

БЕСКОНТАКТНАЯ СИСТЕМА ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ЗАРЯДКИ АККУМУЛЯТОРОВ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

*N. Neuberger, E. Nolle, Университет прикладных наук Эсслинген, Германия
И. Коваленко, Московский авиационный институт, Россия*

Рассмотрено состояние и перспективы развития подвижного транспорта на электрической тяге - электромобилей. Показано, что одной из проблем развития электротранспорта является отсутствие развитой сети зарядных станций, в том числе бесконтактных. Приведена конструкция, описаны принцип работы и электрические схемы бесконтактного зарядного устройства, работающего с использованием метода электромагнитной индукции.

Все возрастающие требования к охране окружающей среды, развитие альтернативных источников энергии и элементной базы силовой электроники в последние годы привели к широкому развитию и появлению нового вида подвижного транспорта, использующего в качестве тягового привода электродвигатель. К такому транспорту относятся как автомобили на полной электрической тяге (электромобили), так и гибридные автомобили, построенные по принципу совместного использования традиционного двигателя внутреннего сгорания и электродвигателя. В качестве электродвигателей для электромобилей используются, как правило, синхронные двигатели с постоянными магнитами, уровень разработки которых в настоящее время достаточно высок. Например синхронный двигатель EMRAX 268, выпускаемый фирмой ENSTROJ (Словения), при своем 20-киллограммовом весе и габаритах 268 / 91 мм. (диаметр / толщина) имеет мощность на валу порядка 90 кВт и развивает максимальный крутящий момент до 450 Нм [1].

Хуже обстоит дело с источниками электроэнергии для питания электродвигателей. Традиционные свинцовые аккумуляторы с плотностью энергии 25-35 Вт·ч/кг не могут обеспечить достаточного пробега электромобиля без подзарядки и считаются в этом плане бесперспективными. В настоящее время многие фирмы мира инвестируют большие финансовые средства и ведут масштабные исследования в области источников питания для электромобиля. Целью исследований является разработка и организация недорогого серийного производства аккумуляторных батарей, способных при полной зарядке обеспечить пробег, сравнимый с пробегом автомобиля, снабженного бензобаком (на сегодняшний день порядка 800 км. без дозаправки). Уже созданы достаточно емкие, легкие, компактные аккумуляторные литий-ионные батареи, плотность энергии которых достигла 200 Вт·ч/кг и есть перспектива доведения ее до 400 Вт·ч/кг к концу 2015 г. В перспективе могут быть созданы литий-кислородные аккумуляторы, основанные на технологии окисления лития кислородом из окружающего воздуха и которые по плотности запасаемой энергии сравнимы с бензином [2].

На основе этих результатов многие автомобильные концерны закончили разработки и приступили к серийному выпуску первых электромобилей. На начало 2014 года в мире было продано 400 тыс. электромобилей [3], что составляет только 0,05% от общего парка (порядка 800 млн.) легковых автомобилей в мире. Однако доля электромобилей в мире будет неуклонно расти. Согласно прогноза Федерального министерства транспорта, строительства и городского развития Германии [www.bmvbs.de] в 2020 году по дорогам Германии будут ездить 1 млн. электромобилей и на конец 2030 г. их число должно увеличиться до 6 млн.

Одним из главных ограничений, сдерживающих широкое применение электромобилей, является отсутствие развитой инфраструктуры недорогих функциональных источников электроснабжения и станций подзарядки аккумуляторных батарей. Станции подзарядки необходимо обеспечить бесперебойным питанием, желательно от альтернативных источников энергии и приспособить их к разным видам транспортных средств. Уже созданы и эксплуатируются стационарные электрозаправочные станции, обеспечивающие зарядку аккумуляторов путем подключения к ним кабеля. Такой вид зарядки не лишен недостатков

традиционных АЗС. Водитель автомобиля должен достать и подключить кабель к зарядной станции, дождаться полного заряда аккумулятора и затем проделать все процедуры в обратном порядке.

Значительно больше удобств и сервиса может дать бесконтактная (беспроводная) зарядка аккумуляторных батарей, позволяющая производить зарядку не подключаясь напрямую к зарядным устройствам. Водителю достаточно занять определенную позицию на месте зарядки и дальнейший процесс зарядки может происходить автоматически. В перспективе бесконтактные зарядные устройства необходимо было бы унифицировать, оснастить ими определенную часть парковочных мест крупных торговых центров и общественных парковок. Необходимо разработать «гаражный» вариант бесконтактного зарядного устройства с питанием от сети напряжением 220-230 вольт и приемлемой для частного пользователя ценой. Все это способствовало бы более широкому развитию и использованию электромобилей в повседневной жизни.

Бесконтактные зарядные устройства предполагают индивидуальную зарядку транспортных средств и работают при небольших (до 0,5 метров) расстояниях между источниками излучения и приема энергии. Для передачи требуемой для зарядки аккумулятора мощности в киловаттном диапазоне (до 5 кВт) из всех, известных на сегодняшний день способов передачи энергии, наиболее приемлемыми являются методы электростатической индукции и электромагнитной индукции. Уровень требуемых напряжений и частот при использовании электростатического метода передачи энергии приводят к большим, по сравнению с методом электромагнитной индукции, энергетическим потерям. Дополнительно к этому, с точки зрения технической реализации и обеспечения электробезопасности пользователя, метод электромагнитной индукции обладает несомненными преимуществами и в настоящее время широко используется при создании бесконтактных зарядных устройств не только для электромобилей, но и для широкого спектра бытовой техники.

В лаборатории электропривода университета прикладных наук г. Эсслингена (Германия) в рамках семестрового проекта по мехатронике разработано и изготовлено демонстрационное зарядное устройство мощностью на выходе 500 Вт. и с коэффициентом полезного действия не менее 80%. Структурная схема устройства представлена на рис.1.

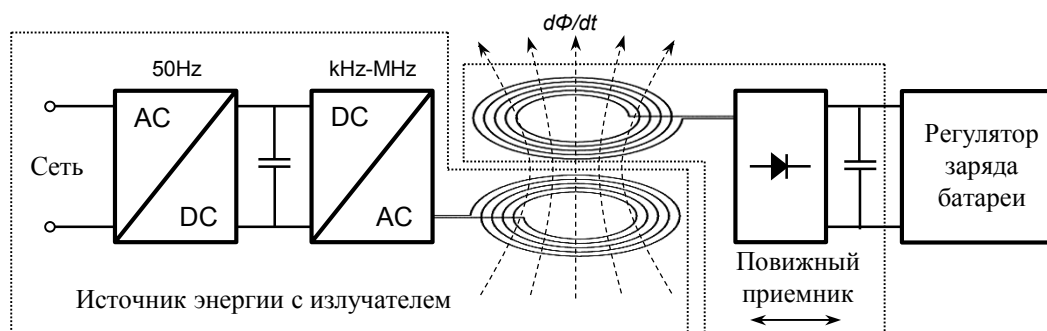


Рис.1. Структурная схема зарядного устройства.

Зарядное устройство использует метод электромагнитной индукции и содержит два основных узла- источник энергии с электромагнитным излучателем и электромагнитный приемник энергии с неуправляемым выпрямителем. Устройство питается от сети переменного тока напряжением 230 В. Выходное постоянное напряжение на нагрузке неуправляемого выпрямителя составляет 230 В. ± 10%.

В процессе работы входное сетевое напряжение преобразуется в постоянное напряжение, которое, в свою очередь, питает генератор синусоидальных колебаний с частотой порядка 22 кГц. Нагрузкой генератора служит колебательный контур, состоящий из излучаемой катушки (нижняя катушка на рис.1.) с параллельно включенным конденсатором. Протекающий через излучающую катушку переменный электрический ток создает в

пространстве между катушками переменное магнитное поле, которое, в свою очередь, индуцирует в приемной катушке (верхняя катушка на рис.1.) переменное напряжение. Выпрямленное с помощью диодного моста напряжение используется для зарядки аккумуляторов. Излучающая катушка может располагаться в / или на полу на месте зарядки, а приемная непосредственно на транспортном средстве. Регулятор заряда батарей также расположен на транспортном средстве и должен быть параметрически согласован с типом и емкостью аккумулятора электромобиля. В настоящей статье регулятор заряда батарей обсуждаться не будет.

Рассмотрим требования к отдельным узлам и аспекты реализации зарядного устройства.

Индукционный преобразователь.

В качестве индукционного преобразователя была выбрана система с компланарным расположением двух катушек (рис. 2), выполненных в виде неполных спиралей Архимеда. Геометрические параметры катушек представлены в таблице 1.

Таблица 1. Основные параметры катушек индукционного преобразователя

Параметр	ед.изм.	Излучатель	Приемник
Внутренний диаметр d_i	мм	100	120
Внешний диаметр d_a	мм	380	400
Средний диаметр d_m	мм	240	260
Ширина намотки $(d_a - d_i)/2$	мм	140	140
Число витков / отвод N		22/12,6	33
Аксиальное расстояние между катушками h	мм	100	

При позиционировании транспортного средства на месте зарядки приемная катушка располагается над излучающей катушкой и при совпадении их осей ($x = 0$) обеспечивается максимальный коэффициент связи k . Поскольку приемная катушка монтируется на транспортном средстве, то при выборе расстояния между ними по вертикали h учитывалась

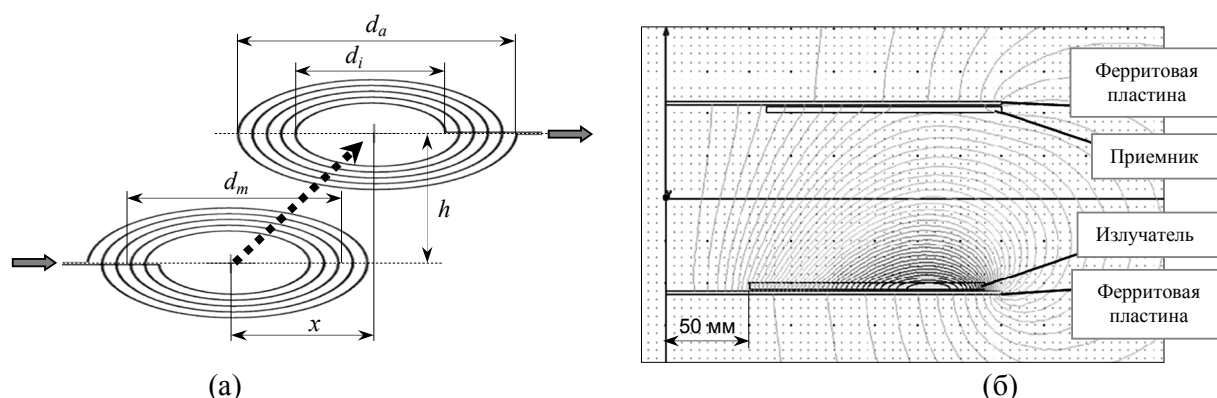


Рис.2. Схема индукционного преобразователя (а) и картина магнитного поля в рабочей зоне (б).

величина дорожного просвета некоторых типов автомобилей. В проектном задании максимальное расстояние h составило 100 мм. При таком расстоянии, с теоретической точки зрения, система катушек представляет собой трансформатор с очень слабой индуктивной связью и изменяющимся коэффициентом связи.

С целью увеличения коэффициента связи k , а также ослабления поля в нерабочих зонах индукционного преобразователя, непосредственно под излучающей катушкой и над

приемной катушкой расположены ферритовые пластины из магнитомягкого материала совокупным размером 0,5 x 0,5 м. каждая.

Теоретические расчеты распределения магнитного поля в рабочей зоне столь сложной конструкции индукционного преобразователя выполнить практически невозможно. Поэтому для этой цели было проведено моделирование методом конечных элементов с помощью программы „Maxwell 15.0“.

На рис. 2б представлена осесимметричная картина распределения поля в рабочей зоне излучателя. По мере удаления от излучающей катушки в сторону приемной, интенсивность электромагнитного поля падает. Часть силовых линий выходят за пределы рабочей зоны индукционного преобразователя и требуется проверка допустимого уровня поля за пределами конструкции индукционного преобразователя .

На рис 3. представлены графики распределения вертикальной компоненты поля B_z вдоль горизонтальной осевой линии непосредственно над излучающей катушкой (а) и непосредственно под приемной катушкой (б).

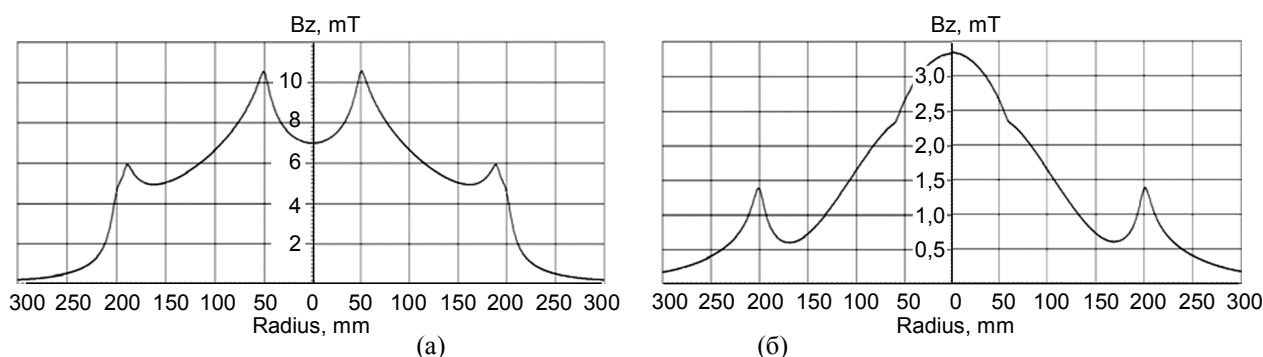


Рис.3. Вертикальная компонента магнитной индукции в рабочей зоне над поверхностью излучателя (а) и под поверхностью приемника (б).

Из рис. 3а видно, что магнитное поле излучающей катушки концентрируется в рабочей зоне индукционного преобразователя, неоднородно вдоль поверхности излучающей катушки и достигает максимальной величины порядка 10,5 мТ. За пределами поверхности (радиуса) излучающей катушки ($R > 200$ мм.) интенсивность поля резко уменьшается и не превышает, согласно европейским нормам электромагнитной эмиссии, допустимого для используемой частоты поля (область 0,8 кГц – 150 кГц) уровня в 6,25 μ Т.

В зоне расположения приемной катушки интенсивность поля более чем в 3 раза ниже и по форме имеет куполообразную форму.

Определение коэффициента связи между излучающей и приемной катушками производилось тремя методами:

- ориентировочным расчетом индуктивностей L_1 , L_2 и взаимной индуктивности M_{12} с последующим использованием стандартной формулы $k = M_{12} / \sqrt{L_1 \cdot L_2}$;
- по результатам моделирования;
 - путем непосредственного измерения на изготовленном макете в режиме холостого хода при соосном расположении катушек на расстоянии 10 см.

Подробная методика расчета индуктивностей и взаимных индуктивностей с учетом влияния ферритовых пластин приведена в работе [4]. Там же был определен коэффициент связи k , который составил порядка 0,37. Моделирование дало результат 0,42 и непосредственные измерения на модели – 0,4.

Этот результат ($k = 0,4$) мы и будем использовать в наших дальнейших расчетах.

Генератор синусоидальных колебаний.

Принципиальная схема генератора синусоидальных колебаний представлена на рис. 4. В качестве генератора синусоидальных колебаний используется модифицированная версия генератора Ройера (George H. Royer), схему которого он разработал и запатентовал в 1954 г. в США. В оригинальной схеме использовался трансформатор с сердечником, работающим в режиме насыщения. Дополнительная обмотка трансформатора обеспечивала индуктивную обратную связь для переключения транзисторов. По своей сути схема представляла собой симметричный мультивибратор с выходным сигналом прямоугольной формы [5].

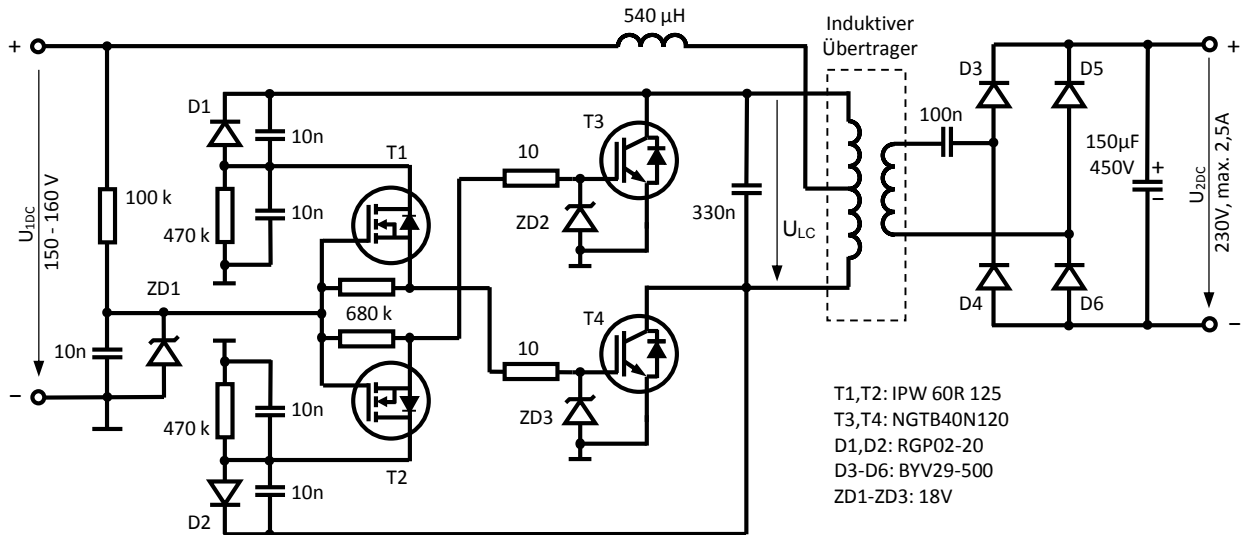


Рис. 4. Принципиальная схема генератора синусоидальных колебаний

В модифицированной схеме (рис.4) используется колебательный контур, образованный излучающей катушкой без сердечника и параллельно включенным конденсатором. Это дает возможность генерировать синусоидальные колебания на частоте настройки контура. Положительная обратная связь осуществляется емкостным путем через конденсаторные делители напряжения. Это предотвращает возможное одновременное полное включение выходных биполярных транзисторов T3 и T4 в момент подачи напряжения питания. Транзисторы T1 и T2 выполняют роль коммутаторов и попеременно соединяют коллекторы транзисторов T3 и T4 с изолированными затворами транзисторов противоположных плеч (соответственно T4 и T3) для обеспечения положительной обратной связи. Дроссель, подключенный к среднему выводу излучающей катушки, сглаживает пульсации переменной составляющей и играет роль источника постоянного тока. Интегрирующая RC- цепочка на входе генератора осуществляет задержку включения транзисторов T1 и T2, что позволяет запускать генератор в работу только после установившегося напряжения на коллекторах транзисторов T3 и T4.

Пиковое напряжение U_{LC} на колебательном контуре такой схемы в π -раз превышает напряжение питания генератора. При питании генератора непосредственно от однофазной сети с номинальным напряжением $U_1 = 230V$ через неуправляемый выпрямитель, напряжение на контуре, а также на коллекторах транзисторов T3 и T4 составит:

$$U_{LC} = U_{DC} \cdot \pi = U_1 \cdot \sqrt{2} \cdot \pi = 230 \cdot \sqrt{2} \cdot 3,14 = 1022 V.$$

Это достаточно высокое напряжение и с точки зрения соблюдения требований безопасности при эксплуатации зарядного устройства было принято решение снизить его до

уровня 470 - 500 В. Тогда в выходном каскаде генератора можно использовать более дешевые транзисторы с пиковым напряжением до 600 В. При этом также снижается уровень требуемого постоянного напряжения питания генератора U_{IDC} , которое можно определить из соотношения: $U_{IDC} = U_{LC} / \pi = (470 - 500) / \pi \approx (150 - 160) \text{ В}$.

При расчете уровня постоянного напряжения U_{2DC} на выходе нерегулируемого диодного моста приемной части зарядного устройства необходимо учитывать коэффициент связи между излучающей и приемной катушками k , который для режима холостого хода был определен нами ранее и составил величину, равную 0,4. В режиме холостого хода уровень напряжения U_{2DC0} составит:

$$U_{2DC0} = U_{IDC} \cdot \pi \cdot k \cdot \sqrt{2} = (150 - 160) \cdot \pi \cdot 0,4 \cdot \sqrt{2} \approx (267 - 284) \text{ В}.$$

В нагрузочном режиме это напряжение упадет до требуемой величины 230 В. $\pm 10\%$.

Необходимо отметить, что режимы работы генератора были исследованы на модели. Результаты показали наличие больших (до 50 А) пусковых (пиковых) токов при полной нагрузке на выходном выпрямителе. Поэтому для питания генератора постоянным напряжением требуется разработка преобразователя переменного напряжения сети в постоянное напряжение меньшего уровня с возможностью подрегулировки выходного напряжения и его стабилизации независимо от нагрузки, в том числе с функцией ограничения пусковых токов и коррекций коэффициента мощности.

Преобразователь напряжения AC/DC.

Для решения поставленной задачи был выбран импульсный AC/DC преобразователь на основе схемы понижающего регулятора напряжения. Особенностью разработанной схемы явилось то, что выпрямитель сетевого напряжения не выделяется как отдельное звено – он одновременно является элементом устройства коррекции коэффициента мощности и стабилизации (регулирования) выходного напряжения (рис.5). Кроме того CLC фильтр

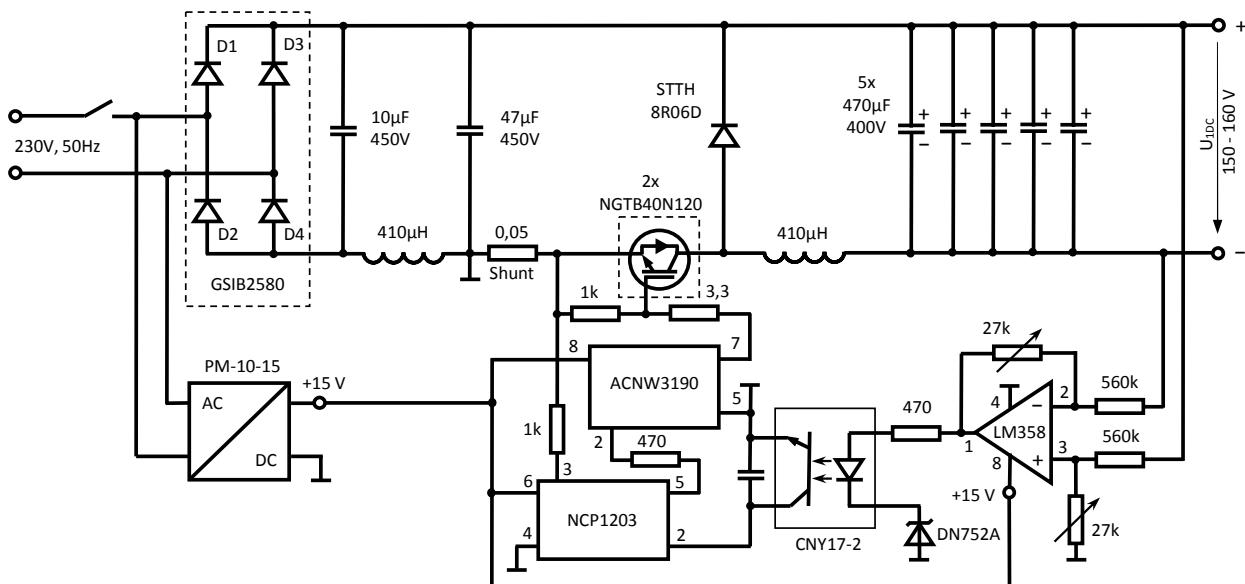


Рис. 5. Принципиальная схема преобразователя напряжения

используется одновременно в качестве формирователя формы тока и фильтра высокочастотных помех. Также, в отличие от классической схемы понижающего регулятора, где силовой транзистор располагается в положительной шине схемы, он был перенесен в отрицательную шину и включен последовательно с шунтом к нулевому потенциалу. Принцип работы схемы от этого принципиально не меняется, но такая перестановка транзистора дает возможность

управлять им относительно нулевого потенциала без заметных усложнений в схемотехнике.

Принцип действия понижающих преобразователей подробно описан в специальной литературе, поэтому в настоящей работе будут рассмотрены особенности работы схемы

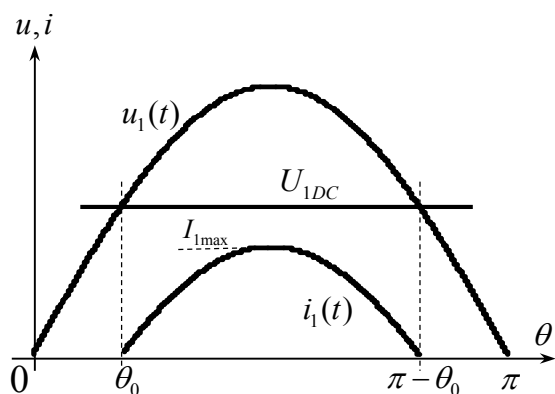


Рис. 6. Диаграммы напряжения и тока

данной модификации. Отличительной особенностью данной схемы является то, что из-за отсутствия входного конденсаторного фильтра ток I_1 через диодный мост поступает только тогда, когда входное напряжение U_1 превышает напряжение на блоке выходных конденсаторов U_{1DC} (рис.6). Данная форма тока несинусоидальна и существуют моменты времени от 0 до θ_0 и от $\pi - \theta_0$ до π , когда ток в схему не поступает. Это ухудшает значение коэффициента нелинейных искажений и коэффициента мощности, однако позволяет ограничивать пиковые значения входного тока I_1 . Для этого используется датчик тока, выполненный на резисторе R_{sense} (шунт). Снимаемый с него сигнал, пропорциональный величине протекающего тока, используется далее в системе управления для его ограничения при превышении заданной величины. В качестве схемы управления была выбрана микросхема PWM Current-Mode Controller NCP1203. Микросхема содержит встроенный тактовый генератор с тактовой частотой $f_G=60$ кГц. Она проста в управлении и не требует большого количества дополнительных пассивных элементов. При выборе других элементов схемы учитывались уровни напряжений и токов, протекающих в ветвях схемы.

Расчет минимального значения индуктивности в цепи стока коммутирующего транзистора проводился по методике, изложенной в литературе [6]. По уровням входного переменного и выходного постоянного напряжений вначале определяется начальный угол θ_0 отсечки диаграммы тока, затем с учетом приведенной ко входу мощности, определялась максимальная амплитуда входного тока и его действующее значение.

$$\theta_0 = \arcsin\left(\frac{U_{1DC}}{U_1}\right) = \arcsin\left(\frac{150}{230 \cdot \sqrt{2}}\right) = 0,479 \text{ рад} = 27,46^\circ; \quad P_{1N} = \frac{P_{2N}}{\eta_{\min}} = \frac{500}{0,8} = 625 \text{ Вт.}$$

$$I_{1\max} = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{P_{1N}}{U_1 \cdot \sqrt{2} \cdot \int_{\theta_0}^{\frac{\pi}{2}} [\sin^2 \theta - \sin \theta_0 \cdot \sin \theta] d\theta} = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{625}{230 \cdot \sqrt{2} \cdot 0,341} = 8,85 \text{ А.}$$

Для справки ниже приводим решение интеграла:

$$\int_{\theta_0}^{\frac{\pi}{2}} [\sin^2 \theta - \sin \theta_0 \cdot \sin \theta] d\theta = \left(\frac{1}{2} \cdot \theta - \frac{1}{4} \cdot \sin 2\theta + 0,461 \cdot \cos \theta \right) \Big|_{0,479}^{\frac{\pi}{2}} = 0,785 - 0,444 = 0,341$$

Определим действующее значение тока: $I_1 = I_{1\max} \cdot (1 - \sin \theta_0) = 8,85 \cdot (1 - 0,461) = 4,77 \text{ А}$

При этом минимальное значение индуктивности составило:

$$L_{\min} = \frac{1}{2 \cdot f_G \cdot I_1} \cdot \left(\frac{U_{1DC}}{U_1}\right)^2 \cdot (U_1 - U_{1DC}) = \frac{1}{2 \cdot 60 \cdot 10^3 \cdot 4,77} \cdot \left(\frac{150}{325}\right)^2 \cdot (325 - 150) = 65,1 \mu\text{H}$$

Результаты моделирования показали, что при рассчитанном значении индуктивности дросселя схема работает в режиме разрывных токов. Поэтому для улучшения энергетических показателей индуктивность дросселя была увеличена до 400 мкГн.

Для установки и регулировки выходного напряжения преобразователя использовалась цепь обратной связи с подстроечными резисторами на базе операционного усилителя LM 358 с последующей оптронной развязкой. Сигнал с этого усилителя поступает на схему

управления NCP1203 и та, с учетом текущего значения тока, управляет временем открытия-закрытия силового транзистора. Для улучшения процесса коммутации между выходом системы управления и входом (затвором) силового транзистора установлен драйвер с оптронной развязкой типа ACNW3190.

Перед практической реализацией преобразователя напряжения он был промоделирован с помощью программы PSpice. В электронной модели были использованы эквивалентные комплектующие как по типу, так и по своим параметрам. В качестве нагрузки использовался резистор номиналом 30 ом, который обеспечивал эквивалент мощностной нагрузки в 750 Вт. Результаты моделирования (рис.7) показали, что кратковременные броски тока длительностью менее 1мс. не превышают 25 Ампер, и они не вызовут срабатывание автоматов защиты сети от перегрузки.

На диаграммах, представленных вверху, показаны кривые изменения входного синусоидального напряжения и постоянного напряжения на выходе преобразователя. Средний график демонстрирует изменение тока в процессе работы преобразователя. В момент превышения входного напряжения над выходным, наблюдается скачек тока, обусловленный предыдущим разрядом конденсатора. Затем происходит зарядка конденсатора, броски тока уменьшаются и после полной зарядки нагрузка начинает потреблять ток только от сети. Этот процесс наглядно демонстрирует нижняя диаграмма, показывающая в увеличенном масштабе пульсации выходного напряжения. Оно изменяется в пределах 144 -154 В, что, с учетом последовательно включенного дросселя в питающую цепь синусоидального генератора, никак не сказывается на общем режиме работы зарядного устройства. По результатам моделирования коэффициент полезного действия только преобразователя напряжения составил 93,9%.

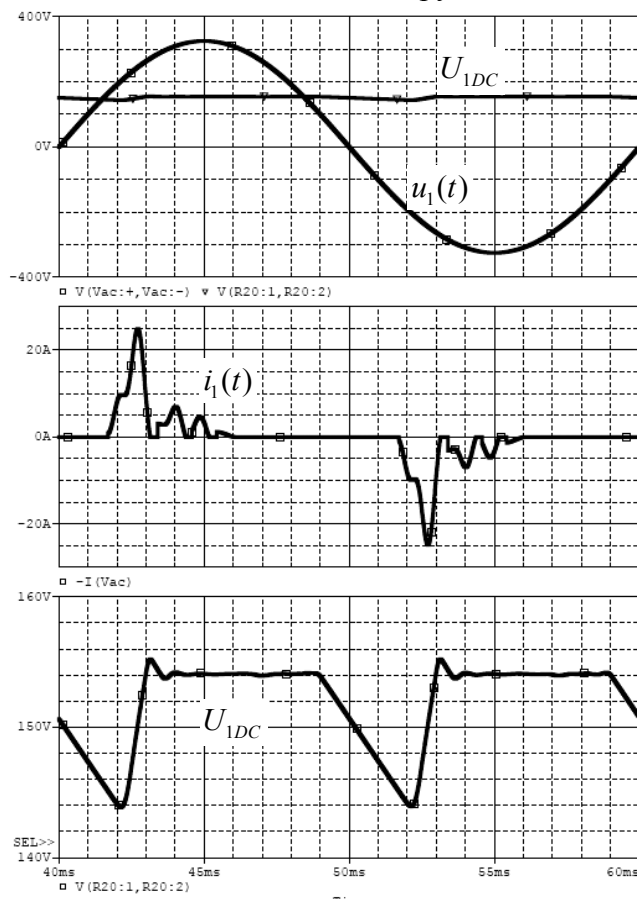


Рис. 7. Результаты моделирования

Конструкция и результаты испытаний.

Целью проекта являлось создание мобильного, демонстрационного варианта зарядного устройства. Это и предопределило его конструктивное исполнение. Индукционный

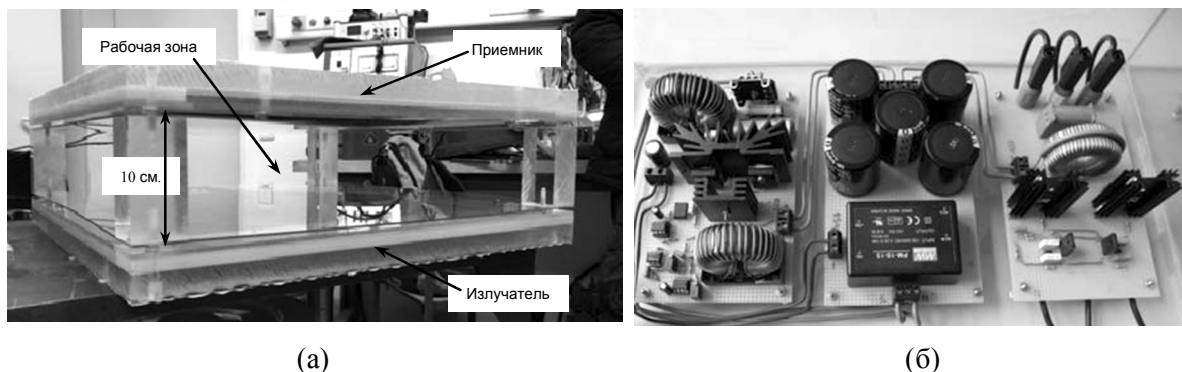


Рис. 8. Конструктивное исполнение индукционного преобразователя (а) и электронной части (б) зарядного устройства.

преобразователь (рис.8а) выполнен в виде двух плоских платформ из органического стекла размером 0,5 x 0,5 м с выфрезерованными спиральными пазами для укладки излучающей и приемной катушек.

Платформы расположены одна над другой на фиксированном расстоянии 10 см (заданный рабочий зазор). Такая конструкция позволяет демонстрировать физический принцип работы передачи энергии методом электромагнитной индукции. Например, при внесении в рабочую зону алюминиевой пластины, часть энергии будет тратиться на создание в ней вихревых токов; пластина нагреется, а включенная на выход зарядного устройства лампа мощностью 500 Вт. уменьшит яркость своего свечения.

Электронная часть зарядного устройства выполнена поблочно на четырех платах (рис. 8б). На левой плате расположен преобразователь напряжения AC/DC, на средней плате блок конденсаторов фильтра и стандартный блок питания микросхем и на правой плате- генератор синусоидальных колебаний. Плата выпрямителя приемного устройства на фото не показана.

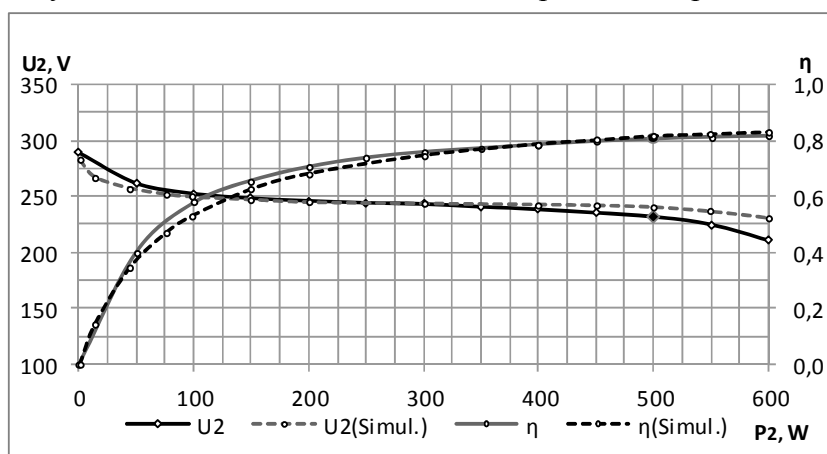


Рис. 9. Нагрузочные характеристики зарядного устройства

Изготовленное зарядное устройство было испытано в лабораторных условиях. На рис. 9 представлены основные нагрузочные характеристики, полученные в результате испытаний (сплошные линии) и сравнительные характеристики, полученные по результатам моделирования (штриховые линии).

Результаты испытания показали, что заданное в проекте напряжение на выходе зарядного устройства

230 В ± 10% выдерживается в широком мощностном диапазоне от 100 до 600 Вт. При номинальной нагрузке в 500 Вт к.п.д. устройства составляет 80,6%, что также соответствует заданию на проект. При слабой нагрузке <100 Вт. напряжение выходит за пределы допустимого значения и при нулевой мощности (холостой ход) достигает уровня порядка 290 В. Это также соответствует теоретическим расчетам, ранее приведенными нами, и на практике даже может явиться преимуществом для режима конца зарядного цикла при незначительном токе и несколько повышенном напряжении.

В заключении отметим, что приведенные результаты проекта можно использовать и для построения зарядных устройств большей номинальной мощности. При этом необходимо увеличить размеры радиаторов транзисторов и произвести перенастройку преобразователя напряжения на другие уровни напряжения. Дополнительную возможность для изменения параметров может дать изменение соотношения числа витков излучающей и приемной катушек индукционного преобразователя.

Список литературы

1. <http://www.enstroj.si/Electric-products/emrax-268.html>
2. Richard Van Noorden. Der Akku wird neu erfunden. <http://www.spektrum.de>
3. <http://de.wikipedia.org/wiki/Elektromobilit>
4. E.Nolle, N.Neuberger, R.Banschbach, I.Kovalenko. Kontaktlose Energieübertragung für eine Solartankstelle, Induktivitäten räumlich ausgedehnter Spiralspulen. HE Spektrum, Nr. 39, 2014.
5. http://www.mikrocontroller.net/articles/Royer_Converter
6. 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.