

Выбор катушек для беспроводных зарядных устройств

Рагу НАРАЯНАН
(Raghu NURAYANAN)
Перевод: Владимир РЕНТЮК

Введение

Все известные электронные технологии были, в основном, обусловлены требованиями потребительского рынка электроники. И только впоследствии индустрия и другие подобные секторы промышленности, приняли их преимущества, после апробации технологий. Это позволило им снизить затраты и время на разработку аналогичных изделий, но уже адаптированных для своих целей. Цель этой статьи заключается в разъяснении методики того, как в демонстрационном комплекте системы беспроводного зарядного устройства DC1967A [2, 3], включающей чип управления приемником LTC4120, изменить катушки индуктивности для беспроводной передачи энергии производства компании Würth Elektronik eiSos.

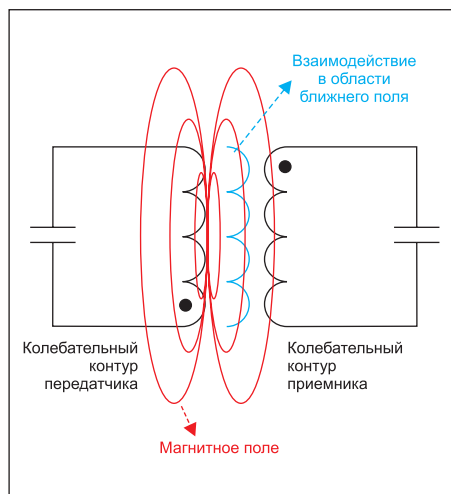


Рис. 1. Принцип беспроводной передачи мощности

Беспроводные зарядные устройства становятся все более и более распространенными в таких новых гаджетах, как: смартфоны, планшеты, ноутбуки и т. д. При существующих темпах технологического роста можно уже сейчас с уверенностью предположить, что в будущем большинство электронных устройств будут заряжаться или непосредственно получать питание без прямой проводной связи с его источником. Таким образом, как ожидается, количество производителей катушек индуктивности для беспроводных зарядных устройств и чипов управления, вырастет до уровня удовлетворения растущего потребительского спроса. На этом этапе возникает вопрос, чем этот рынок интересен для компании Würth Elektronik?

Этот материал был подготовлен для пояснений и рекомендаций по общим проблемам, связанных с применением катушек индуктивности, используемых для беспроводных зарядных устройств. Это связано с необходимостью их адаптации для использования в различных портативных устройствах, поэтому, предвидя, что такие изменения потребуются, мы решили помочь инженерам в разработке их конечных продуктов.

Принцип беспроводной передачи энергии

Беспроводная передача энергии от катушки передатчика к катушке приемника использует известный принцип индуктивной связи (рис. 1). Однако недавние исследования доказывают, что если два резонансных контура, разработанных с минимальными потерями и собственным поглощением мощности (то есть с высокой добротностью Q), будут настроены на одну и ту же резонансную частоту и находиться в области ближнего поля, то благодаря такой связи передача энергии от передатчика к приемнику осуществляется с гораздо большей эффективностью.

Для эффективной работы беспроводной системы зарядки необходимо, чтобы частоты контуров передатчика и приемника были настроены одинаково. Для различных значений индуктивностей передающей и приемной катушек, чтобы получить одну и ту же резонансную частоту, необходимо внести изменения в связанные с ними части схемы. Это исследование наглядно демонстрирует уникальные преимущества применения для беспроводных зарядных систем катушек компании Würth Elektronik.

Катушки Würth Elektronik eiSos для беспроводных зарядных устройств

Компания Würth Elektronik eiSos является членом консорциума по беспроводной передаче энергии WPC (Wireless Power Consortium) и альянса по системам беспроводного питания A4WP (Alliance for Wireless Power), в настоящее время известного как Rezence. Компания занимается самостоятельной разработкой конструкции различных катушек для беспроводных приемников и передатчиков, которые полностью совместимы со стандартом Qi. На рис. 2 и 3 показаны примеры нескольких передающих и приемных катушек компании для беспроводных решений в области систем питания.

Ниже приведены типы катушек от Würth Elektronik eiSos для приемника и передатчика, которые были использованы в настоящем исследовании:

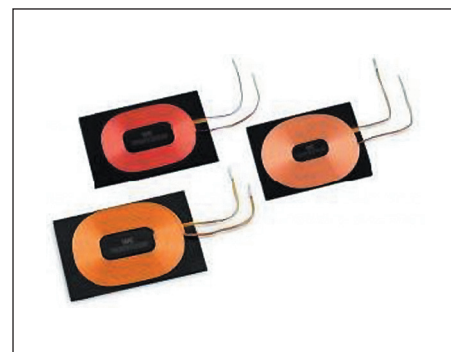


Рис. 2. Приемные катушки компании Würth Elektronik eiSos



Рис. 3. Передающие катушки компании Würth Elektronik eiSos

Передающие катушки:

1. 760 308 111.
2. 760 308 110.
3. 760 308 104 113.
4. 760 308 101 302.

Приемные катушки:

1. 760 308 201.
2. 760 308 101 303.

Контроллер беспроводного зарядного устройства

Как уже отмечалось выше, для данного исследования был выбран контроллер беспроводного зарядного устройства LTC4120, который представляет собой приемник беспроводного зарядного устройства на ток 400 мА с повышающим импульсным преобразователем на одном чипе. Контроллер LTC4120 приемника используется в составе демонстрационной платы DC1967A, входящей в комплект DC1969A. Резонансная частота колебательного контура приемника составляет 127 кГц при согласованной настройке и 140 кГц при его рассогласовании. Демонстрационная плата приемника DC1967A показана на рис. 4.

Технические особенности контроллера LTC4120:

- Динамическое согласование управления DHC (Dynamic Harmonization Control) оптимизирует работу беспроводного за-

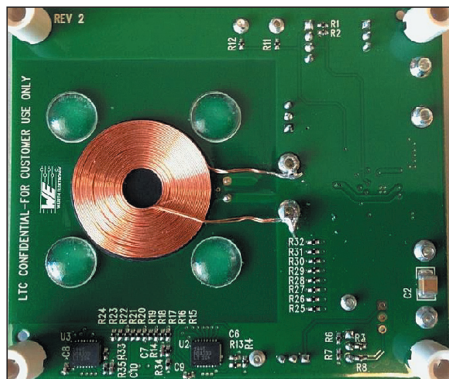


Рис. 4. Демонстрационная плата приемника DC1967A с приемной катушкой 760 308 101 303

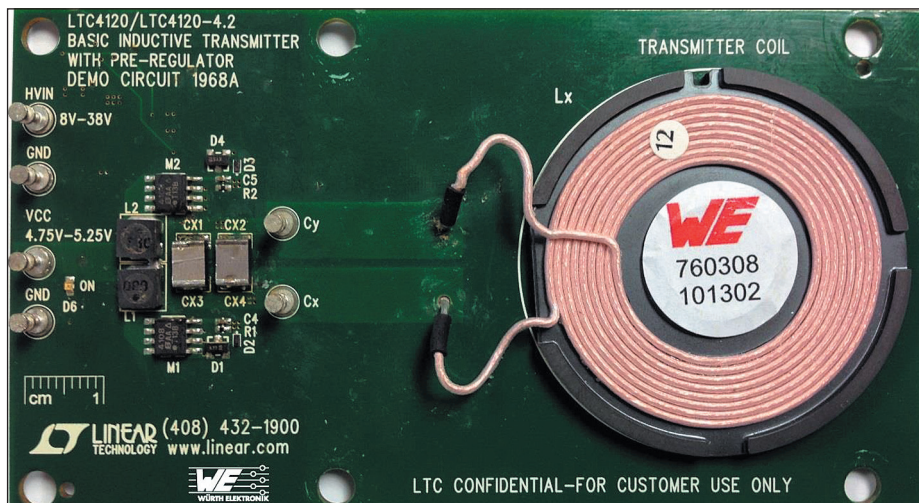


Рис. 5. Демонстрационная плата передатчика DC1968A с передающей катушкой 760 308 101 302

рядного устройства в широком диапазоне изменения коэффициента связи с контурной катушкой передатчика.

- Широкий диапазон входного напряжения: от 4,3 до 40 В.
- Регулируемое напряжение холостого хода: от 3,5 до 11 В.
- Ток заряда батареи от 50 до 400 мА, программируется с помощью лишь одного резистора:
 - точность напряжения обратной связи $\pm 1\%$;
 - точность программирования тока заряда 5%;
 - отсутствие ферритового сердечника в катушке.

Беспроводной передатчик в виде демонстрационной платы DC1968A (рис. 5), входящий в комплект DC1969A, является базовым передатчиком, который в своей схеме использует несинхронизированный мульти-вибратор с частотой колебаний, определяемой резонансной частотой колебательного контура, катушка которого возбуждается от источника тока. Частота колебаний установлена равной 130 кГц. Тем не менее эта частота будет изменяться в зависимости от нагрузки, которой является колебательный контур приемника, и коэффициента связи между катушками приемника и передатчика. Существует еще один вариант передатчика производства компании PowerbyProxi, Ltd. Он имеет дополнительное преимущество в виде автоматического обнаружения внешних посторонних объектов, например монет или иных металлических предметов, и низкой собственной потребляемой мощности в режиме ожидания.

Функция DHC, реализованная в контроллере LTC4120, осуществляет управление частотой резонансного контура приемника, удаляя или приближая ее к резонансной частоте передатчика. Она основана на мощности, требуемой для батареи (нагрузки). Когда связь между передающей и приемной катушками высока, то для того, чтобы ограничить передачу мощности, частота резонанса приемника будет скорректирована в сторону ее удаления (то есть она будет расстроена) от частоты передатчика. А когда связь между передающей и приемной катушками мала, то частота резонанса приемника будет корректироваться таким образом, чтобы увеличить прием мощности от передатчика. Важно отметить, что контроллер на микросхеме LTC4120 обеспечивает гальваническую развязку без использования каких-либо сердечников, как это характерно для обычных трансформаторов с индуктивной связью.

Катушки компании Würth Elektronik для беспроводной передачи мощности и их технические характеристики

Номера использованных в этом исследовании катушек для беспроводной передачи мощности приведены выше, а их краткое описание и технические характеристики, необходимые для дальнейших расчетов, представлены в таблицах 1 и 2.

Передающие катушки

Технические характеристики катушек для передатчиков приведены в таблице 1.

Таблица 1. Основные технические характеристики передающих катушек

Номер катушки	Индуктивность, мкГн	Сопротивление по постоянному току, мОм	Добротность, Q	Типоразмер	Рабочий ток, I _{rated} , А, при 40 °С
760 308 111	6,3	17	80	5353	13
760 308 110	24	7	180	5353	6
760 308 104 113	12	60	120	6052	6
760 308 101 302	5,3	33	100	∅50	6

Приемные катушки

Технические характеристики катушек для приемников приведены в таблице 2.

Исходные положения для проведения оценочных исследований

Перед тем как установить катушки на платы комплекта для проведения анализа, сначала необходимо разобраться в особенностях функционирования и возможностях контроллера беспроводного зарядного устройства LTC4120, а также в технических характеристиках самих катушек. Выше был приведен перечень катушек для беспроводных передатчиков и приемников, которые будут рассматриваться для сравнительной оценки на платах DC1968A и DC1967A соответственно. Выше уже было кратко сказано о функциях и возможностях этих демонстрационных плат из комплекта DC1969A. Главное здесь то, что для обеспечения хорошего синусоидального сигнала от передатчика его передающая катушка колебательного контура возбуждается от источника тока.

Как указано в спецификации на микросхему контроллера LTC4120, идеальным соотношением при выборе значений индуктивностей L_x (катушка передатчика) и L_r (катушка приемника) является отношение 1:3 (здесь и далее условные обозначения элементов приведены в соответствии с публикациями [2, 3]). Однако значения индуктивности могут быть выбраны так, что размер и номинальное значение индуктивности катушки не будет слишком велико (если используется слишком малое значение емкости конденсатора на стороне передатчика), а циркулирующий ток в передающем конце не слишком высок (в случае слишком малой величины индуктивности на первичной стороне). Для правильного выбора резонансных катушек индуктивности и конденсаторов следует использовать обратный анализ, как это показано ниже.

Значения индуктивностей можно выбрать таким образом, чтобы размер требуемой катушки был не слишком велик (если значение емкости конденсатора на стороне передатчика слишком малое), а циркулирующий ток в передающей катушке не слишком высок (при слишком малом значении индуктивности на первичной стороне). Для правильного выбора резонансных контуров катушек индуктивности и конденсаторов применим метод обратного анализа.

Катушка приемника и резонансная частота приемного контура

Катушка контура приемника, которая используется в составе платы DC1967A (приемник) из оценочного комплекта DC1969A, имеет индуктивность 47 мкГн. Она выполнена в виде интегрированной в плату катушки, реализованной из печатных проводников четырехслойной платы с ферритовой внешней

Таблица 2. Основные технические характеристики приемных катушек

Номер катушки	Индуктивность, мкГн	Сопротивление по постоянному току, мОм	Добротность, Q	Типоразмер	Рабочий ток, I _{rated} , А, при 40 °С
760 308 201	10	160	50	3737	4,5
760 308 101 303	47	460	25	∅26	1,4

основой. Чтобы достичь большей эффективности, компания Würth Elektronik eiSos может предложить свою катушку, технические характеристики которой значительно превосходят параметры катушек, выполненных в виде проводников печатной платы, — например, катушку 760 308 101 303, чьи краткие технические характеристики приведены в таблице 2. Для получения подробной технической информации можно скачать описание катушки на сайте www.we-online.com/wirelesspower.

Частота колебательного контура приемника меняется с 127 на 142 кГц. В настроенном состоянии резонансная частота F_t определяется емкостями двух конденсаторов — C_2P и C_2S , а при отстройке контура его резонансная частота F_d определяется только емкостью конденсатора C_2S :

$$F_t \cong \frac{1}{2 \times \pi \times \sqrt{L_r \times (C_2P + C_2S)}};$$

$$F_d \cong \frac{1}{2 \times \pi \times \sqrt{L_r \times C_2S}}.$$

При расчете с помощью приведенной выше формулы для резонансной частоты при отстройке ($F_d = 142$ кГц) необходимая емкость конденсатора C_2S будет равна 26,7 нФ.

Требуемую суммарную емкость в 26,7 нФ как раз обеспечивает параллельное подключение конденсаторов емкостью 22 и 4,7 нФ.

Следует обратить внимание, что эти номиналы, по-видимому, были выбраны из-за ограничений по номиналам широкодоступных стандартных емкостей конденсаторов и реальная частота отстройки будет равна 142, а не 140 кГц, как это указано в [3].

Аналогичным образом для резонансной частоты при настройке ($F_t = 127$ кГц) нужная емкость конденсатора C_2P равна 6,75 нФ. Ближайшее значение стандартной емкости 6,8 нФ.

Конденсаторы, используемые в плате приемника из комплекта DC1969A, имеют емкость 1,8 и 4,7 нФ и они подключены параллельно. С этим суммарным значением емкости частота настройки контура составит почти 130 кГц.

Катушка передатчика и резонансная частота передающего контура

Теперь, когда катушка приемника выбрана и значение ее индуктивности 47 мкГн известно, можно выбрать катушку для передатчика. Выбор делается так, чтобы удовлетворить соотношение витков 1:3, как это рекомендо-

вано в спецификации на микросхему контроллера LTC4120. Соотношение витков рассчитывается как:

$$n = \frac{nR}{nX} = \sqrt{\frac{L_r}{L_x}};$$

$$32 = 9 = 47 \text{ мкГн}/L_x.$$

Отсюда:

$$L_x = 5,2 \text{ мкГн}.$$

Для выполнения этого условия компания Würth Elektronik eiSos предлагает решение в виде катушки 760 308 101 302, имеющей индуктивность 5,3 мкГн с рабочим током до 6 А, собственное сопротивление этой катушки по постоянному току 33 мОм, а добротность $Q = 100$.

В этом случае частота резонанса составит:

$$F_0 \cong \frac{1}{2 \times \pi \times \sqrt{L_x \times C_x}} = 130 \text{ кГц}.$$

Для того чтобы удовлетворить требованию по резонансной частоте передатчика в 130 кГц, понадобится конденсатор C_x емкостью 283 нФ. Поскольку это не является стандартным значением, то мы, чтобы добиться нужной резонансной частоты, будем использовать два конденсатора емкостью 180 и 100 нФ в параллельном включении. Для установки точной резонансной частоты необходимо использовать конденсаторы с малыми допустимыми отклонениями собственной емкости.

Фактическая емкость частотозадающего конденсатора (в нашем случае общая емкость двух конденсаторов) в контуре будет равна 280 нФ, и при этой емкости резонансная частота составит:

$$F_0 = 130,71 \text{ кГц}.$$

Значение частоты F_0 получилось на 0,5% выше, чем номинальная требуемая частота. Тем не менее отметим, что изначальное значение емкости в DC1969A — это два конденсатора (ECHU1H154GX9) по 0,15 мкФ. То есть если использовать данные конденсаторы, то резонансная частота будет равна 126,3 кГц (без нагрузки контура).

Какое выбрать значение коэффициента трансформации (n)?

Как уже отмечалось, соотношение витков между катушками передатчика и приемника



Рис. 6. Осциллограммы, соответствующие измерениям для выбранных вариантов сочетания катушек индуктивности: а) вариант № 1, Тх-WE #760 308 101 302, L — 5,3 мкГн; б) вариант № 2, Тх-WE #760 308 104 113, L — 12 мкГн

предложено в спецификации на LTC4120 как 1:3 [4], однако оно может быть обеспечено при самых различных комбинациях и с самой различной точностью, поскольку точно выполнить данное условие достаточно сложно. Какой же эффект это вызовет в реальном исполнении? Чтобы получить больше энергии от катушки, схема была модифицирована установкой выходного напряжения 8,23 В. При этом схема будет в состоянии обеспечить, насколько это возможно, максимальный ток и сохранить максимальную эффективность. Для этого рассмотрим несколько возможных вариантов*.

Коэффициент передачи, отношение витков:

$$n = \frac{nR}{nX} = \sqrt{\frac{Lr}{Lx}}$$

Эффективность, КПД:

$$\eta = (V_{IN_LR} \times I_{IN}) / (V_{CC} \times I_{IN_PUT}) \times 100\%$$

Вариант № 1

Катушка передатчика Тх: тип 760 308 101 302 (5,3 мкГн, 33 мОм, Q = 100, рабочий ток 6 А). Катушка приемника Rx: тип 760 308 101 303 (47 мкГн, 460 мОм, Q = 25, рабочий ток 1,4 А). Коэффициент передачи n = 3.

Результаты измерений:

- V_{CC} = 5 В;
- I_{IN_PUT} = 0,973 А;
- V_{IN_LR} = 15,04 В;

* Примечание.

V_{IN_LR} — напряжение на контрольной точке VIN платы контроллера DC1967A;
 I_{IN} — ток в приемной катушке;
 V_{CC} — входное напряжение платы передатчика DC1968A;
 I_{IN_PUT} — ток потребления от V_{CC};
 V_{OUTPUT} — выходное напряжение;
 I_{OUTPUT} — выходной ток заряда батареи;
 P_{MAX_BAT} — максимальная мощность, отданная для заряда батареи.

- I_{IN} = 0,239 А;
- V_{OUTPUT} = 8,21 В;
- I_{OUTPUT} = 0,275 А;
- P_{MAX_BAT} = 4,865 Вт;
- эффективность, КПД: η = 73,9%.

Вариант № 2

Катушка передатчика Тх: тип 760 308 104 113 (12 мкГн, 60 мОм, Q = 120, рабочий ток 7 А). Катушка приемника Rx: тип 760 308 101 303 (47 мкГн, 460 мОм, Q = 25, рабочий ток 1,4 А). Коэффициент передачи n = 1,97.

Результаты измерений:

- V_{CC} = 5 В;
- I_{IN_PUT} = 0,224 А;
- V_{IN_LR} = 11,85 В;
- I_{IN} = 0,072 А;
- V_{OUTPUT} = 8,23 В;
- I_{OUTPUT} = 0,005 А;
- P_{MAX_BAT} = 1,12 Вт;
- эффективность, КПД: η = 76,2%.

Вариант № 3

Катушка передатчика Тх: тип 760 308 110 (24 мкГн, 7 мОм, Q=180, рабочий ток 6 А). Катушка приемника Rx: тип 760 308 101 303 (47 мкГн, 460 мОм, Q=25, рабочий ток 1,4 А). Коэффициент передачи n = 1,4.

Результаты измерений:

- V_{CC} = 5 В;
- I_{IN_PUT} = 0,1 А;
- V_{IN_LR} = 11,65 В;
- I_{IN} = 0,025 А;
- V_{OUTPUT} = 8,23 В;
- I_{OUTPUT} = 0,013 А;
- P_{MAX_BAT} = 0,5 Вт;
- эффективность, КПД: η = 58,3%.

Вариант № 4

Катушка передатчика Тх: тип WT-505060-8K2-LT (5,0 мкГн, 30,3 мОм, Q = 80, X А).

Катушка приемника Rx: тип 760 308 101 303 (47 мкГн, 460 мОм, Q = 25, рабочий ток 1,4 А). Коэффициент передачи n = 3,07.

Результаты измерений:

- V_{CC} = 5 В;
- I_{IN_PUT} = 1,159 А;
- V_{IN_LR} = 13,16 В;
- I_{IN} = 0,314 А;
- V_{OUTPUT} = 8,21 В;
- I_{OUTPUT} = 0,275 А;
- P_{MAX_BAT} = 5,795 Вт;
- эффективность, КПД: η = 71,3%.

Осциллограммы

Эти осциллограммы соответствуют представленным выше измерениям для возможных комбинаций катушек индуктивности. Здесь канал Ch1 показывает выпрямленный принимаемый сигнал, Ch2 не используется, Ch3 показывает сигнал приемника, а канал Ch4 — выпрямленный ток приемника (рис. 6).

Анализируя эти осциллограммы, можно сделать вывод, что вариант № 1 обеспечивает наилучшую производительность. Выбранные для анализа критерии для катушек это , в частности способность работать на максимальном токе нагрузки при одновременном сохранении несколько более высокого уровня выходного напряжения на стороне приемника. Было замечено, что коэффициент полезного действия при передаче мощности действительно лучше, когда коэффициент трансформации катушек Тх и Rx составляет 1:3. При меньшем соотношении, и очевидно, что мощность сигнала, передаваемая на сторону приемника, уменьшается и, таким образом, система не в состоянии обеспечить достаточный ток в нагрузке. Эта ситуация показана на примерах 2 и 3, где катушки не в состоянии поддерживать необходимую мощность.



Рис. 6. Осциллограммы, соответствующие измерениям для выбранных вариантов сочетания катушек индуктивности: в) вариант № 3, Тх-WE #760 308 110, L — 24 мкГн; г) вариант № 4, Тх-TDK #WT-505060-8K2-LT, L — 5 мкГн

Таким образом, получается, что соотношение витков между катушками передатчика и приемника как 1:3 является существенным фактором, но оно не ограничивается выбором правильного размера, формы и толщины феррита и размещения обмотки с использованием ферритовой базы. Это может быть реализовано с помощью катушек иной конструкции.

Токи в колебательных контурах

Для надежной работы схемы необходимо сделать оценку токов во первичном и вторичном колебательных LC-контурах. Ожидаемое напряжение на первичной катушке равно:

$$\begin{aligned} V_{p-p} &= 2 \times \pi \times V_{inDC}, \\ V_{p-p} &= 2 \times 3,14 \times 5, \\ V_{p-p} &= 31,4 \text{ В.} \end{aligned}$$

Таким образом, амплитуда напряжения на контуре равна: $V_p = 15,7 \text{ В}$.

Реактивное сопротивление предлагаемого для выходного контура передатчика конденсатора емкостью 0,3 мкФ на частоте 126,3 кГц составит:

$$\begin{aligned} X_c &= 1/(2 \times \pi \times f \times C), \\ X_c &= 3,74 \text{ Ом.} \end{aligned}$$

Вышеприведенные вычисления дают в результате амплитудное значение тока, равное примерно 4,2 А, а среднеквадратичное соответственно — 3 А.

Таким образом, каждый из конденсаторов по 0,15 мкФ должен быть выбран из расчета, чтобы на частоте 126,3 кГц он имел допустимое значение рабочего тока по меньшей мере 1,5 А. Для исследования был выбран конденсатор ECHU1H154GX9, для которого ток 1,5 А является допустимым. Кроме того,

ток в этом контуре отличается в зависимости от начальных условий проведения испытания. Уровень тока для каждого из рассмотренных вариантов равен:

1. Вариант № 1 — 2,07 А.
2. Вариант № 2 — 0,931 А.
3. Вариант № 3 — 0,459 А.
4. Вариант № 4 — 2,14 А.

Входной ток приемника

Величина входного тока приемника, необходимого для того, чтобы произвести достаточный вторичный ток для заряда батареи, является функцией напряженности магнитного поля, создаваемого в первичной катушке. А величина напряженности магнитного поля прямо пропорциональна току катушки передатчика, который, в свою очередь, зависит от входного тока I_{Lx} и добротности Q:

$$B = Q \times I_{Lx}$$

Таким образом, при выборе катушки для контура передатчика следует обратить внимание на значение ее добротности. Катушка для передатчика 760 308 101 302 от компании Würth Elektronik eiSos имеет добротность $Q = 100$, что на текущий момент является самым высоким показателем по сравнению с предложениями конкурентов. Входной ток, который должен обеспечить ток в нагрузке, может быть оптимизирован или сведен к минимуму при использовании катушки передатчика с максимально возможным значением добротности и оптимизированным коэффициентом связи. Если коэффициент связи будет более высоким, чем необходимо, то уже функция DHC сможет гарантировать, что избыточная мощность не будет передана на сторону приемника.

Давайте обратимся к вариантам № 1 и № 2, где вариант № 1 имеет высокий входной сигнал и функция DHC активирована, чтобы ограничить уровень напряжения, подаваемого на DC/DC-преобразователь (сигнал на осциллограмме канала 2 имеет резкое падение в каждом импульсе, когда на выводе DHC-контроллера установлен низкий уровень напряжения). По сравнению с вариантом № 1 вариант № 2, коэффициент трансформации которого равен всего 1:2, уже не удовлетворяет условию ($V_{in} > V_{DHC}$), необходимому, чтобы перевести вывод DHC в низкое состояние. Таким образом, эффективность передачи мощности для варианта № 1 является самой высокой среди всех четырех вариантов, которые подверглись проверке.

Сопротивление

по постоянному току (R_{DC})

Активные потери катушек передатчика и приемника прямо пропорциональны их сопротивлениям по постоянному току — R_{DC} поэтому для того, чтобы достичь более высокой эффективности, предпочтительны катушки, имеющие более низкие значения собственного сопротивления. Сопротивление катушки со стороны приемника влияет на эффективность вторичной цепи в соответствии с коэффициентом передачи делителя:

$$RL/(R2+RL).$$

В свою очередь, R_{DC} катушки передатчика Würth Elektronik eiSos (760 308 101 302) равно 33 мОм и при токе 2,2 А и, таким образом, общие потери для нее равны:

$$I^2 \times R_{DC} = 0,16 \text{ Вт.}$$

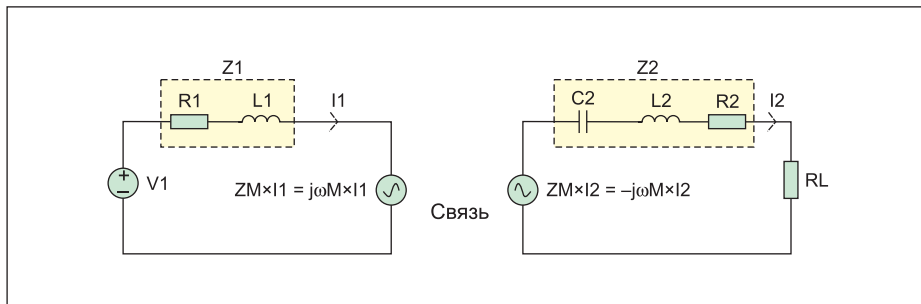


Рис. 7. Связанные резонансные контуры, модель

Вносимый импеданс

Резонансные частоты обоих колебательных контуров, как передатчика, так и приемника, в нагруженном и ненагруженном состоянии разнятся. Поэтому важно понимать, что оказывает влияние на величину вносимого сопротивления в связанные резонансные контуры и как эффект вносимого импеданса влияет на производительность системы. Для этого используем следующие пояснения (рис. 7, 8).

Вносимый импеданс Z_g может быть выражен с помощью следующих уравнений.

Согласно закону Кирхгофа для первого контура (рис. 7):

$$I_1 Z_1 + I_2 ZM = V_1 \tag{1}$$

Согласно закону Кирхгофа с учетом короткого замыкания нагрузки:

$$\begin{aligned} I_1 Z_1 + I_2 ZM &= 0, \\ I_2 &= -I_1 ZM / Z_2. \end{aligned} \tag{2}$$

Подставляя значение I_2 в уравнение 1, получаем:

$$Z_g = V_1 / I_1 = Z_1 - (ZM^2 / Z_2),$$

где $ZM = -j\omega M$, а M — коэффициент взаимной индукции между первым и вторым контурами, получаем:

$$Z_g = Z_1 - (\omega^2 M^2 / Z_2).$$

Следовательно, вносимый импеданс в этой цепи может быть выражен как:

$$\omega^2 M^2 / Z_2.$$

Когда вторичный контур резонирует на той же частоте, что и первичный, то характер вносимого сопротивления в первичный контур будет чисто активным и не носит индуктивный или емкостный характер. Таким образом, мы имеем:

$$Z_2 = R_2 + RL.$$

А внесенное сопротивление, когда оба контура резонируют на одной и той же частоте, будет равно:

$$ReZ_r = (\omega^2 M^2) / (R_2 + RL).$$

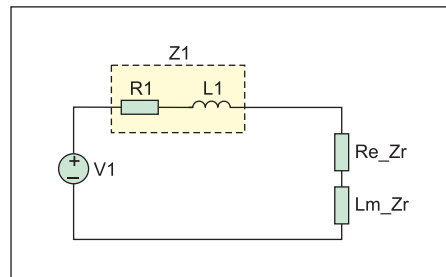


Рис. 8. Эквивалентная модель передающего контура с внесенным импедансом

Эффективность системы, как ожидается, будет повышаться, если значение ReZ_r увеличивается. Тем не менее существенное снижение сопротивления нагрузки RL также будет влиять на эффективность вторичного контура, потому что в этом случае Rs будет доминировать по отношению к падению напряжения. Как мы уже отметили ранее, коэффициент падения напряжения на вторичном контуре равен:

$$RL / (R_2 + RL).$$

Функция DHC

Функция DHC, встроенная в LTC1967A, будет сдвигать частоту резонанса с заданной расстройкой на частоту 140 кГц. Это происходит в том случае, если катушки имеют высокий коэффициент связи, и в результате напряжение в точке V_{IN} превысит 14 В. Контур будет снова настроен на 127 кГц, когда катушки будут иметь низкий коэффициент связи, при котором напряжение V_{IN} лежит ниже порога в 14 В.

Таким образом, при выборе катушки для цепи передатчика важно определить резонансную частоту выше, чем частота настройки контура приемника. Это будет гарантировать, что при одной и той же частоте настройки резонанса приемника и передатчика данная схема будет работать как двойная настроенная резонансная схема. При этом контроллер будет обеспечивать полную передачу мощности в нагрузку.

На рис. 9 приведена осциллограмма, которая показывает на канале Ch1 сигнал в виде прямоугольного импульса с частотой передатчика. Каждый раз, когда принимаемый сигнал на V_{IN} выше, чем напряжение на выводе DHC, он будет подтягиваться вниз, чтобы не допустить дальнейшего увеличения сигнала на выходе V_{IN} (канал Ch3). Канал Ch2 осциллографа показывает сигнал на приемной катушке, сигнал по каналу Ch4 показывает ток через катушку передатчика.

Выводы

Более высокая связь, меньшее физическое расстояние между передатчиком и приемником и более высокий коэффициент трансформации будут гарантировать более вы-

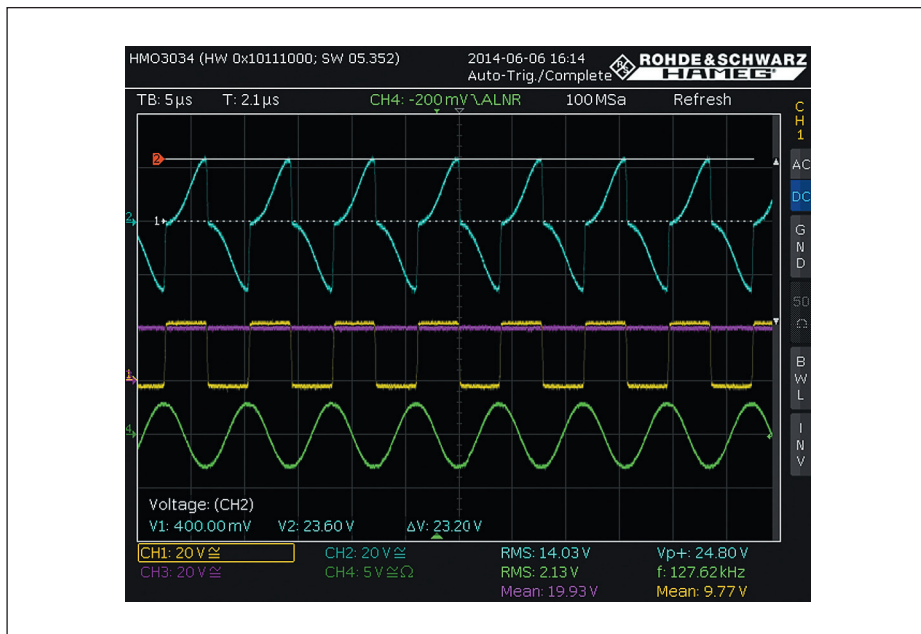


Рис. 9. Демонстрация работы функции DHC

сокое напряжение на приемнике и, соответственно, высокое значение V_{IN} . Функция DHC будет ограничивать уровень напряжения V_{IN} , поступающего на DC/DC-преобразователь, и тем самым обеспечит действие передатчика в более широком диапазоне рабочего напряжения. Как было видно из эксперимента (вариант № 2), эффективность выше, если полученный сигнал имеет форму, максимально приближенную к синусоидальной. Поэтому когда выставляется требование для конкретного приложения в виде широкого диапазона входного напряжения, то может быть выбран более высокий коэффициент трансформации (приблизительно равный 3), а когда требуется повышение эффективности, то рекомендуется использовать оптимизированное значение коэффициента трансформации, то есть добиваться, чтобы принимаемый сигнал был максимально близок к синусоидальному.

Для того чтобы обеспечить высокую эффективность и увеличить диапазон входных напряжений для демонстрационного комплекта DC1969A, катушки передатчика и приемника должны быть тщательно отобраны с учетом всех перечисленных выше соображений. Использование высоконадежных катушек компании Würth Elektronik eiSos для передатчика и приемника беспро-

Таблица 3. Перечень элементов

Условное обозначение	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4
Lx	760 308 101 302 (5,3 мкГн; 33 МОм; Q = 100)	760 308 104 113 (12 мкГн; 60 МОм; Q = 120)	760 308 110 (24 мкГн; 7 МОм; Q = 180)	WT-505060-8K2-LT (5 мкГн; 30,3 МОм; Q = 80)
Lr	760 308 101 303 (47 мкГн; 460 МОм; Q = 25)	760 308 101 303 (47 мкГн; 460 МОм; Q = 25)	760 308 101 303 (47 мкГн; 460 МОм; Q = 25)	760 308 101 303 (47 мкГн; 460 МОм; Q = 25)
CX1	ЕСНУ1Н154GX9 (Полипропилен; 0,15 мкФ; 50 В)	ЕСНУ1Н154GX9 (Полипропилен; 0,15 мкФ; 50 В)	ЕСНУ1Н154GX9 (Полипропилен; 0,082 мкФ; 50 В)	ЕСНУ1Н154GX9 (Полипропилен; 0,15 мкФ; 50 В)
CX2	ЕСНУ1Н154GX9 (Полипропилен; 0,15 мкФ; 50 В)	Не используется	Не используется	ЕСНУ1Н154GX9 (Полипропилен; 0,15 мкФ; 50 В)
RFB1	2 МОм	2 МОм	2 МОм	2 МОм
RFB2	825 кОм	825 кОм	825 кОм	825 кОм

водной системы заряда и даст вам возможность разработать более эффективную систему беспроводной передачи мощности.

Приложение

Перечень элементов

Для того чтобы исследовать вопрос связи контуров приемника и передатчика, а также проблемы, возникающие при беспроводной передаче мощности, когда коэффициент трансформации составляет менее 3, значения некоторых элементов комплекта DC1969A были изменены. В таблице 3 указаны все элементы, соответствующие проверяемым вариантам модификации. ■

Литература

1. Nurayanan R. Wireless Power Charging Coil Changing Considerations. Application Notes. Würth Elektronik, 2015-02-23b.
2. DC1969A-B — Wireless Power Kit including DC1967A-B (Rx) and DC1968A (Tx). www.linear.com/solutions/4543
3. DEMO MANUAL DC1969A-A/DC1969A-B. www.cds.linear.com/docs/en/demo-board-manual/dc1969aabfb.pdf
4. LTC4120/LTC4120-4.2 — Wireless Power Receiver and 400mA Buck Battery Charger. www.cds.linear.com/docs/en/datasheet/4120fe.pdf
5. www.we-online.com
6. www.katalog.we-online.de/en