

Беспроводная передача энергии большой мощности для устройств, работающих в условиях промышленной среды

Часть 1

Андреас Надлер, Кем Сом (Würth Elektronik eiSos GmbH & Co. KG)
Перевод, дополнения и комментарии: Владимир Рентюк

Цель настоящей статьи – продемонстрировать, что простые в использовании устройства для беспроводной передачи мощностью 100 Вт или более можно разработать на базе обычных схемотехнических решений, без использования программного обеспечения или специальных управляющих контроллеров.

В первой части рассматриваются принципы беспроводной передачи энергии и базовое схемотехническое решение.

Авторский перевод предлагаемой статьи с дополнениями и комментариями выполнен на основе оригинальной публикации [1].

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время в потребительской электронике наблюдается заметный рост популярности использования технологии беспроводной передачи энергии. Разработчики промышленного и медицинского оборудования, оценив неоспоримые преимущества данной технологии, также обратили на неё внимание. В первую очередь это связано с массовым применением беспроводных коммуникационных технологий, таких как WLAN и Bluetooth, – именно вместе с ними беспроводная передача питания стала весьма многообещающей концепцией. С использованием этой техноло-

гии становятся доступными совершенно новые подходы, которые не только дают явные технические преимущества, но и открывают возможности для передовых решений в области промышленного оборудования.

Беспроводная технология передачи энергии, или WPT (Wireless Power Transfer), даёт возможность менять подходы в проектировании на уровне концепции. Особенно это хорошо заметно в тех промышленных секторах, где оборудование работает в неблагоприятных экологических условиях, при использовании агрессивных моющих и очищающих средств, при высоком уровне

загрязнения или с большими механическими нагрузками. Это касается и оборудования, предназначенного для работы в потенциально взрывоопасной среде, медицине, а также в строительных машинах, которые подвергаются воздействию многократных ударов и вибрации, – здесь, например, можно будет отказаться от дорогих и ненадёжных скользящих токосъёмников и контактов. Ещё одна перспективная область применения рассматриваемой технологии – передача энергии без гальванической связи через изоляционные барьеры, которые должны удовлетворять особому требованию, такому как наличие усиленной или двойной изоляции. Особенно это касается критически важных, с точки зрения безопасности, приложений, в частности промышленного оборудования специального применения, шахтного и взрывозащищённого оборудования, а также медицинской аппаратуры, где требования по безопасности всё больше ужесточаются [1, 2]. Проблема использования изоляции заключается в её деградации как чисто физической, так и вследствие частичных разрядов [5]. И первое, и второе, как можно видеть, полностью отсутствуют в рассматриваемой технологии передачи энергии.

ZVS-ГЕНЕРАТОР (РЕЗОНАНСНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ)

В основе предлагаемого к рассмотрению решения лежит классический резонансный преобразователь по схеме Ройера (самовозбуждающийся генератор с магнитной связью), который используется в качестве основного генератора для передачи энергии.

Выбранный тип генератора обладает следующими важными преимуществами:

- для его автоматического возбуждения достаточно лишь подачи напряжения постоянного тока;

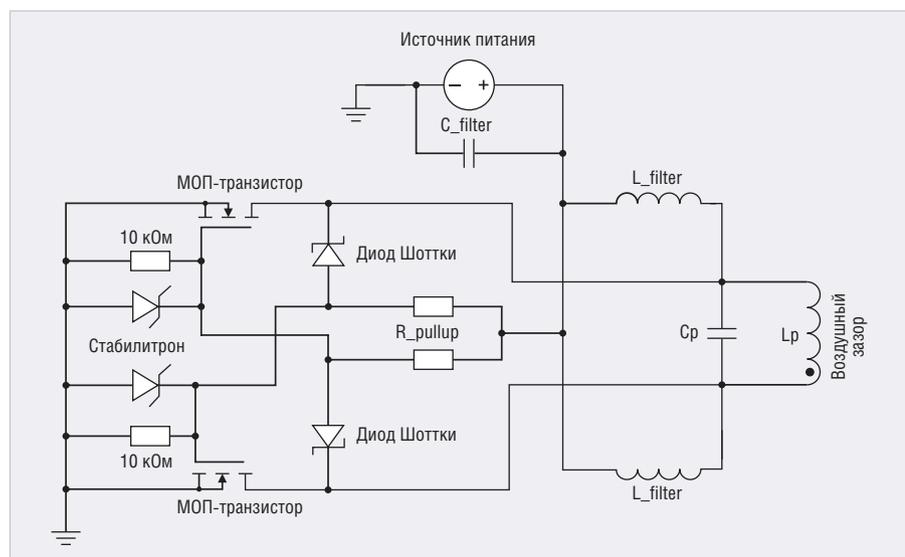


Рис. 1. Базовая схема резонансного преобразователя

- форма тока и напряжения почти синусоидальная;
- не требует контроллера и управляющего программного обеспечения;
- легко масштабируется на мощность 1...200 Вт;
- ключи, выполненные на МОП-транзисторах, переключаются практически по нулевому напряжению (отсюда и его второе название – ZVS-генератор, от англ. Zero-Voltage Switching, в данном случае – переключение при нулевом напряжении);
- легко настраивается под различные уровни напряжений и токов.

Принципиальная базовая электрическая схема преобразователя Ройера приведена на рисунке 1 и представляет собой схему передатчика энергии, которая нагружена на передающую катушку L_p . Приём энергии также выполняется через катушку индуктивности как аналогично, так и иного конструктивного исполнения. Варианты конструктивного исполнения катушек приведены на рисунке 2.

ПРИНЦИП РАБОТЫ

Резонансный преобразователь, как правило, действует с постоянной рабочей частотой генерации, которая определяется резонансной частотой параллельного колебательного контура, образованного элементами L_p и C_p . Как только на схему будет подано напряжение питания постоянного тока, она, из-за наличия неизбежного разброса параметров МОП-транзисторов, войдёт в автоколебательный режим. При подаче питания, буквально за доли секунды, один из двух МОП-транзисторов окажется открыт более, чем другой. Положительная обратная связь по затворам МОП-транзисторов по отношению к стоку противоположного менее открытого МОП-транзистора приводит к фазовому сдвигу на 180° , и эти два ключа всегда будут в противофазе друг к другу и никогда не включатся одновременно (см. рис. 3). Таким образом, при правильно выполненной конфигурации наличие сквозных токов в данной схеме в принципе невозможно. МОП-транзисторы поочередно подключают параллельный колебательный контур на общий провод («землю»), причём его противоположный конец подсоединён к источнику питания, что позволяет периодически перезаряжать резонансный контур.

На рисунке 4 отображена форма напряжения непосредственно на катушке. Как можно видеть, она практически синусоидальная, о чём и говорилось выше.

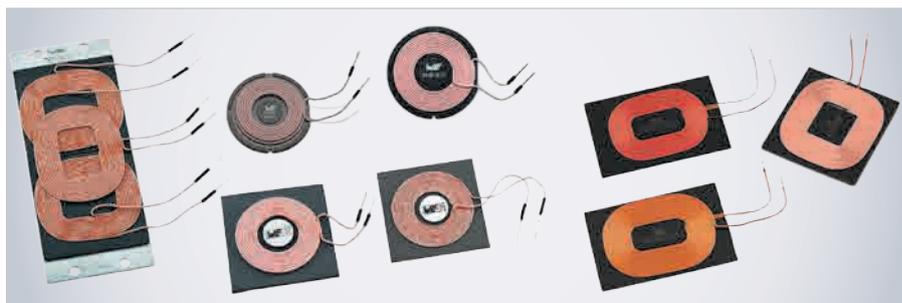


Рис. 2. Беспроводные силовые приёмные и передающие катушки от компании Würth Elektronik



Рис. 3. Осциллограммы напряжений, измеренных на стоках транзисторов (концах катушки передатчика), показаны синим и красным цветом. Жёлтым и зелёным показана форма напряжения на затворах. Напряжения измерены относительно общего провода (GND) при напряжении питания $V_{in} = 20$ В и выходной мощности $P_{out} = 100$ Вт



Рис. 4. Осциллограмма напряжения непосредственно на катушке передатчика без привязки к общему проводу GND при $V_{in} = 20$ В и $P_{out} = 100$ Вт

Резонансная частота преобразователя определяется как резонансная частота идеального колебательного контура:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}},$$

где L – индуктивность катушки колебательного контура L_p ; C – ёмкость конденсатора колебательного контура C_p .

Поскольку мы имеем дело с реальным контуром, его резонансная частота f_r



Рис. 5. Отражённые пульсации напряжения и шумы на шине питания передатчика при $V_{in} = 20$ В и $P_{out} = 100$ Вт



Рис. 6. Испытание системы беспроводной передачи энергии с воздушным зазором 6,5 мм ($V_{in} = 20$ В постоянного тока, $P_{out} = 100$ Вт)

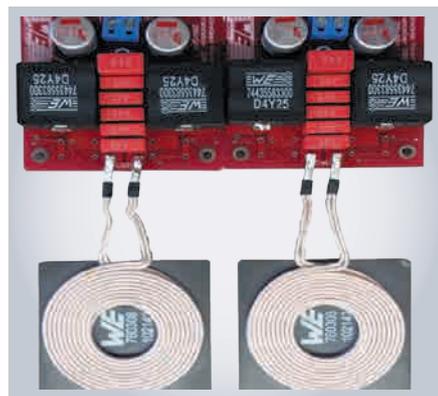


Рис. 7. Внешний вид составляющих системы беспроводной передачи энергии с воздушным зазором 6,5 мм ($V_{in} = 20$ В постоянного тока, $P_{out} = 100$ Вт)

без учёта коэффициента связи определяется как резонансная частота колебательного контура с потерями:

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R_{dc}^2}{L^2}} = f_0 \sqrt{1 - \frac{R_{dc}}{Z_p}}$$

где R_{dc} – сопротивление катушки L_p по постоянному току; Z_p – импеданс колебательного контура.

В свою очередь, импеданс колебательного контура Z_p определяется как:

$$Z_p = \frac{-jX_L X_C}{X_L - X_C},$$

где X_L – сопротивление (здесь и далее для реактивных элементов под «сопротивлением» имеется ввиду модуль импеданса) катушки индуктивности L_p , $X_L = 2\pi f \times L$; X_C – сопротивление конденсатора C_p , $X_C = 1/2\pi f \times C$.

Ещё одна особенность топологии схемы заключается в том, что переключательные ключи всегда происходит в точке, близкой к нулю напряжения. Это означает, что коммутационные потери (потери на переключение) в МОП-транзисторах очень низкие. С другой стороны, недостатком данной топологии является то, что потребляемая ею мощность на холостом ходу оказывается относительно высокой. Причина – в наличии реактивных токов, постоянно циркулирующих в колебательном контуре. Соответственно, в идеале такой резонансный преобразователь должен работать только при подключении внешней нагрузки, а точнее – при обнаружении с ней магнитной связи. Кроме того, следует учитывать, что резонансная частота колебательного контура зависит от коэффициента связи с приёмной катушкой. Причина в том, что поскольку обе катушки (приёмная и передающая) располагаются параллельно, то наличие отражённого импеданса со стороны приёмника влияет на индуктивность намагничивания

катушки передатчика. Уменьшающийся коэффициент связи вызывает повышение частоты, поскольку в этом случае индуктивность намагничивания катушки передатчика уменьшается. Более подробно о выборе катушек приёмника и передатчика, а также о принципе передачи энергии, который лежит в основе рассматриваемого метода, а именно взаимодействие в области ближнего поля, написано в публикации [4].

Базовая схема преобразователя, показанная на рисунке 1, в зависимости от используемых компонентов может работать при напряжении питания 3,3–230 В и выше. При использовании напряжения питания более 20 В необходимо обратить внимание на защиту от прикосновения, поскольку в этом случае напряжение на колебательном контуре с учётом π -фактора будет выше уровня безопасного сверхнизкого напряжения SELV (Safety Extra Low Voltage). Согласно действующим стандартам порог безопасного напряжения установлен на уровне 50 В переменного тока (действующее значение) или 120 В постоянного (выпрямленного) напряжения [2].

Что касается эффективности (КПД) схемы беспроводной передачи мощности, на практике она может превышать 90%. Это достаточно хороший показатель, поскольку в него уже включены потери на связь через воздушный зазор, а выходное напряжение рассматривается как готовое к использованию, выпрямленное и сглаженное постоянное напряжение. Уровень КПД остаётся без изменения при воздушном зазоре в пределах 4–10 мм. Это связано с тем, что большая доля энергии магнитного поля, не связанная со стороной приёмника, возвращается обратно в колебательный контур. В зависимости от конкретного применения возможно увеличение расстояния до 18 мм, однако здесь должен соблюдаться известный компромисс между коэффициентом связи катушек передатчика и приёмника и выполнением требований стандартов в части электромагнитной совместимости (ЭМС) устройства. Информация о том, что нужно знать об испытаниях на выполнение нормативов по ЭМС для изделий коммерческого назначения по уровням требований, методикам измерений и используемому оборудованию, соответствующим международным стандартам и стандартам, действующим на территории Российской Федерации, приведена в [7].

КПД решения может быть повышен за счёт использования для управле-

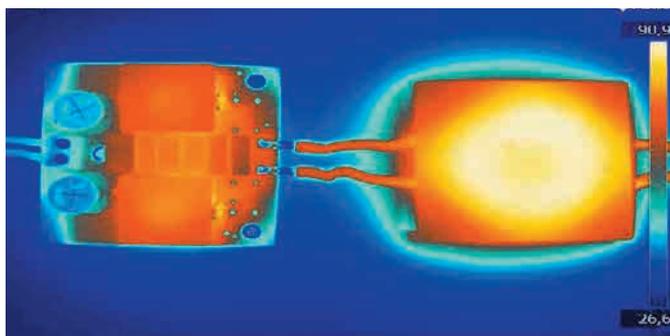


Рис. 8. Распределение температуры (верхняя сторона = фильтр + конденсаторы) схемы и катушек для $P_{out} = 100$ Вт ($V_{in} = 20$ В)

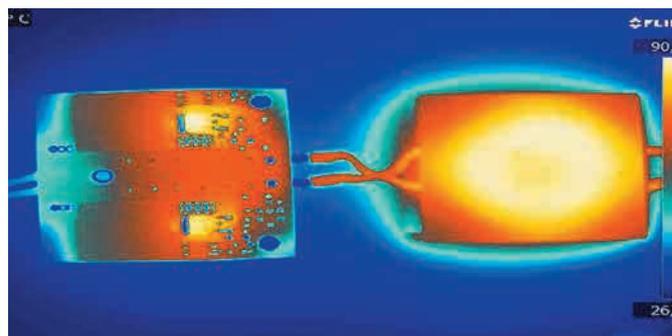


Рис. 9. Распределение температуры (нижняя сторона = МОП-транзистор + драйвер затвора) схемы и катушек для $P_{out} = 100$ Вт ($V_{in} = 20$ В)

ния затворами вместо диодов Шоттки небольших МОП-транзисторов малой мощности или применения двухтактного драйвера на биполярных транзисторах, об этом подробно сказано в [1].

При напряжении питания свыше 20 В для управления затворами МОП-транзисторов может использоваться либо емкостной делитель напряжения, либо дополнительный источник напряжения DC/DC-преобразователя, например высокоэффективный и компактный модуль питания серии MagI³C компании Würth Elektronik [6]; подробнее об этом в [1].

Как уже было сказано, схема, размещённая на стороне передатчика, может использоваться и для приёмника. В этом случае резонансный преобразователь работает как синхронный выпрямитель. Но здесь необходимо учитывать, что резонансная частота контура приёмника в общем случае (отдельные варианты будут рассмотрены далее) должна быть достаточно близкой к частоте передатчика. Именно это создаёт максимальный эффект поглощения энергии. Параллельный колебательный контур на стороне приёмника, который является вторичной стороной, ведёт себя, как нагрузка со стабилизацией по току, то есть как генератор постоянного втекающего тока. Именно это позволяет значительно повысить общую эффективность схемы. Кроме того, ёмкость конденсатора в контуре должна быть выбрана с таким расчётом, чтобы компенсировать влияние на катушку приёма энергии всех паразитных индуктивностей. Если схема настроена должным образом, подчеркнём – должным образом, то приёмник может подавать неиспользованную энергию назад в передатчик, как это делает при работе на нагрузку, например, «идеальный», или «умный», диод компании Linear Technology. В рассматриваемом примере – это МОП-транзистор с каналом

N-типа. В момент подключения входного напряжения, конечно, если входное напряжение больше выходного, ток через защитный диод транзистора течёт в нагрузку. Транзистор открывается, и падение напряжения на нём равно $I_{load} \times R_{ds,on}$ (где $R_{ds,on}$ – сопротивление канала транзистора в открытом состоянии, а I_{load} – ток нагрузки по стоку). Как правило, это напряжение примерно в 10 раз ниже, чем падение напряжения на диоде Шоттки. Если напряжение на аноде такого диода меньше, чем на катоде, транзистор закрывается.

Что касается пульсаций входного напряжения, для их уменьшения по входу (цепь подачи питания) целесообразно использовать полимерные и керамические конденсаторы с низким уровнем собственного эквивалентного последовательного сопротивления ESR (Equivalent Series Resistance) (см. рис. 5).

Для приведения снятой энергии к возможности её практического использования, на стороне приёмника можно установить классический мостовой выпрямитель. Преимущество такого решения заключается в более высоком выходном напряжении, снижении затрат и экономии пространства, но за счёт снижения КПД из-за потерь на диодах.

Под нагрузкой частота преобразования и передачи энергии, как правило, не должна превышать 150 кГц, иначе потери в конденсаторах и катушках колебательных контуров передатчика и приёмника будут слишком большими. Кроме того, предел нормирования конденкативных (наведённых) электромагнитных помех на линии питания обычно находится выше частоты 150 кГц (но, например, CISPR15 EN55015 для некоторых типов оборудования устанавливает границы от 9 кГц до 30 МГц, и это надо учитывать) [7]. Поэтому участок 105...140 кГц является наилучшим компромиссом, гарантирующим, что вы остаётесь в безопасном диапа-

зоне в соответствии с утверждённым в настоящее время диапазоном частот для индуктивной передачи энергии (100...205 кГц).

Общий вид одного из вариантов решения системы беспроводной передачи энергии приведён на рисунках 6 и 7, а распределение температур – на рисунках 8 и 9.

В следующей части будут рассмотрены аспекты, связанные с электромагнитными помехами (ЭМП) и вытекающими из этого вопросами соответствия устройств беспроводной передачи энергии большой мощности, которые работают в условиях промышленной среды, требованиям по электромагнитной совместимости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Nadler A., Som C. ANP032e – High Power Wireless Power Transfer for the Industrial Environment. Würth Elektronik eiSos GmbH. www.we-online.com/web/en/electronic_components/produkte_pb/application_notes/anp032.php.
2. Бейлис А.М. Безопасное использование DC/DC-преобразователей: требования третьей редакции стандарта IEC 60601-1. Компоненты и технологии. 2015. № 11.
3. Рентюк В., Филатов В. Источники питания с высоким пробивным напряжением по изоляции. Безопасность превыше всего. Компоненты и технологии. 2016. № 3.
4. Рагу Н. Выбор катушек для беспроводных зарядных устройств. Компоненты и технологии. 2015. № 9.
5. Ли П. Результаты тестирования изоляции DC/DC-преобразователей питания драйверов затвора на её устойчивость к частичным разрядам. Компоненты и технологии. 2016. № 7.
6. www.katalog.we-online.de/en/pm.
7. Рентюк В. Что нужно знать об испытаниях на выполнение требований по ЭМС для изделий коммерческого назначения. Компоненты и технологии. 2017. № 7.

