\sqrt{2}$ раз (границы полосы пропускания) при

$\xi \pm 0.64$, а у последовательного контура $I/I_p = 1/1 + \xi^2$ и на границах полосы пропускания равны $\xi \pm 1$. Следовательно, полоса пропускания связанных контуров при слабой связи меньше, чем у последовательного контура (рис.2.5).

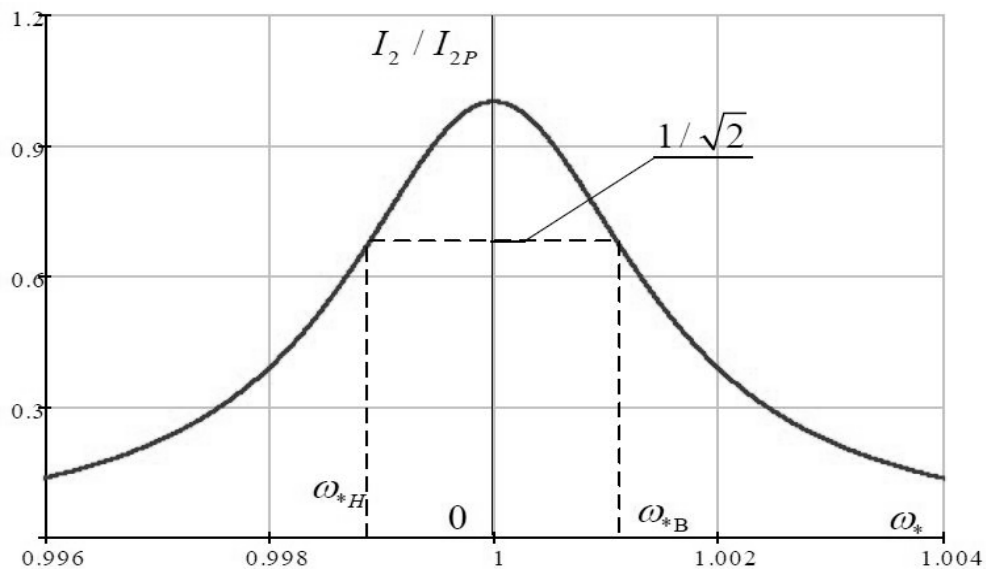


Рис.2.5. Частотная характеристика при слабой связи контуров

При $k \cdot Q = 1$ - критической связи, то

$$\frac{I_2}{I_{2p}} = \frac{1 + 1}{\sqrt{(1 - \xi^2 + 1)^2 + 4 \cdot \xi^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \xi^2/4}}$$

В этом случае на границах полосы пропускания $\xi \pm \sqrt{2}$, т.е. полоса пропускания больше, чем у последовательного контура (рис. 2.6).

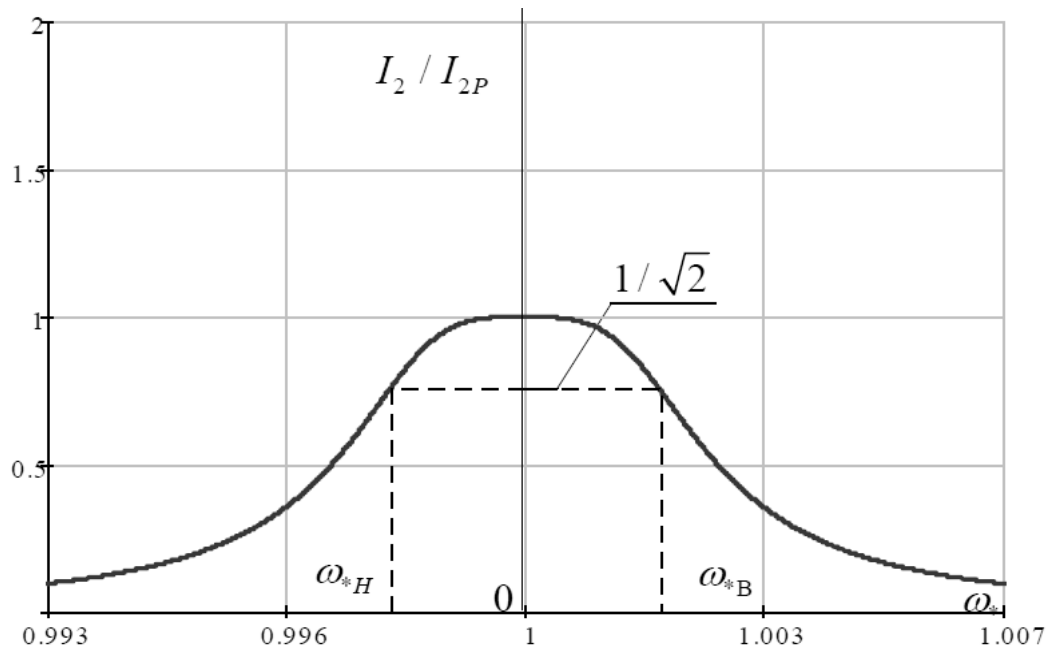


Рис.2.6. Частотная характеристика при критической связи контуров

Если $k \cdot Q \ll 1$ - сильная связь контуров, то получается, что резонансная кривая с двумя максимумами (рис.2.7). Если считать, что на границе полосы пропускания значения тока I_2 , как и в последовательного контура, в $\sqrt{2}$ раз меньше максимального, то получится полоса пропускания $\omega_{*B} - \omega_{*H}$ в 3.1 раза шире и ближе к прямоугольной, чем у последовательного контура при той же добротности контуров, что может важным достоинством цепи при построении систем с большой полосой пропускания (широкополосных).

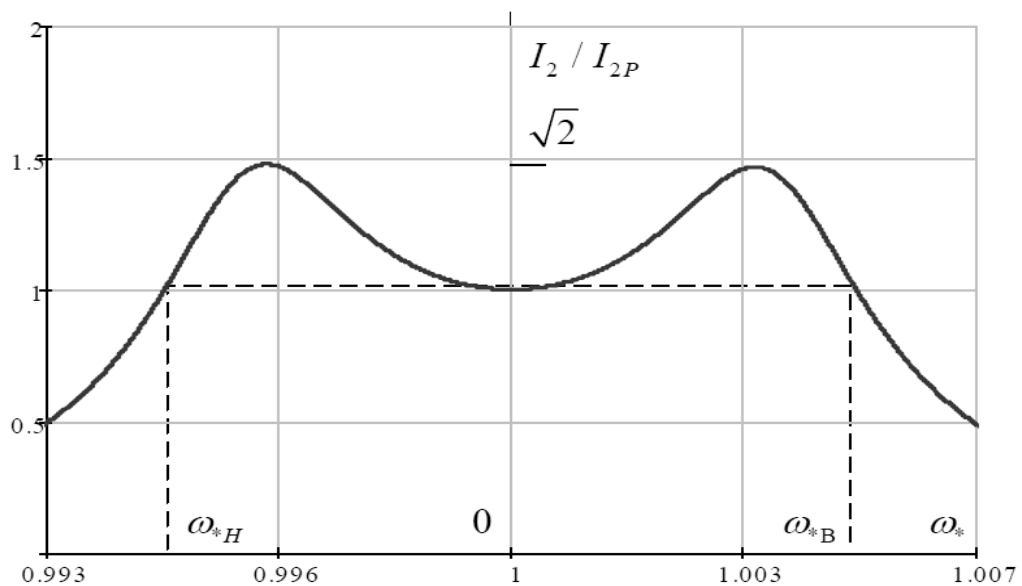


Рис.2.7. Частотная характеристика при сильной связи контуров

Значение тока I_2 зависит от коэффициента связи контуров. Наибольшее значение можно найти обычным исследованием на максимум. Оно получается при $\omega_0 M = r$ и $I_{2p_{max}} = U_1/2r$.

Обобщая вышеприведенные графики частотных характеристик, следует указать, что рассматриваемая цепь обладает «избирательным свойством». Для оценки избирательного свойства цепи применяют понятие ширины резонансной кривой или полоса пропускания контура ($\omega_{*B} - \omega_{*H}$), которую, как правило, определяют разностью верхней и нижней частот, при отношении токов $I/I_{2p} = 1/\sqrt{2}$.

Также на формулу резонансной кривой влияет такой параметр цепи, как обобщенная расстройка контура относительно резонансной частоты ξ , которая полностью зависит от добротности контура Q .

Выводы

1. В настоящее время использование технологий беспроводной передачи энергии находит широкое применение в беспроводной зарядке батарей или устройств, которые требуют частой подзарядки.

2. Наряду со многими методами беспроводной передачи энергии, именно технологии, основанные на явлении электромагнитной индукции, получили наибольшее распространение среди потребителей.

3. Для увеличения эффективности передачи энергии посредством двух индуктивно связанных контуров используют резонансные индуктивные цепи.

4. Коэффициент индуктивной связи k , которым характеризуется система индуктивно связанных контуров, зависит от расстояния 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.

5. При слабой связи контуров, когда произведение коэффициента связи и добротности контура намного меньше 1 (рис. 2.5), четко наблюдается

свойство избирательности контура, т.е. при достаточно высокой добротности контура пик резонансной кривой становится более острым, чем обуславливаются лучше «избирательные свойства» контура.

2.4. Индуктивный метод в качестве бесконтактной передачи энергии при зарядке электромобиля

Широко используемым видом возобновления электрической энергии батарей являются зарядные станции для электромобилей. Такие станции безусловно являются лидерами в видении восстановления заряда после его истощения в системе аккумулирования, но далеко не последними. Минус таких энергопунктов их стационарность и недоступность в критических ситуациях истощения движущей энергии электротранспорта.

Решением данной проблемы может стать внедрение внеконтактной зарядки автотранспорта путем применения беспроводных зарядных станций, работа которых основана на следующем принципе: электрический ток в момент движения его по проволоке катушки-ретранслятора (панели для беспроводной зарядки) возбуждает электромагнитное поле. Полученное таким образом поле является непосредственным транспортировщиком электроэнергии от одной катушки-передатчика, находящегося на земле или же смонтированной под грунтом поверхности, к другой, т.е. катушке-приемнику (индуктивное приемное устройство), размещенному в нижней части автомобиля, без какого-либо физического соединения (рис. 2.8).

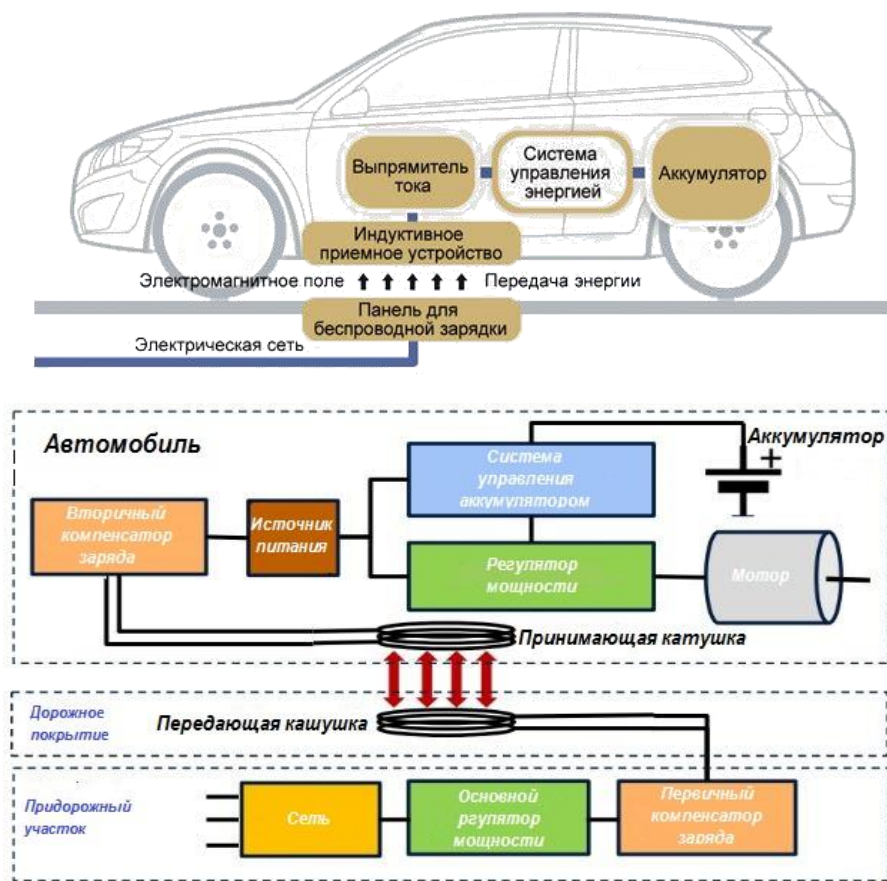


Рис 2.8. Принципиальная схема беспроводной зарядной станции.

После протекания приведенных процессов электроэнергия, пройдя через выпрямитель тока, запасается непосредственно в батарее благодаря системе управления энергией. В настоящее время технологии беспроводной зарядки электрокара мощностью 50 кВт позволяет в полной мере восполнить заряд аккумулятора в течение 2,5 часов.

Данная инновационная система зарядки может быть совершенно независима от исполнительно-ходовой автоматики автомобиля. Таким образом, проблемы потери тока и короткие замыкания совершенно исключены. Также отсутствует проблема дискомфорта работы с кабелями, к тому же данный блок беспроводной зарядки способен поддерживать заряд аккумуляторных систем в самой экстремальной ситуации, либо попросту в месте парковки. Вдобавок ко всему используются магнитные поля высокой частоты в качестве транспортировки энергии, передающиеся через воздушный зазор порядка 160 мм, сконцентрированы и экранированы от

воздействия на них инородных полей-утечек, которые стремительно затухают на уровнях меньших предельно допустимых значений в общественных зонах.

Основополагающей деталью дистанционных зарядных станций является применение радиосвязующего взаимодействия в канале обратной связи регулятора мощности с дополненными алгоритмами программного управления.

Технической задачей является унификация автоматических систем с сохранением конструкции принимающей стороны, фиксированных настроек транслирующей катушки, а также восстановление, выборка и организация системы хранения рекуперативной энергии. На данный момент совершенствуется эффективность катушек, силовой электроники преобразователя и систем связи.

Сущность передачи энергии от транслятора к приемнику заключается в использовании резонанса электромагнитного поля индуктивным способом. Последние показатели исследований засвидетельствовали, что передача электроэнергии мощностью 10 кВт через воздушную прослойку на расстоянии 160 мм типа «dc-to-dc» составляет потери лишь 5% от общего количества. При передаче энергии от катушки к катушке «coil-to-coil», эффективность составляет 90%, а при передаче типа «end-to-end» до 85 %, что свидетельствует о высоких показателях коэффициента полезного действия системы.

На рис.2.9. продемонстрирована блок-схема исходной системы бесконтактной транспортировки электроэнергии.

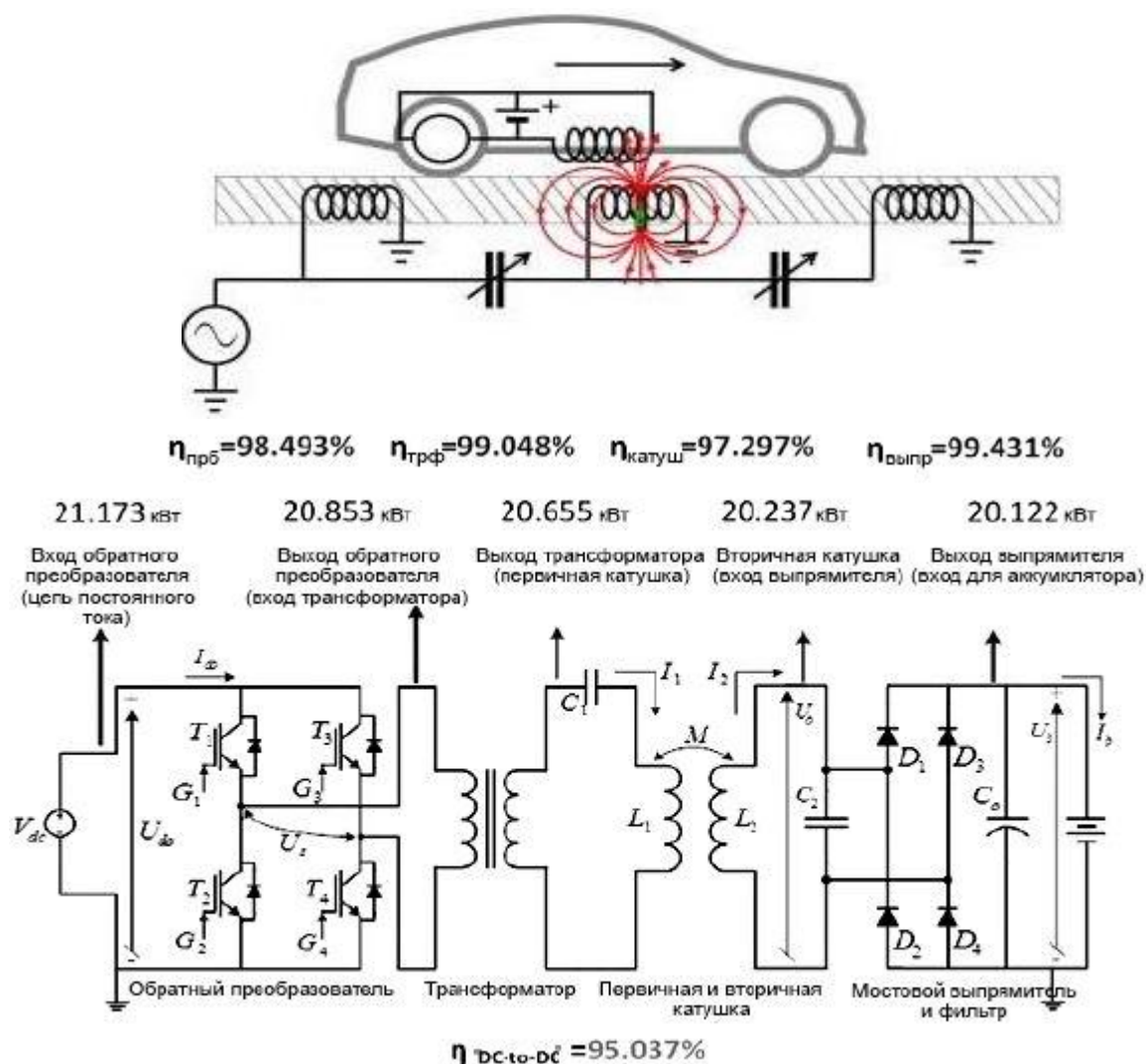


Рис 2.9. Схема системы бесконтактной транспортировки электроэнергии

Представленная конструкция беспроводной передачи заряда состоит из конденсатора, первичного выпрямителя, выполняющего коррекцию коэффициента мощности одновременно преобразователя и трансформатора энергии, а также первичной катушки. Вторичная принимающая катушка, располагающаяся в корпусе автомобиля, включает в себя подстроечный конденсатор, высокочастотный диодный выпрямитель и конденсатор, являющийся фильтром системы.

В роли активного выпрямителя с коррекцией коэффициента мощности (рис.2.10) задействована лишь левая его часть, правая же используется в

качестве диода. Данная конструкция форсирует пиковые значения напряжения до 8-10 раз.

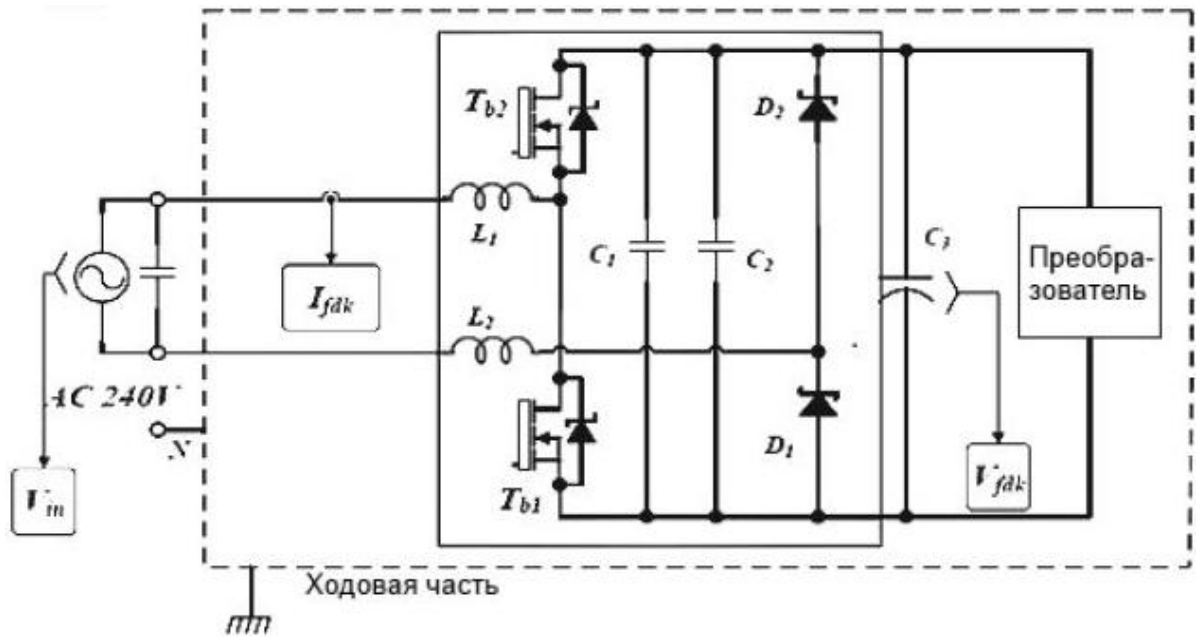


Рис 2.10. Блок-схема активного выпрямителя тока.

2.5. Векторная иллюстрация возбужденного электромагнитного поля

Принцип действия электромагнитных катушек базируется на векторной интерпретации магнитного потенциала в определенной точке поля, возбужденного протеканием первичного тока в первичной катушке (рис. 2.11).

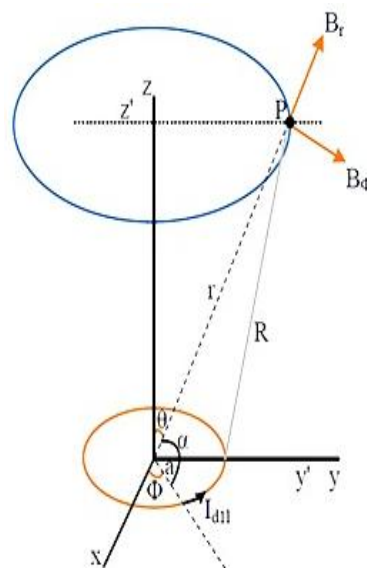


Рис 2.11. Векторная иллюстрация возбужденного электромагнитного поля.

Для принимающей и транслирующей катушек с радиусами a , являющихся сечением проводника и имеющих расстояние между катушками z , радиус вектор от первичной катушки до точки поля будет равен:

$$r = \sqrt{a^2 + z^2} \quad (2.6)$$

В точке поля P вектор магнитного потенциала $\vec{B}\phi$ зависит от исходного радиуса первичной катушки, полного тока, угла поднятия витка θ и обратной квадрату расстояние между катушками.

Несмотря на эти зависимости, плотность потока $B = f(r; \theta)$ и полный поток энергии Φ воспринимающей катушки имеют непосредственное соотношение к производительности зарядной установки и могут быть определены по формуле:

$$B(r; \theta) = r\mu_0 N_1 I_1 a_1 (\cos \theta + \sin \theta) \quad (2.7)$$

где, μ_0 - коэффициент мощности;

N_1 - первичное возбуждение в транслирующей катушке;

I_1 - сила тока в транслирующей катушке.

Нагрузочные параметры, а именно качественная и количественная характеристика заряда батареи электромобиля и постоянства потокосцепления между транслятором и приемником определяется частотным откликом системы беспроводной зарядной установки. Итоговое значение мощности полученной от приемника электроэнергии устанавливается частотой переключения усилителя заряда и рабочим циклом входного напряжения. Данная зависимость выражается следующим образом:

$$U_1(t) = \frac{4U_{do}}{\pi} \sin\left(\frac{d\pi}{2}\right) \cos(\omega t) \quad (2.8)$$

где, U_1 - напряжение в транслирующей катушке;

U_{do} - напряжение постоянного тока на усилителе заряда;

d - коэффициент заполнения импульсов;

ω - угловая частота.

Чаще всего напряжение усилителя заряда регулируется через цепь постоянного тока с помощью активного выпрямителя. Конечной целью является достижение наилучших эксплуатационных показателей с точки зрения мощности и эффективности при изменении частоты данного усилителя.

Таковы основополагающие конструктивные и электромеханические зависимости беспроводных зарядных устройств в передаче электроэнергии от сетевого обеспечения к конечной цели – системе аккумулирования электроэнергии электромобиля, предполагающие наилучшую на данный момент эффективность. Последними наработками инженеров автомобилестроения стали несколько вариантов таких конструкций: бесконтактная зарядная станция «WiTricity» создана для восстановления заряда путем транспортировки электроэнергии, задействуя переменное магнитное влияние с помощью резонатора, возбуждающего магнитное поле в диапазоне 300 кГц до 20 МГц. Доставка электроэнергии производится передатчиком, монтируемым в напольном сооружении; за восприятие отвечает приемник, установленный непосредственно в электротранспорте. Похожий вариант зарядной установки «Wireless Electric Vehicle Charging» («WEVC») аналогично базируется на применении варианта возбудителя электроэнергии переменного магнитного поля. Отличием от конкурирующих систем стало размещение сетевого адаптера не только в плоскости поверхности, но и непосредственно в грунте опорной площадки. Приемная же катушка, как и свойственно, располагается на борту транспортного средства.

2.5. Применение индуктивного метода в качестве бесконтактной передачи энергии электромобилям на проезжих частях

В настоящее время в Великобритании под активным влиянием компании «Highways England» запущен проект по строительству дорожного покрытия со встроенными беспроводными зарядными устройствами, которые дадут возможность зарядки электротранспорта, оснащенного всем необходимым техническим оборудованием, в момент его движения от придорожного энергоснабжения (рис.2.12). Данный проект, учитывая успех беспроводной зарядной станции в стационарной эксплуатации, является началом масштабного практического применения технологии беспроводного аккумулирования электроэнергии. Активные действия по внедрению данной системы стали результатом экономического анализа выгоды реализации идеи с учетом проблем, связанных со стандартизацией разработанного оборудования. Приведенные разработки являются лишь началом инновационной деятельности, и в случае успеха кампании планируется расширить сеть подобных дорог, базирующихся на максимальном расстоянии 25 километров друг от друга. Тестирование дорог завершится сразу после их строительства, что покажет целесообразность данной идеи, либо выявит ее локальные недостатки, требующие непосредственного решения.

В итоге, данная инновационная технология, решающая проблему длительности эксплуатации электротранспорта, преодолела основные препятствующие барьеры – экономический, технический и стандартизационный, что позволяет задуматься о приоритете использования электротехнического транспорта в качестве альтернативного.



Рис.2.12. Фото дорожного покрытия со встроенными беспроводными зарядными устройствами.

В 2015 году в Великобритании был предложен другой проект дороги для электромобилей, предполагающий беспроводную подзарядку во время движения — Dynamic Wireless Power Transfer (DWPT).



Рис.2.13. Схема беспроводной зарядки электрических автобусов, эксплуатирующихся в Милтоне, Великобритания.

В него заложен тот же принцип, что и в беспроводную зарядку для смартфонов: под трассой находятся катушки индуктивности, создающие

магнитное поле, в то время как конструкция машины подразумевает переработку электромагнитных волн в электроэнергию.

В 2013 году в городе Куме в Южной Корее была открыта электрическая дорога, на двенадцати километрах которой используется тот же самый способ передачи электричества от трассы к машине.

Этот же принцип был основным при разработке системы электродорог The Slide-in Electric Road System, проектом которой занимался концерн Volvo Group из Швеции.

Также в Великобритании, в ближайшем будущем планируется открыться множество новых зарядных станций для электромобилей — приблизительно каждые тридцать километров дороги. Что не удивительно, ведь в 2015 году количество желающих приобрести электрокар выросло на 60%, а в этом году должен вырасти еще на 46% (по информации Bloomberg). Стоит отметить, что на данный момент в таких странах, как Китай, США, Япония, Нидерланды, Великобритания, Франция, Германия и Норвегия существуют 160 000 зарядных станций.

Израильский стартап ElectRoad начал строительство дороги, которая заряжает электромобили, в Тель-Авиве.

Проект был запущен еще в сентябре 2015 года, но для начала строительства потребовался ряд тестирований, который разработчики проводили вплоть до начала 2017 года.

Процесс установки начинается с асфальтовой фрезы, который выкапывает 8-сантиметровую глубокую траншею. Вторая машина устанавливает полосы беспроводной зарядки и заполняет траншею обратно асфальтом. Интеллектуальные преобразователи с онлайн коммуникацией установлены по бокам дороги. Блок катушки крепится под электрическим транспортным средством и получает энергию, передаваемую через небольшой воздушный зазор 24 сантиметра. Излучение сведено к минимуму, так как катушки локально экранированы от водителя и пассажиров для безопасности.

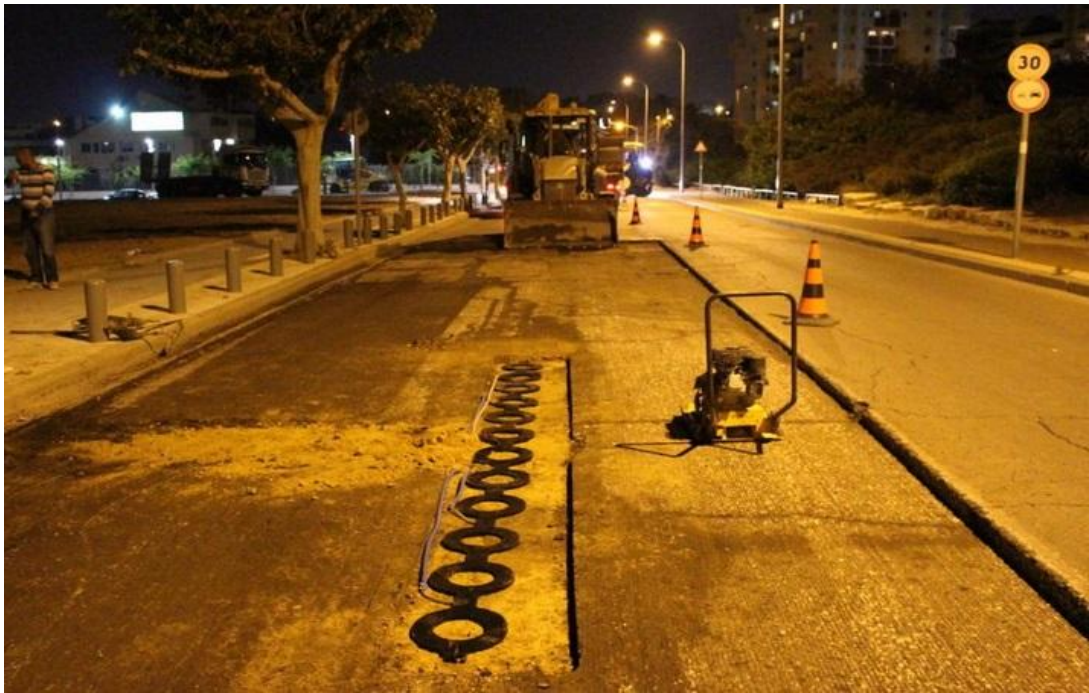


Рис.2.14. Фото укладки индуктивных катушек в асфальт

Electroad планирует сосредоточиться на общественном транспорте, прежде чем применить технологию для частного транспорта. Стартап успешно провел испытания своей технологии с электрическим автобусом пять месяцев назад в Тель-Авиве и открыл 20 метров модернизированной электрической дороги за пределами своей лаборатории.

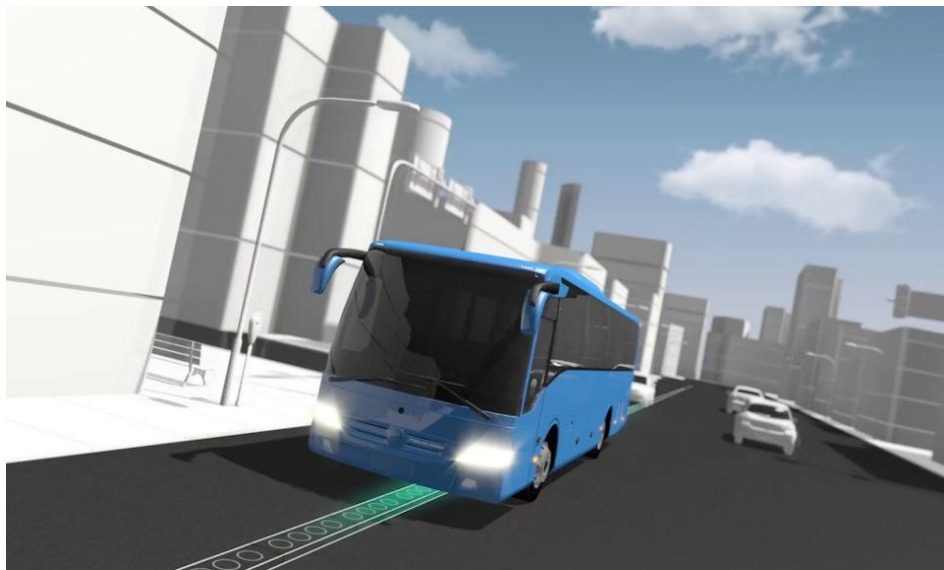


Рис.2.15. Модель беспроводной зарядки электрического автобуса Electroad, эксплуатирующихся в Тель-Авиве

Вскоре компания будет проверить технологию на общественном электрическом автобусе на одном из маршрутов в Тель-Авива. Так как автобус будет ездить по электрическим дорогам, это не нужно будет подзарядить, хотя он и будет иметь небольшую батарею для того чтобы автобус все таки мог проехать до пяти километров без электрического питания от дороги.

Система беспроводной зарядки на автомагистралях даст возможность обеспечить максимальное удобство для потребителей. Кроме того, эта технология позволит реализовать элементы автоматического управления автомобилем. Такие как следование электромобиля заданным курсом по «виртуальным рельсам», соблюдение дистанции и т.д.

Доказана возможность беспроводной зарядки на скорости до 100 км/ч, что вполне соответствует скоростному режиму на большинстве автотрасс, и, во-вторых, скорость транспортных средств не влияет на скорость зарядки.

Стоит отметить и ее безопасность, так как отсутствуют электрические искры, способны вызвать проблемы при зарядке в опасной среде. Кроме того, нет зависимости от качества электрических контактов: смазка, пыль и коррозия на контактах остаются проблемами классических методов зарядки.

Компания Toshiba приступила к эксплуатационным испытаниям электрического автобуса с магнитно-резонансным зарядным устройством. Автобус японской марки Hino с 45-местным салоном оснащен литий-титанатной батареей, которую Toshiba продвигает под торговым названием Super Charge ion Battery (SCiB). Сейчас он работает челноком на 11-километровом маршруте между одним из филиалов авиакомпании All Nippon Airways в Тономачи и токийским аэропортом Ханеда.



Рис.2.16. Экспериментальный автобус и его зарядная станция

Бесконтактная зарядка создана совместно с токийским университетом Васэда. «База» смонтирована на месте для стоянки автобуса на одном уровне с асфальтом, а ответная часть установлена под днищем. Подобная система отличается от обычных индукционных «зарядок», которые применяются в мобильных телефонах. Toshiba использует явление магнитного резонанса: такое устройство позволяет передавать энергию на большее расстояние и менее чувствительно к взаимному расположению передатчика и приемника.

Запас хода у автобуса составляет 89 км, но полная зарядка длится всего 15 минут. С учетом того что в день экспериментальный автобус совершает всего три рейса, таких параметров вполне достаточно для «нормальной жизни».

2.6. Безопасность и влияние на здоровье человека применение бесконтактных способов передачи энергии

Поскольку в системах беспроводной зарядки нельзя исключить электромагнитное излучение, вполне уместен вопрос, насколько такие системы безопасны для здоровья человека и не подвергается ли он воздействию больших и, возможно, потенциально опасных электромагнитных полей при их использовании.

Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ) играет ведущую роль в разработке норм и согласованных рекомендаций допустимых уровней облучения человека. Вместе с тем, имеется ряд региональных и международных организаций, которые в спецификациях, созданных в соответствии с рекомендациями ВОЗ, регламентируют уровни облучения человека. В их число входит авторитетный Институт инженеров по электротехнике и электронике (IEEE) и Международная комиссия по неионизирующим излучениям (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection – ICNIRP). Один из важнейших показателей, определяющих вредное воздействие на человека электромагнитного облучения, – уровень SAR (Specific Absorption Rate – удельного коэффициента поглощения электромагнитной энергии), определяющий энергию электромагнитного поля, поглощаемую в тканях тела человека за одну секунду, вызывающую нагрев тканей. Допустимые значения удельного коэффициента поглощения, рекомендованные Федеральной комиссией связи (Federal Communication Commission – FCC) и комиссией ICNIRP, даны в табл.2.1 Приведенные в таблице рекомендованные нормы определяют допустимые значения SAR, гарантирующие отсутствие неблагоприятных последствий для человека, независимо от его возраста и состояния здоровья, при воздействии электромагнитного облучения на разные участки тела.

В научных исследованиях и докладах, представленных как IEEE, так и ICNIRP, нет подтверждения того, что воздействие радиочастотного (до 300 ГГц) электромагнитного поля вызывает рак. Однако имеется множество доказательств того, что при электромагнитном облучении может повышаться температура тела человека или отдельных его участков (тканей, органов). Электромагнитное облучение также может воздействовать на нервы и стимулировать мышечные ткани. Кроме того, электромагнитные поля оказывают неблагоприятное влияние на сетчатку глаза.

Рекомендованные значения удельного коэффициента поглощения

Организация	Удельный коэффициент поглощения (SAR), Вт/кг		
	Все тело	Голова, туловище	Конечности
FCC	0.08	1.6 (1 г)	4.0 (10 г)
ICNIRP	0.08	2.0 (10 г)	4.0 (10 г)

В результате многочисленных исследований (IEEE, ICNIRP) было определено, что при воздействии излучения даже на самые чувствительные участки тела человека при среднем уровне SAR менее 4 Вт/кг не проявляется негативное воздействие, однако оно может приводить к повышению температуры тела максимум на один градус при нормальных условиях окружающей среды. Тем не менее, чтобы обеспечить "запас прочности", который бы компенсировал, возможно, еще неполные имеющиеся сегодня научные данные, а также, чтобы успокоить общественное мнение, IEEE и ICNIRP рекомендовали установить значение SAR на уровне менее 0.4 Вт/кг для работников, занятых на производстве, и 0.08 Вт/кг для массового потребителя. Кроме того, в табл. 2.1 приведены рекомендованные значения SAR для некоторых участков тела человека.

Конструкция и принцип работы беспроводных зарядных устройств обеспечивают высокую безопасность. Эффективный радиус действия выпускаемых сегодня систем не превышает нескольких миллиметров, а мощность электромагнитного излучения быстро затухает при удалении от источника. Поэтому беспроводные зарядные устройства не опаснее, чем ставшие привычными микроволновые печи и мобильные телефоны.

**3. РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ
УПРАВЛЕНИЯ
БЕСКОНТАКТНОЙ ПЕРЕДАЧИ
ЭНЕРГИИ**

3.1. Автономный инвертор

Энергообеспечение электромобиля с использованием бесконтактного способа передачи электроэнергии имеет ряд преимуществ перед другими техническими решениями. К предпочтениям бесконтактного способа можно отнести полное отсутствие проводов, меньше технического обслуживания и др.

Вместе с тем, необходимость выполнения при таком способе передачи дополнительных определенных преобразований электроэнергии, а также требование размещения преобразователей в герметичных контейнерах ограниченного объема ставят ряд характерных задач. Эти задачи связаны с необходимостью решения вопросов ограничения перенапряжений в преобразователях при указанных конструктивных особенностях, а также обеспечения допустимых тепловых режимов нагруженных элементов преобразователей при минимизации габаритов устройства.

В общем случае структуру электрической схемы системы бесконтактной передачи электроэнергии на электромобиль можно представить, как показано на рис. 3.1.

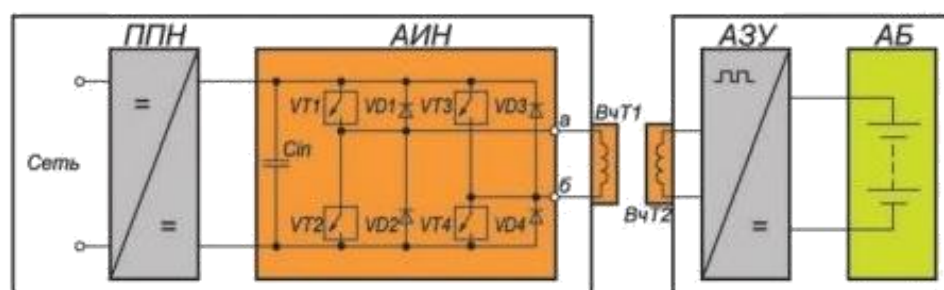


Рис.3.1 Структурная электрическая схема бесконтактной передачи электроэнергии

От сети питание поступает на первичный преобразователь напряжения (ППН), который формирует необходимое напряжение на входе АИН. Конденсатор C_{in} , подключённый параллельно входным зажимам АИН, необходим для сглаживания коммутационных выбросов и защиты инвертора от перенапряжений. На выходе инвертора подключен трансформатор с

разделёнными первичной (ВчТ1) и вторичной (ВчТ2) частями. К вторичной обмотке трансформатора ВчТ2 подключено автоматическое зарядное устройство (АЗУ), которое обеспечивает заряд аккумуляторной батареи (АБ).

Далее в магистерской работе будет более детально описаны главные элементы системы беспроводной передачи энергии для зарядки электромобиля.

Автономный инвертор напряжения преобразует напряжение постоянного тока в выходное напряжение переменного тока, которое имеет прямоугольную форму и подводится к первичной обмотке трансформатора. При проектировании инвертора важной задачей является обеспечение его защиты от перенапряжений, уровень которых зависит от паразитных индуктивностей монтажа и частоты переключений. Определение типа снабберных цепей и их параметров также является неотъемлемой частью проектировки АИН. Для управления электронными ключами (транзисторами) инвертора применяются драйверы. Во избежание прохождения сквозного тока через одну из стоек моста драйвер управления должен формировать необходимый интервал, известный как «мёртвое время». Способы гальванической развязки драйвера и ключа инвертора могут быть различными. Это, например, может быть бутстрепная схема или оптическое разделение изолированных каналов для верхнего и нижнего плеча каждой стойки инвертора. Общее требование, предъявляемое к любому из этих способов, заключается в обеспечении смещения уровня управления верхними ключами стоек моста.

Как было отмечено, в рабочем режиме для обеспечения максимальной передачи электроэнергии бесконтактным способом необходимо расположить первичную и вторичную части трансформатора на одной оси и на минимальном расстоянии друг относительно друга, что соответствует максимальному значению коэффициента k магнитной связи между обмотками трансформатора. Этот коэффициент определяется выражением:

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} \quad (3.1)$$

где M – взаимная индуктивность между первичной и вторичной обмотками трансформатора,

L_1 и L_2 – собственные индуктивности первичной и вторичной обмоток.

Если пренебречь падениями напряжений в транзисторах и диодах инвертора, то форма и амплитудные значения токов первичной и вторичной обмоток трансформатора определяются формой выходного напряжения инвертора и двумя индуктивностями. Первая из них – это индуктивность L_{1k} первичной обмотки при замкнутой накоротко вторичной обмотке трансформатора, которую можно определить с помощью метода ненаправленных графов.

$$L_{1k} = L_1 - \frac{M^2}{L_2} \quad (3.2)$$

Вторая, передаточная, индуктивность L_{12} определяет ток короткозамкнутой вторичной обмотки трансформатора при подведении напряжения к первичной обмотке (или, наоборот, ток короткозамкнутой первичной обмотки при подведении напряжения к вторичной обмотке). Эта индуктивность также находится с помощью метода ненаправленных графов.

$$L_{12} = \frac{L_1 L_2}{M} - M \quad (3.3)$$

Амплитудные значения токов первичной и вторичной обмоток трансформатора в режиме короткого замыкания определяются как:

$$I_{1кЗА} = \frac{U_1}{4fL_{1k}}; I_{2кЗА} = \frac{U_1}{4fL_{12}} \quad (3.4)$$

где f – частота переменного импульсного напряжения на выходе инвертора.

Действующие значения токов в режиме короткого замыкания связаны с параметрами системы следующими выражениями:

$$\begin{aligned} I_{1КЗ} &= \frac{U_1}{4\sqrt{3}fL_1(1-k^2)}; \\ I_{2КЗ} &= \frac{MU_1}{8fL_1L_2(1-k^2)} \end{aligned} \quad (3.5)$$

Режим холостого хода является вторым крайним режимом работы АИН. Этот режим возникает при отключённой цепи нагрузки. Амплитудное значение тока первичной обмотки в этом режиме определится следующим выражением:

$$I_{1ХХА} = \frac{U_1}{4fL_1} \quad (3.6)$$

Действующее значение тока первичной обмотки трансформатора определится как:

$$I_{1ХХ} = \frac{U_1}{fL_1 \cdot 4\sqrt{3}} \quad (3.7)$$

Одним из известных способов разгрузки силовых ключей инвертора является включение резонансной цепи на его выходе. Возможно также использование решения, заключающегося в подключении последовательной резонансной цепи параллельно первичной обмотке трансформатора (точки *a* и *b* на рис. 3.1). Особенность отмеченной последовательной резонансной цепи заключается в том, что она практически не изменяет форму и значения токов первичной и вторичной обмоток трансформатора, а влияет на ток инвертора. Такая резонансная цепь имеет собственную резонансную частоту f_{RC} , которая соответствует резонансу напряжений.

$$f_{RC} = \frac{1}{\sqrt{L_{RC}R_{RC}}} \quad (3.8)$$

где L_{RC} и C_{RC} – соответственно индуктивность, и ёмкость резонансной цепи.

Рабочая частота коммутации АИН должна соответствовать резонансу токов в первичной обмотке трансформатора, что обеспечит минимальную токовую нагрузку на транзисторные ключи. Частота коммутации f , соответствующая резонансу токов в режиме холостого хода, определяется следующим выражением:

$$f = \frac{1}{\sqrt{(L_{RC}+L_1) \cdot C_{RC}}} \quad (3.9)$$

По известным формулам можно также определить индуктивность реактора и ёмкость конденсатора последовательной резонансной цепи:

$$L_{RC} = \frac{L_1}{m^2-1}; \quad C_{RC} = \frac{m^2-1}{(2\pi m f)^2 L_1} \quad (3.10)$$

где $m = f_{RC}/f$ – отношение собственной частоты резонансной цепи к рабочей частоте коммутации АИН. Для расчёта параметр m принят равным 1,5. Ниже будет показано, что это значение обеспечивает сбалансированное соотношение между значениями реактивных мощностей конденсатора и индуктивности резонансной цепи и выходной мощности АИН.

Ниже приведена силовая схема автономного инвертора

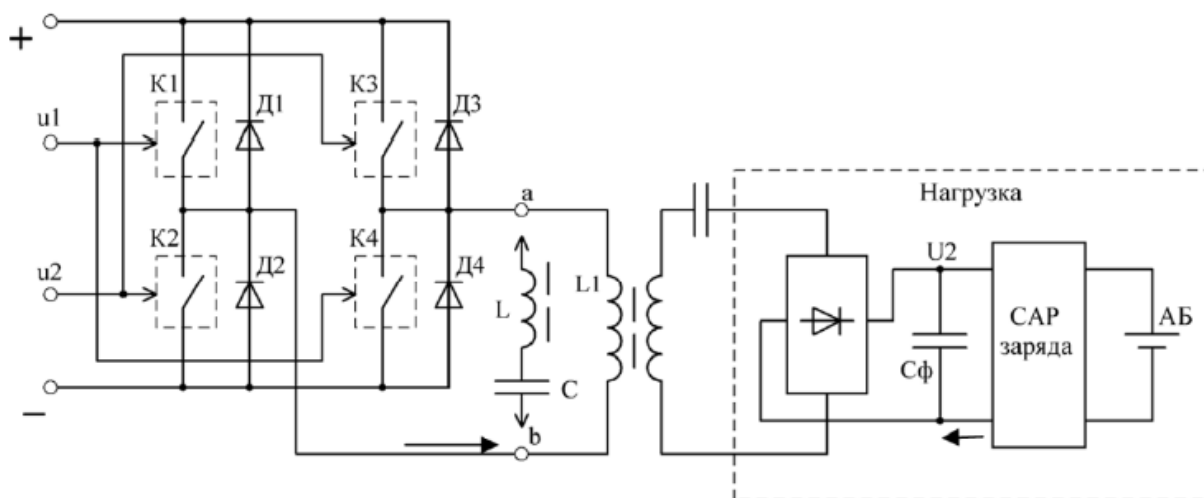


Рис.3.2. Схема силовой части АИН

Результаты моделирования для режима холостого хода трансформатора, иллюстрирующие эффект от введения резонансной LC -цепи, приведены на рис.3.3. Сигналы управления u_1 и u_2 инвертором поступают на диагонально расположенные ключи и имеют интервал «dead time» при переключении, что предотвращает аварийные сквозные токи через ключи одной стойки K_1, K_2 или K_3, K_4 .

Графики на (рис.3.3, а) соответствуют состоянию, когда резонансная LC -цепь отсутствует и к выходу АИН подключена только первичная обмотка трансформатора с собственной индуктивностью L_1 . В этом случае ток в нагрузке изменяется линейно и протекает поочередно через диагональные ключи или через диоды. На (рис.3.3,а) показаны интервалы проводимости ключей (двойная линия) и диодов (пунктир) для этого случая на протяжении одного периода коммутации. Управляющий сигнал u_1 воздействует на входы ключей K_1, K_4 в интервале времени $t_1 \dots t_2$, затем следует пропуск «dead time» в интервале $t_2 \dots t_3$ и далее управление u_2 поступает на ключи K_2, K_3 второй диагонали моста инвертора в интервале времени $t_3 \dots t_4$. Интервалы проводимости ключей и диодов чередуются, при этом ключи каждой диагонали проводят ток при воздействии соответствующего управляющего сигнала u_1 или u_2 после завершения интервала проводимости диодов.

При этом ток инвертора имеет повышенное значение, обусловленное увеличенным током намагничивания трансформатора и относительно единичной амплитуды его действующее значение равно $1/3$. Кроме этого, из (рис.3.3. а) следует, что в момент времени закрывания ключей (момент t_2 для K_1, K_4 и момент t_4 для K_2, K_3) ток через ключи имеет максимальное значение. Это приводит к значительным потерям мощности на ключах в режиме выключения, увеличенному нагреву элементов инвертора и проблемам отвода тепла.

При подключении параллельно первичной обмотке трансформатора резонансной LC -цепи, форма выходного тока инвертора и интервалы

проводимости ключей и диодов изменяются. Для первой гармоники выходного напряжения АИН условие $n_1 = f/f_I = 11$ соответствует резонансу токов в его нагрузке. При этом действующее значение выходного тока инвертора имеет минимальное значение, определяемое активными потерями в цепях протекания тока. Для реального выходного сигнала инвертора в виде меандра минимальное действующее значение тока инвертора достигается при $n_1 = f/f_I > 1$, при этом форма выходного тока инвертора и интервалы проводимости ключей и диодов будут иметь вид как показано на (рис.3.3, б).

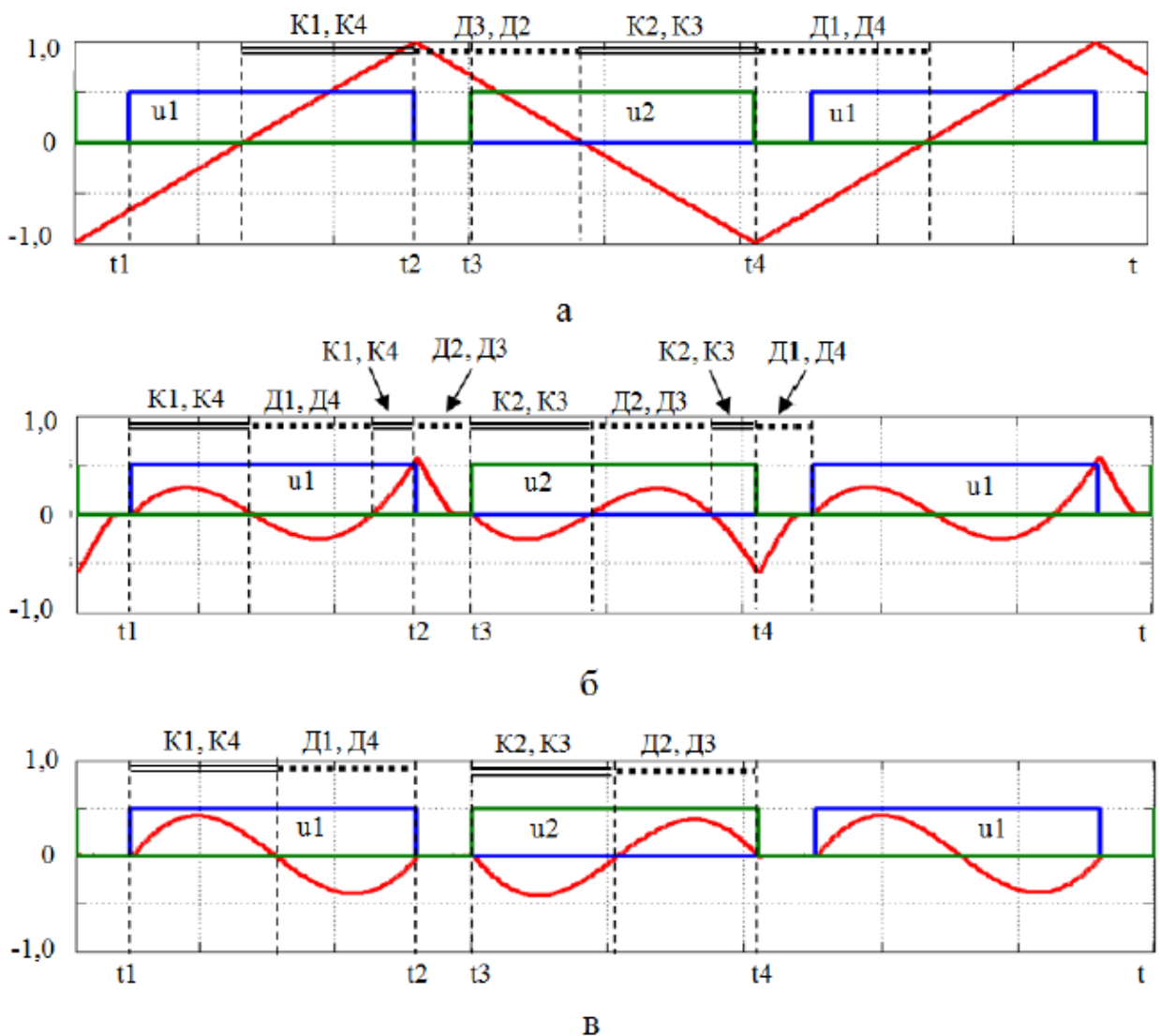


Рис. 3.3. Диаграммы выходного тока АИН при изменении параметров резонансной цепи: а – резонансная цепь отсутствует; б – параметры

резонансной цепи соответствуют относительной частоте $n_1 = 1$; параметры резонансной цепи соответствуют нулевым потерям переключения при $n_1 > 1$

Результаты моделирования показывают, что таким образом можно уменьшить действующее значение тока инвертора примерно в 2,5 раза. Однако соответствующего уменьшения потерь мощности здесь не происходит. Причиной такого результата является форма тока инвертора, при которой, так же как и исходном варианте, в моменты времени t_2 и t_4 выключения ключей ток имеет максимальное значение. Это значение меньше, чем амплитуда пилообразной формы тока на рис. 3,а, и равно примерно 0,6, но этого оказывается достаточно, чтобы суммарные потери в инверторе остались на высоком уровне.

3.2. Высокочастотный трансформатор

Эффективность передачи электрической энергии в значительной степени определяется характеристиками высокочастотного трансформатора ВчТ. Такие параметры трансформатора, как числа витков и сечения проводов первичной и вторичной обмоток, частота переключения инвертора, а также материал и конфигурация магнитопровода, определяющие зависимость напряжения на вторичной обмотке от тока нагрузки, обусловлены рядом факторов. Это заданное напряжение на первичной обмотке трансформатора, ограничения по его габаритам, требуемая мощность и напряжение на нагрузке, окружающая температура и условия охлаждения.

Некоторые вопросы расчета трансформатора и определения его конструктивных параметров можно решить путем аналитического исследования и математического моделирования. Вместе с тем сложность аналитического описания таких характеристик трансформатора, как зависимость эффективности передачи электроэнергии от точности совмещения его первичной и вторичной частей, а также определение значений допустимых токовых нагрузок на провода обмоток трансформатора

при изменении условий охлаждения требуют исследования на макетах в натуральных условиях. Очевидно, что такой подход позволит получить достоверные результаты с наименьшими затратами. Кроме этого, сопоставление результатов теоретического анализа и результатов исследования устройства на макете в натуральных условиях позволяет оценить адекватность принятых математических моделей как инструмента для последующей параметрической оптимизации функциональных узлов устройства передачи электроэнергии.

Зависимость среднего значения напряжения U_2 на выходе выпрямителя устройства от тока нагрузки I_2 можно определить выражением:

$$U_2 = \frac{4\sqrt{L_{2k}M}}{T} \sqrt{(I_{2k} - I_2)\Delta I_1} - 2\Delta U_d \quad (3.11)$$

где T – период выходного напряжения инвертора, M – взаимная индуктивность между обмотками ВчТ, ΔU_d – падение напряжения на одном диоде мостового выпрямителя, L_{2k} – индуктивность вторичной обмотки ВчТ при коротком замыкании на первичной стороне:

$$L_{2k} = \frac{L_1 L_2 - M^2}{L_1} \quad (3.12)$$

L_1, L_2 – собственные индуктивности первичной и вторичной обмоток ВчТ соответственно; I_{2k} – максимальное среднее значение тока нагрузки (ток короткого замыкания):

$$I_{2k} = \frac{U_{1m}M(3T^2 - 4T_f^2)}{(L_1 L_2 - M^2)T} \quad (3.13)$$

U_{1m} – амплитуда переменного напряжения на первичной обмотке ВчТ, T_f – суммарная длительность фронта и спада импульсов напряжения на выходе инвертора; ΔI_1 – приращение тока первичной обмотки ВчТ при холостом ходе устройства за время $T/2$:

$$\Delta I_1 = \frac{U_{1m}T}{2L_1} \quad (3.14)$$

Если положить $T_f = 0$ и $\Delta U_d = 0$, т. е. считать амплитудное значение U_{1m} равным напряжению питания инвертора U_{num} , то после несложных преобразований выражение (3.11) можно привести к виду:

$$U_2 = U_{2XX} \sqrt{1 - \frac{I_2}{I_{2k}}} \quad (3.15)$$

где U_{2XX} – напряжение на выходе устройства при токе нагрузки $I_2 = 0$,

$$U_{2XX} = kU_{num} \frac{w_1}{w_2} \quad (3.16)$$

w_1, w_2 – числа витков первичной и вторичной обмоток ВчТ соответственно, $k = M/\sqrt{L_1L_2}$ – коэффициент связи между обмотками; I_{2k} – ток короткого замыкания, который с учетом принятых допущений будет определяться выражением:

$$I_{2k} = \frac{kU_{num}}{8fw_1w_2L_B(1-k^2)} \quad (3.17)$$

где L_B – индуктивность одного витка, $f = 1/T$ – частота коммутации инвертора.

Исходные данные для выбора конструктивных параметров ВчТ определяются требованиями к электрическим параметрам заряда аккумуляторной батареи, т. е. значением выходного напряжения U_n и тока I_n в номинальном режиме заряда. Кроме этого, конструктивные параметры связаны с рядом ограничений: это допустимые габариты ВчТ, условия охлаждения, максимальные токовые нагрузки на провод катушек трансформатора, допустимая частота коммутации IGBT транзисторов инвертора, предлагаемая номенклатура ферритовых сердечников для магнитопроводов ВчТ и др.

Заключение о свойствах системы энергоснабжения электромобиля с помощью бесконтактной зарядки можно сделать на основании расчёта, где в качестве исходных данных следует принять параметры из проведённого экспериментального исследования, описание которого приведено [10]. Использование их в расчёте даст возможность более наглядно сопоставить результаты исследования системы в натурном эксперименте и на математической модели.

Так, один из хорошо сбалансированных вариантов, основанный на анализе перечисленных факторов, имеет следующие характеристики: напряжение источника постоянного тока $U_I = 50$ В, частота выходного напряжения инвертора $f = 11,1$ кГц, взаимная индуктивность между обмотками трансформатора $M = 31,3$ мкГн, индуктивность первичной обмотки трансформатора $L_1 = 58,4$ мкГн, активное сопротивление первичной обмотки трансформатора, включающее сопротивление проводов, $R_1 = 61,3$ мОм, индуктивность вторичной обмотки трансформатора $L_2 = 52,7$ мкГн, активное сопротивление вторичной обмотки трансформатора, включающее сопротивление проводов, $R_2 = 53,5$ мОм, коэффициент связи между обмотками $k = 0,564$. Количество витков первичной и вторичной обмотки трансформатора $w_1 = 18$ витков, $w_2 = 19$ витков, $L_B = 0,58$ мкГн.

Влияние конструктивных параметров катушек трансформатора на его внешние характеристики удобно оценивать при математическом моделировании устройства бесконтактной передачи энергии.

По формулам (3.5) и (3.7) были получены следующие численные значения токов обмоток трансформатора: $I_{1K3} = 16,3$ А, $I_{2K3} = 8,4$ А, $I_{1XX} = 11,1$ А,

По формулам (3.10) получены следующие значения параметров резонансной цепи: $L_{RC} = 44,5$ мкГн, $C_{RC} = 2$ мкФ.

3.3. Зарядное устройство

При заряде литий-ионных аккумуляторов должны обеспечиваться два интервала заряда: первый – заряд постоянным током до момента достижения максимально допустимого значения напряжения полностью заряженного аккумулятора. Второй интервал – поддержание на аккумуляторе неизменного напряжения, достигнутого к концу первого интервала, и отключение процесса заряда при уменьшении тока заряда до 15% от номинального значения.

Конкретная практическая реализация устройства, обеспечивающего указанный алгоритм с требуемой точностью, может быть различной, но вместе с тем в большинстве случаев будет иметь следующие основные общие черты: это должна быть замкнутая система автоматического регулирования с обратными связями по напряжению аккумуляторной батареи и по току заряда, причем в качестве силового регулирующего элемента предпочтительным является выбор импульсного регулятора напряжения понижающего типа. При этом структурную схему подобного зарядного устройства в общем виде можно представить, как показано на рис.3.4.

В устройстве управления УУ осуществляется контроль рассогласования между заданным значением тока заряда $I_{ЗД}$ и фактическим током $I_{ЗД}$, а также между заданным номинальным значением напряжения $U_{ЗД}$ полностью заряженной аккумуляторной батареи и фактическим напряжением $U_{АБ}$ на ее зажимах. Полученные значения рассогласования используются для формирования сигнала управления $U_{УПР}$ импульсным регулятором напряжения ИРН. Выбор подобной структуры обеспечивает процесс заряда батареи с заданным качеством с минимальными затратами, но, как в любой замкнутой системе регулирования, возникают задачи получения требуемых статических и динамических характеристик, т.е. обеспечения устойчивости и заданной точности. Аналитический расчет системы позволяет определить предварительные значения настроек устройства управления, которые могут

быть уточнены в ходе исследования математической модели зарядного устройства. Задача определения тепловых нагрузок на силовые компоненты, так же как и для инвертора, должна решаться при компоновке устройства в корпусе прочного контейнера и создании номинальных внешних рабочих условий.

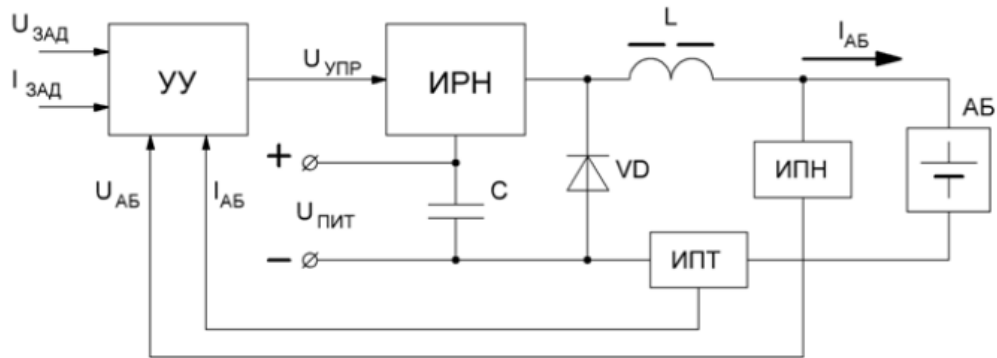


Рис.3 4. Структурная схема зарядного устройства: УУ – устройство управления; ИРН – импульсный регулятор напряжения; ИПТ, ИПН – измерительные преобразователи тока и напряжения соответственно; L – реактор.

Моделирование аккумуляторной батареи в математическом пакете MATLAB затруднено, это обусловлено тяжелыми процессами протекающих в аккумуляторных батареях. При моделировании в данной магистерской работе модели системы бесконтактной передачи электроэнергии, аккумуляторная батарея будет представлена в виде эквивалентной электрической схемы, которые включают в себя фильтр (конденсатор) и активную нагрузку (резистор).

3.4. Моделирование системы беспроводной передачи энергии

Компьютерное моделирование системы бесконтактной передачи электроэнергии проведённое в программе MATLAB приложения Simulink, Пакет MatLab с расширением Simulink, ориентирован в первую очередь

на обработку массивов данных (матриц и векторов). Однако, используя элементы дополнительной библиотеки расширения Sim Power System (SPS), в среде Simulink можно создавать математические модели сложных электротехнических систем с достаточной степенью детализации и совпадающие по схемотехнике с исходным оригиналом. Эти условия определяют предпочтительность использования MatLab для моделирования полной системы бесконтактной передачи энергии. Моделирование позволит провести дополнительный анализ свойств системы.

Общая схема модели, соответствующая принятой структуре, представлены на рис.3.6 В схему модели входят источник электрической энергии представлен как *DC*, инвертор – *IGBT* транзисторами *VT1...VT4*, высокочастотный трансформатор – связанными индуктивностями и последовательную резонансную цепь *L* и *C*, включённую параллельно его первичной обмотке, выпрямитель, фильтр и нагрузка.

В этой модели автономный инвертор реализован в виде мостовой схемы на *IGBT* транзисторах с оппозитными диодами.

Трансформатор ВчТ в модели устройства моделируется с помощью магнитосвязанных индуктивностей, представленных элементом *Mutual Inductance* из библиотеки *SPS*. Электрические цепи, подключенные к входу инвертора и к вторичной обмотке ВчТ, эквивалентны реальной схеме.

Выбор конденсатора, входящего в последовательную резонансную цепь, необходимо проводить из расчёта его реактивной мощности и допустимого напряжения.

Так, допустимое напряжение на конденсаторе зависит от частоты, на которой он будет использоваться. При увеличении частоты значение максимально допустимого напряжения на конденсаторе из условия его безопасной эксплуатации уменьшается, причем для типоразмера с меньшим значением ёмкости это уменьшение происходит в меньшей степени. Таким образом, возможна оптимизация массогабаритных показателей ёмкостного элемента резонансной цепи за счет применения нескольких конденсаторов.

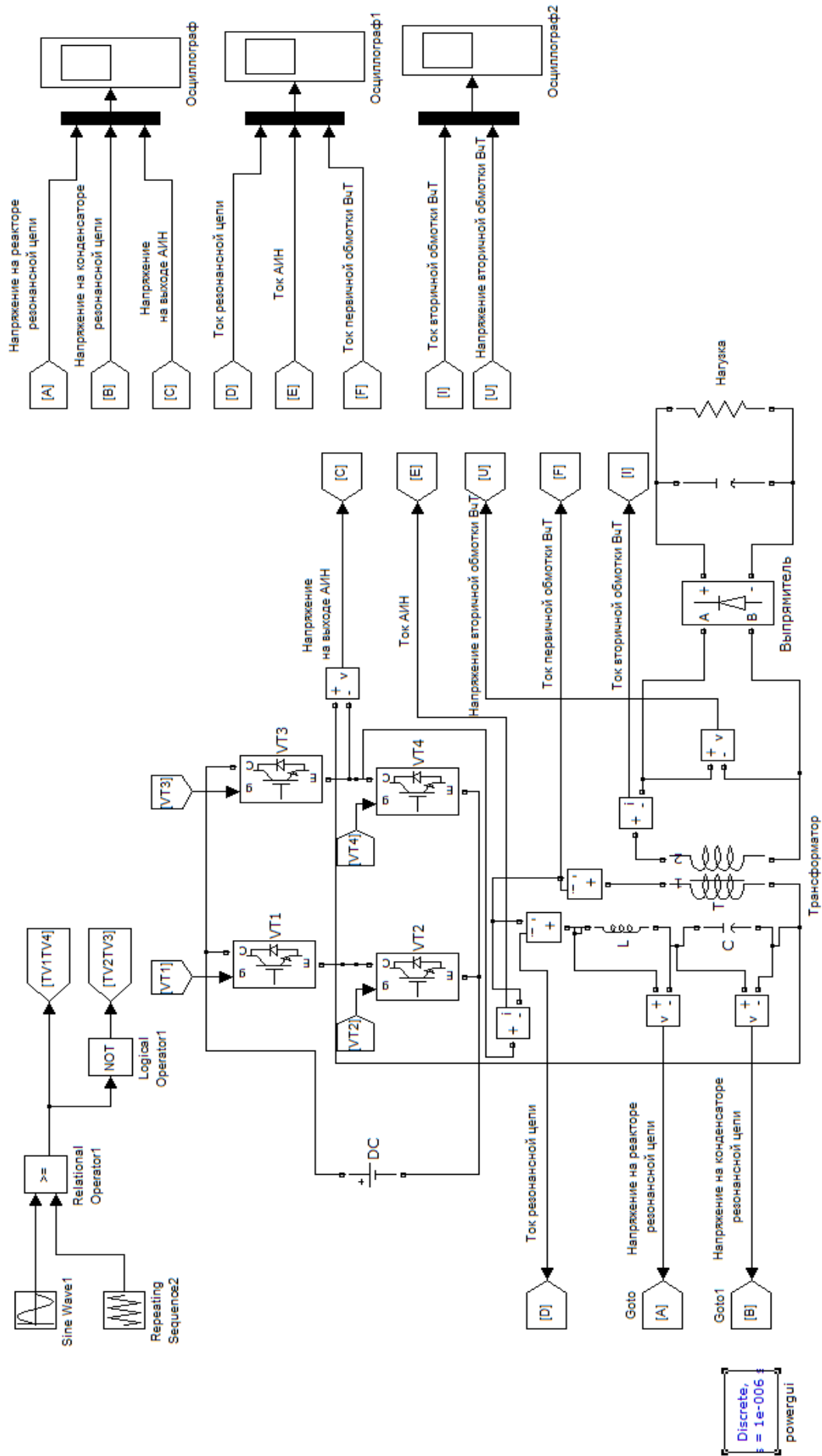


Рис.3.5. Схема математической модели системы бесконтактной передачи энергии

Результаты моделирования системы бесконтактной передачи энергии представлены на рис.3.6, 3.7, 3.8 в виде осциллограмм.

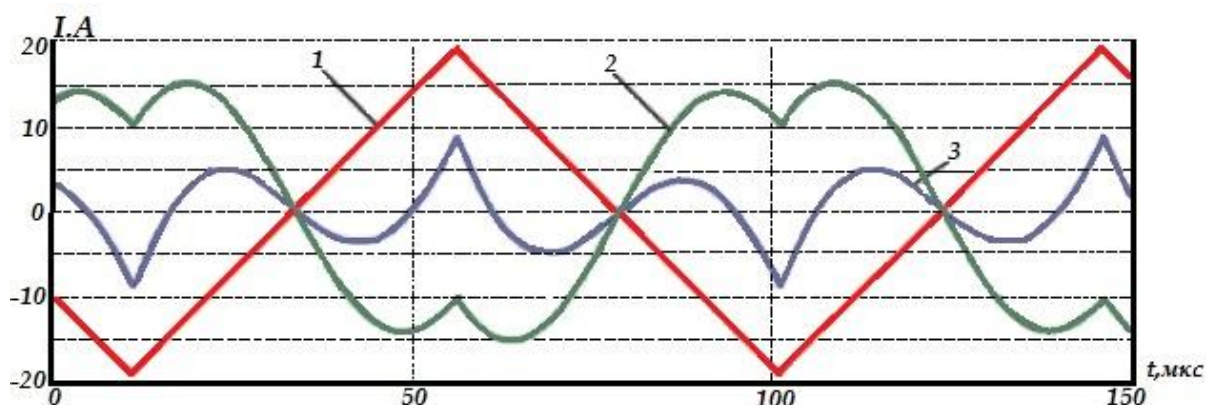


Рис.3. 6. Осциллограммы токов, соответствующие режиму холостого хода: 1 – ток первичной обмотки ВчТ; 2 – ток резонансной цепи; 3 – ток АИН.

Осциллограммы показывают, что напряжение на конденсаторе увеличено по сравнению с напряжением на выходе инвертора. Это необходимо учитывать при выборе конденсатора, входящего в последовательную резонансную цепь. Представленные на рис.3.6 осциллограммы позволяют определить действующие значения токов первичной обмотки $I_1 = 11,1$ А, инвертора $I_{INV} = 3,64$ А и резонансной цепи $I_{LC} = 11,5$ А, откуда следует, что ток первичной обмотки трансформатора остался неизменным, а ток инвертора снизился примерно в 3 раза. Следовательно, введение последовательной резонансной LC-цепи действительно позволяет разгрузить силовые ключи инвертора и уменьшить тепловые потери, а значит, появляется возможность снижения его массогабаритных показателей в целом.

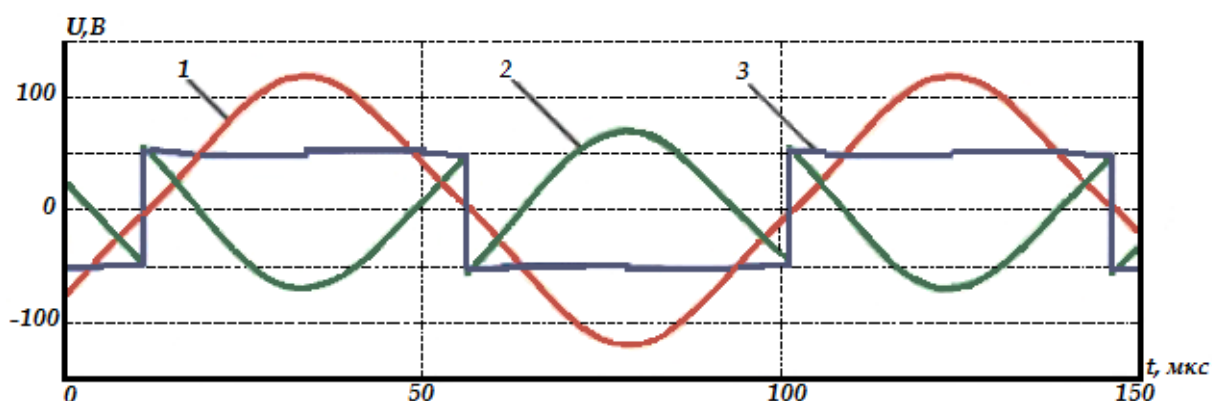


Рис.3.7. Осциллограммы напряжений, соответствующие режиму холостого хода: 1 – напряжение на конденсаторе резонансной цепи; 2 – напряжение на реакторе резонансной цепи; 3 – напряжение на выходе АИН

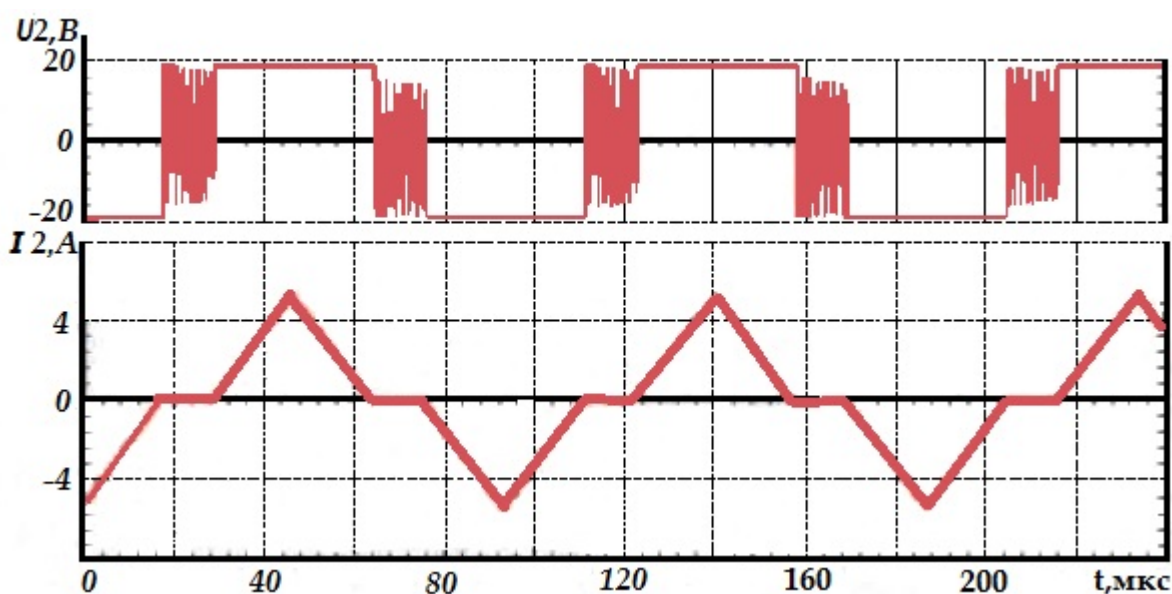


Рис.3.8. Осциллограммы напряжения и токов вторичной обмотки трансформатора ВчТ.

В данной магистерской работе исследования показали, что одним из возможных вариантов разгрузки силовых ключей инвертора является введение последовательной резонансной LC-цепи, подключённой параллельно первичной обмотке трансформатора. Такая структура позволила снизить ток транзисторов АИН, а соответственно и потери, выделяемые в виде тепла, примерно в 3 раза. Предложенный подход к выбору конденсатора

резонансной цепи позволяет увеличить допустимый уровень его напряжения при минимальных массогабаритных показателях.

При дальнейшей разработке системы передачи энергии потребуются решать такие задачи как определение взаимосвязей между конструктивными параметрами и характеристиками системы при введении зазора или смещения между соприкасающимися поверхностями ВчТ, определения законов управления инвертором при введении ограничений по нагреву катушек ВчТ, исследования влияния снабберных цепей на значения перенапряжений на транзисторах инвертора и др. Использование разработанной математической модели системы, возможно с некоторыми уточнениями, позволит получать практические результаты с минимизацией затрат и времени разработки.

Математическое описание системы бесконтактной передачи электроэнергии может служить основой для разработки методики расчета конструктивных параметров высокочастотного трансформатора, соответствующих требуемым электрическим характеристикам системы.

ВЫВОД

В данной магистерской работе проведено изучение технологии беспроводной передачи энергии. Раскрыта перспективность, проблематика, а также принцип работы и физические основы технологии использования беспроводных зарядных установок как основного источника электроэнергии. Показано схмотехнические решения беспроводной передачи энергии для станций бесконтактной зарядки электромобилей

В первом разделе рассмотрены общие сведения об электромобилях их достоинства и недостатки, перспектива развития, способы зарядки и методы бесконтактной передачи энергии.

Во втором разделе детально описан принцип действия беспроводной передачи электроэнергии на основе явления электромагнитной индукции что обосновано математическими расчетами. Приведены их схмотехнические решения. Так же отображено использование индуктивного метода в качестве бесконтактной передачи энергии при зарядке электромобиля. Показаны функционирующие проекты использования системы непосредственно на дорогах общего пользования.

На заключительном этапе, в третьем разделе магистерской работы, проведено моделирование разработанной общей схемы бесконтактной зарядки электромобиля. Исследование позволило провести дополнительный анализ поведение свойств системы и ее работоспособность. Для моделирования данной системы использовался программный пакет MATLAB приложения Simulink.

Если все подытожить, то у беспроводных зарядок для электромобиля есть будущее, поскольку современный мир, хоть и не быстро, но все же переходит на электромобили. Сколько бы ни говорили о пользе развития электромобилей для экологии, единственной причиной их распространения остается экономическая ситуация. Неизбежное постоянное подорожание нефтепродуктов подталкивает человечество на поиск нового источника

энергии для транспорта. И самым перспективным здесь выглядит электроэнергия. Поэтому в ближайшие годы ожидается уверенный рост доли электромобилей в мировом транспорте. И самым удобным способом зарядки такого транспорта является бесконтактная зарядка.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Запасный А.И. Основы теории цепей: Учебное пособие. – М.: РИОР, – 2006. – 336 с. – (Высшее образование).
2. Садовский Б.П. Решением данной проблемы может стать внедрение внеконтактной зарядки[Текст] /А.Ю. Андросов // Бесконтактные способы восстановления электроэнергии электромобилей.- МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016.
3. Калантаров П.Л. Расчет индуктивностей: Справочная книга / П.Л. Калантаров, Л.А. Цейтлин. – 3-е изд., перераб. и доп. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1986. – 488 с.: ил.
4. A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J.D. Joannopoulos, P. Fisher, M. Soljacic. Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances. Science, 2007, v. 317 (5834), pp. 83-86.
5. L. Huber, L. Gang, M. Jovanovi'c. Design-Oriented Analysis and Performance Evaluation of Buck PFC Front End. IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 25, no. 1, January 2010.
6. E.Nolle, N.Neuberger, R.Banschbach, I.Kovalenko. Kontaktlose Energieübertragung für eine Solartankstelle, Induktivitäten räumlich ausgedehnter Spiralspulen. HE Spektrum, Nr. 39, 2014.
7. Я.Г. Пуказов. Передача электрической энергии в электромобиль (Yakobi technical splution) : [Электронный ресурс]. URL: <http://ukazov.ru/yakobi-technical-solution/>. (Дата обращения: 17.11.2017).
8. Беспроводная зарядка электромобилей во время движения уже в ближайшей перспективе: [Электронный ресурс]. URL: <https://geektimes.ru/company/icover/blog/263180/> (Дата обращения: 14.11.2017).
9. Беспроводная зарядка для электромобиля: [Электронный ресурс]. URL: <http://ecoconceptcars.ru/2011/03/besprovodnaja-zarjadka-jelektromobilja.html/> (Дата обращения: 20.11.2017).
10. Повышение эффективности бесконтактной передачи электроэнергии на автономный подводный аппарат URL:<https://jmtf.febras.ru/journal/1-21-2016/24-30.pdf> (Дата обращения: 14.11.2017).
11. Технология беспроводной зарядки: принцип действия, стандарты, производители. [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://www.russianelectronics.ru> (Дата обращения: 03.12.2017).