

# Анализ, проектирование и оптимизация

## комбинированной системы беспроводной передачи энергии на основе NFC

Компания Würth Elektronik eiSos (далее — Würth Elektronik) разработала устройство, в котором сочетается беспроводная передача энергии (WPT) и система беспроводной связи на основе ближнего поля (NFC). В статье представлена общая настройка системы WPT и NFC. Составные части системы анализируются путем моделирования, а результаты подтверждаются натурными измерениями. Рассмотрена конструкция резонансного контура и выбор силовых компонентов для достижения высокого КПД. Представлена методология согласования минимального коэффициента отражения и импеданса катушки NFC с контроллером. Также в статье приведены некоторые типичные применения и преимущества системы по сравнению с традиционной системой NFC.

Кристиан Мерц (Christian Merz)  
Кем Сом (Cem Som)

Перевод: Владимир Рентюк

### Введение

Рынок устройств с технологией NFC (Near field communication, NFC — «коммуникация ближнего поля», «ближняя бесконтактная связь») экспоненциально растет, и ожидается, что к 2024 году он достигнет \$47 млрд [4]. В настоящее время уже имеется более 2 млрд мобильных устройств с технологией NFC и около 2,1 млрд человек во всем мире пользуются услугами мобильных платежей на основе этой удобной бесконтактной технологии связи.

NFC — это технология радиочастотной беспроводной связи с малым радиусом действия с невысокой пропускной способностью, которая обеспечивает стандартизованную связь между двумя устройствами, такими как смартфоны, смарт-карты, наклейки или бирки. В технологии NFC используется та же несущая частота, что и в метках радиочастотной идентификации (radio frequency identification, RFID), а именно 13,56 МГц. Хотя RFID может принимать и передавать данные на расстояние до нескольких метров, технология NFC для безопасности передачи данных ограничивается очень близкой дистанцией до 10 см. Скорость передачи данных NFC составляет 106–848 кбит/с. Кроме того, технология NFC всегда включает «инициатор», такой как устройство для чтения банковских карт, и «цель», например, кредитную карту. При этом инициатор активно генерирует ВЧ-поле, которое питает цель [2].

В устройствах, использующих технологию NFC, имеется три различных режима связи. Первые два — это режим чтения/записи и режим эмуляции карты, в которых предусмотрены схемы пассивной связи, где пассивная цель использует ВЧ-поле, генерируемое инициатором. Режим чтения/записи позволяет читать информацию, хранящуюся на NFC-метках или смарт-картах. Режим эмуляции карты предоставляет возможность мобильному устройству с поддержкой

NFC функционировать как бесконтактная смарт-карта (например, кредитная карта, карта доступа или электронный транспортный билет). В статье описывается пассивный режим чтения/записи и режим эмуляции карты [3].

Третий режим, одноранговый, может применяться как с активной, так и с пассивной схемой связи. При активном взаимодействии инициатор и цель генерируют собственное поле. Одноранговый режим используется для обмена информацией, такой как данные «визитной» карточки, между двумя мобильными NFC-устройствами, например в смартфонах.

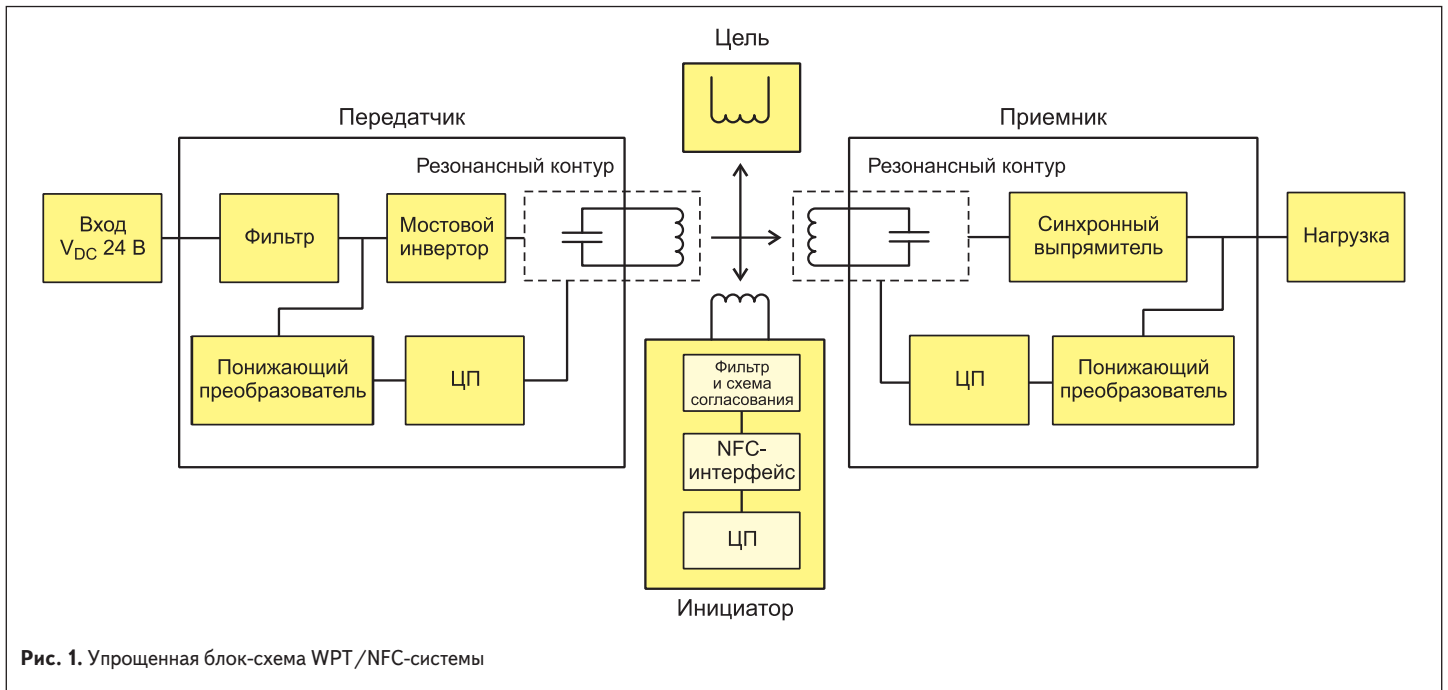
В современных системах с NFC максимальная скорость передачи данных составляет 848 кбит/с. Поскольку мощность радиочастотного поля ограничена 1 Вт, то NFC в основном используется для целей связи. И наоборот, системы беспроводной передачи мощности (wireless power transfer, WPT) могут обеспечивать мощность в диапазоне сотен ватт или более, но при низких скоростях внутриволновой передачи данных — до нескольких сотен байт/с.

Теперь мы, команда инженеров-разработчиков компании Würth Elektronik, объединили преимущества высокой скорости передачи данных NFC-связи и высокой мощности передачи до 100 Вт в одном небольшом и экономичном комбинированном устройстве WPT/NFC, что позволило создать эффективное решение для коммерческих и финансовых транзакций и управления операционными процессами промышленных предприятий.

### Система на основе комбинации WPT/NFC

#### Организация системы WPT/NFC

В ходе проекта была создана следующая концепция построения системы WPT/NFC. Для части WPT для беспроводной передачи



энергии использовался отладочный комплект Power Transfer Development Kit 760308EMP мощностью 200 Вт собственной разработки компании Würth Elektronik, он подробно описан в [5]. Коммуникационная часть системы была выполнена с помощью комплекта разработки NFC OM27462CDK компании NXP, который описан в [6].

На рис. 1 представлена упрощенная блок-схема системы WPT/NFC. В качестве пассивных целей применялись образцы NFC-карт, которые входят в комплект разработчика NFC. Карты, используемые на этом этапе разработки, изначально представляют собой теги NFC типа 2. В режиме чтения/записи они обеспечивают скорость передачи данных 106 кбит/с. Также имелась карта MifareDESFire EV1, которая обеспечивает максимальную скорость передачи данных 848 кбит/с и работает в режиме эмуляции карты [8].

В настоящее время компания Würth Elektronik предлагает четыре различные катушки WPT/NFC, одну в качестве передатчика и три в качестве приемника, как это показано в таблице 1.

В таблице 1  $L_1$  и  $Q_1$  — это индуктивность и добротность части катушек с WPT, измеренная на частоте 125 кГц, а  $L_2$  и  $Q_2$  — индуктив-

ность и добротность части катушек с NFC, измеренная на частоте 13,56 МГц. Катушка D использовалась в комбинированной системе WPT/NFC и показана на рис. 2.

Часть NFC-катушки D используется на стороне инициатора, а часть WPT — на сторонах передатчика и приемника. Характеристики фильтра и согласующей схемы инициатора, резонансные контуры приемника и передатчика были определены путем расчета, моделирования и уточнены по результатам измерения прототипа.

### Согласование импеданса катушки NFC с ИС NFC

Согласование импеданса — это очень важная процедура при проектировании радиочастотных схем, обеспечивающая максимально возможную передачу энергии от источника к его нагрузке и минимизирующая отражения сигнала обратно к источнику.

В комбинированной WPT/NFC-системе согласование импеданса необходимо для согласования дифференциального выходного импеданса NFC ИС, равного 50 Ом, с импедансом NFC-катушки. С этой целью на выходе NFC ИС используется фильтр. Он решает две задачи: фильтрация гармоник сигнала NFC и решение проблемы электромагнитной совместимости (ЭМС), а также используется для преобразования импеданса. В качестве фильтра электромагнитных помех (ЭМП) рекомендуется фильтр нижних частот (ФНЧ) второго порядка, состоящий из катушки индуктивности и конденсатора. Частота среза такого фильтра

должна быть выше, чем частота верхней боковой полосы, определяемая самой высокой скоростью передачи данных в системе, а это, как уже было сказано, 848 кбит/с. Фильтр ЭМП и согласующая схема должны преобразовать импеданс катушки NFC до уровня 50 Ом.

На рис. 3 показана электрическая принципиальная схема фильтра ЭМП и согласующая цепь для режима чтения/записи, включая эквивалентную схему катушки NFC. Контакты Tx1 и Tx2 являются выходными контактами дифференциальной передачи NFC ИС, а TVSS — контактом заземления.

На схеме рис. 3  $L_0$  и  $C_0$  — это индуктивность и емкость фильтра ЭМП;  $C_s$  и  $C_p$  — это согласующие конденсаторы, которые размещены в виде Г-звена, а  $R_q$  — демпфирующий резистор, уменьшающий добротность катушки, что необходимо для подавления переходных процессов. Элементы  $R_a$ ,  $L_a$  и  $C_a$  на схеме — эквивалентные сопротивление катушки, индуктивность и ее собственная емкость.

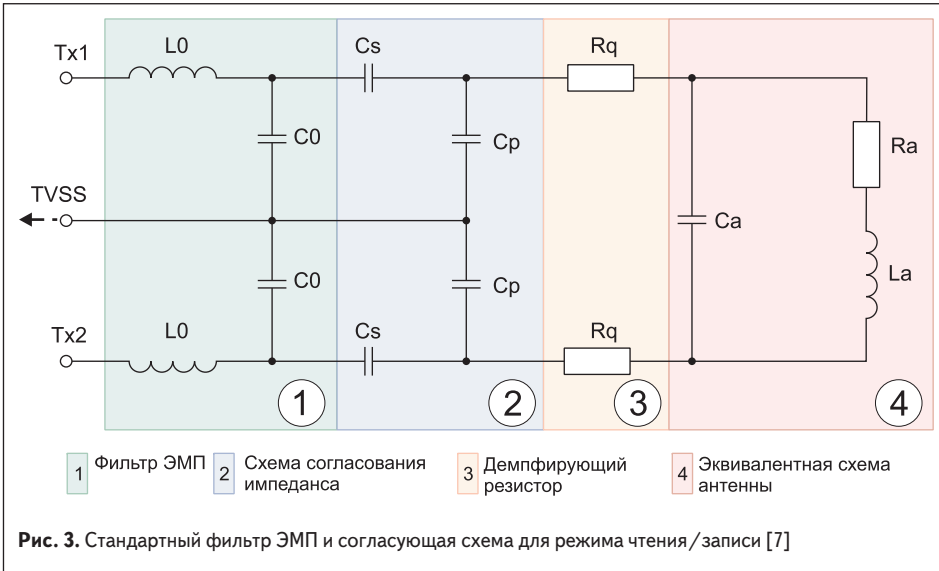
Для решения проблемы согласования импеданса во время проектирования были выполнены следующие шаги:

1. Измерение последовательного сопротивления  $R_s$ , параллельного сопротивления  $R_p$ , индуктивности  $L_s$ , собственной резонансной частоты  $f_s$  катушки NFC и определение значений эквивалентной цепи катушки.
2. Расчет индуктивности и емкости конденсатора фильтра ЭМП.
3. Определение компонентов согласующей схемы путем моделирования для режима чтения/записи.



**Таблица 1.** Комбинированные WPT/NFC-катушки компании Würth Elektronik

| Катушка | Номер заказа | Индуктивность $L_1$ , мкГн | Индуктивность $L_2$ , мкГн | Добротность $Q_1$ | Добротность $Q_2$ | Тип |
|---------|--------------|----------------------------|----------------------------|-------------------|-------------------|-----|
| A       | 760308103305 | 8,8                        | 1,4                        | 30                | 47                | Rx  |
| B       | 760308102306 | 8                          | 1,4                        | 19                | 47                | Rx  |
| C       | 760308103307 | 7,8                        | 1,6                        | 19                | 47                | Rx  |
| D       | 760308101312 | 24                         | 0,7                        | 125               | 30                | Tx  |



- $f_s = 63$  МГц;
  - $L_a (13,56 \text{ МГц}) = 0,7$  мкГн;
  - $R_s (13,56 \text{ МГц}) = 1,7$  Ом;
  - $R_p (13,56 \text{ МГц}) = 1,9$  кОм.
- Значение емкости конденсатора  $C_a$  можно рассчитать по следующей формуле (1) из [1]:

$$C_a = 1 / (2\pi f_s)^2 L_a \quad (1)$$

Подставляя в формулу 1 измеренные и начальные значения, получаем  $C_a = 9,12$  пФ.  
 Значение  $R_p$ , также можно рассчитать с помощью формулы (2) из [1]:

$$R_a = R_s + (2\pi \times f_{op} \times L_a)^2 / R_p \quad (2)$$

Подставляя в формулу 2 измеренные и начальные значения, получаем  $R_a = 3,57$  Ом.  
 Далее частоту среза  $f_c$  фильтра ЭМП можно рассчитать с помощью общеизвестной формулы (3):

$$f_c = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_0 C_0}} \quad (3)$$

Принимая во внимание верхнюю боковую полосу для максимальной передачи данных (13,56 МГц + 848 кГц), частота среза определяется равной 14,8 МГц, что, согласно определенному ранее условию, находится выше частоты верхней боковой полосы 14,4 МГц.

Для рассматриваемого случая была выбрана индуктивность фильтра  $L_0 = 470$  нГн, что из уравнения (3) приводит к емкости конденсатора фильтра  $C_0 = 247$  пФ. В свою очередь емкости конденсаторов  $C_s$  и  $C_p$  и значение сопротивления демпфирующего резистора  $R_q$  были определены путем моделирования с помощью программы Advanced Design System (ADS) от компании Keysight Technologies.

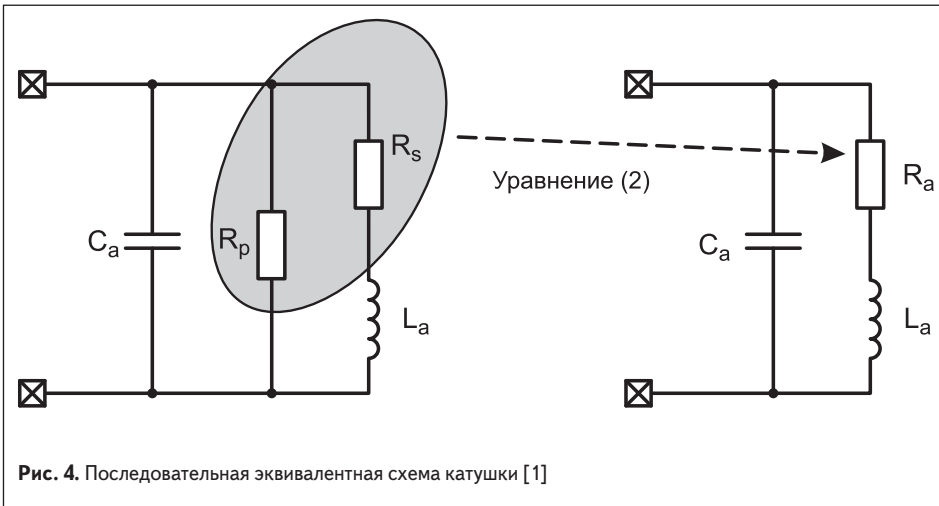
Схема, показанная на рис. 3, была промоделирована. Схема, использованная для моделирования, показана на рис. 5.

Инструмент оптимизации ADS применялся для определения значений  $C_s$ ,  $C_p$  и  $R_q$ . Моделирование приводит нас к следующим значениям этих элементов схемы:

- $C_s = 12$  нФ;
- $C_p = 284$  пФ;
- $R_q = 11$  Ом.

Эти компоненты, идентифицированные путем измерения, расчета и моделирования, были собраны в схему, показанную на рис. 5. Поскольку в моделировании используются идеальные сосредоточенные элементы, а реальные компоненты имеют допуски и потери, значения  $C_s$ ,  $C_p$  и  $R_q$  корректируются для улучшения согласования. В результате для режима эмуляции карты, который необходим для скорости передачи данных 848 кбит/с, схема, представленная на рис. 3, была расширена до схемы, показанной на рис. 6.

Номиналы элементов  $C_{ant}$  и  $R_x$  были выбраны равными 82 пФ и 4,7 кОм, как это рекомендовано в руководстве к комплекту моделирования и проверки решения NFC от компании NXP — UM10883 PN7462AU Quick Start Guide [6].



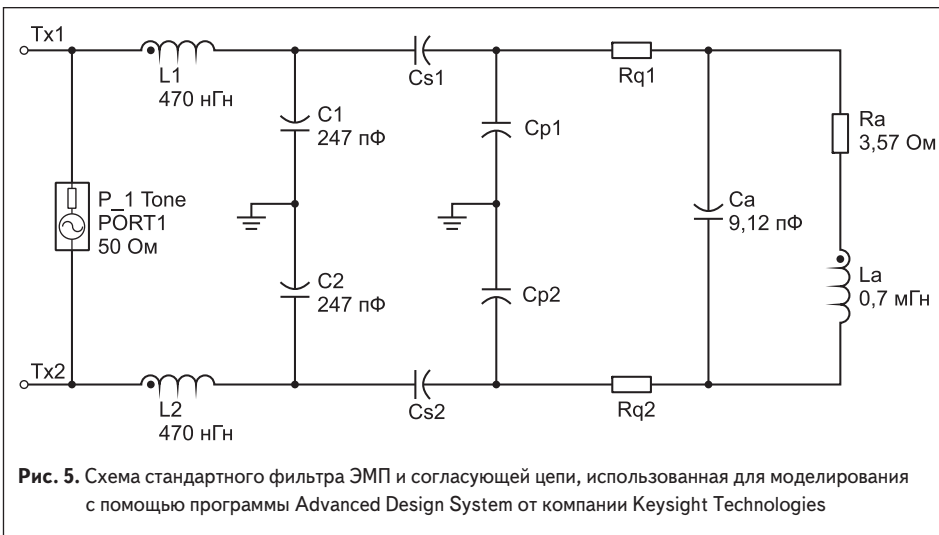
4. Адаптация согласования итоговой схемы для режима эмуляции карты.

На правой части рис. 4 показана последовательная эквивалентная схема катушки.

На рис. 4  $R_p$  — это эквивалентный параллельный резистор катушки;  $R_s$  — внутреннее собственное последовательное сопротивление катушки;  $L_a$  — индуктивность катушки;  $C_a$  — параллельная эквивалентная емкость

на собственной резонансной частоте  $f_s$ ;  $R_a$  — эквивалентный последовательный резистор. Значения  $R_p$ ,  $R_s$  и  $L_a$  должны быть измерены на рабочей частоте  $f_{op} = 13,56$  МГц. Необходимо вычислить  $C_a$  и  $R_a$ .

С помощью измерений с использованием векторного анализатора цепей были получены следующие значения элементов эквивалентной схемы:



**Определение характеристик резонансных контуров на стороне передатчика и приемника**

Для того чтобы оптимизировать эффективность передачи системы беспроводной передачи энергии WPT, конденсаторы резонансных контуров, имеющихся в составе передатчика и приемника, должны быть правильно рассчитаны. Резонансный контур состоит из индуктивности катушки и последовательного конденсатора, то есть мы имеем дело с резонансом токов. Значения резонансных конденсаторов были определены путем измерения и расчета. Чтобы учесть влияние катушки передатчика, измеряется индуктивность катушки приемника  $L'_s$ , когда катушка приемника отделена от катушки передатчика. Измерения проводились на расстоянии 4 мм. Для этого расстояния значение  $L'_s$ , измеренное с помощью LCR, составило 31,2 мкГн на частоте 100 кГц.

Резонансный конденсатор  $C_R$ , который должен быть интегрирован на стороне приемника, может быть рассчитан по формуле (4) следующим образом:

$$C_R = 1/(2\pi f_0)^2 L'_s, \quad (4)$$

где  $f_0$  — рабочая частота передачи энергии, равная 100 кГц.

С учетом измеренного значения  $L'_s$  емкость  $C_R$  составила 81 нФ.

Индуктивность катушки  $L_p$  передатчика измеряется на том же расстоянии между приемником и передатчиком, как указано выше. Измеренное на частоте 100 кГц значение индуктивности  $L_p$  для этого расстояния составляет 29,8 мкГн.

Значение емкости конденсатора  $C_T$ , который является резонансным конденсатором на стороне передатчика, рассчитывается аналогично по формуле (5):

$$C_T = 1/(2\pi f_0)^2 L_p, \quad (5)$$

С учетом измеренного значения  $L_p$  емкость  $C_T$  составила 85 нФ.

**Полученные результаты**

**Согласование импедансов**

Как уже было сказано, для проверки решения использована расширенная согласующая схема (рис. 6), а также смоделированные и измеренные значения элементов. Для улучшения согласования применялось более высокое значение  $R_p$ , равное 20 Ом.

Коэффициент отражения на входном порте (между выводами Tx1 и Tx2) был измерен с помощью векторного анализатора цепей VNA. На рис. 7 показан измеренный коэффициент отражения в диапазоне частот 12–15 МГц, представленный в дБ.

Видно, что коэффициент отражения на рабочей частоте 13,56 МГц имеет значение около -27 дБ. Это означает, что всего лишь около 0,2% падающей мощности отражается обратно на вход.

**Связь и передача энергии**

Со стандартным фильтром и согласующим звеном, показанным на рис. 3, и с использова-

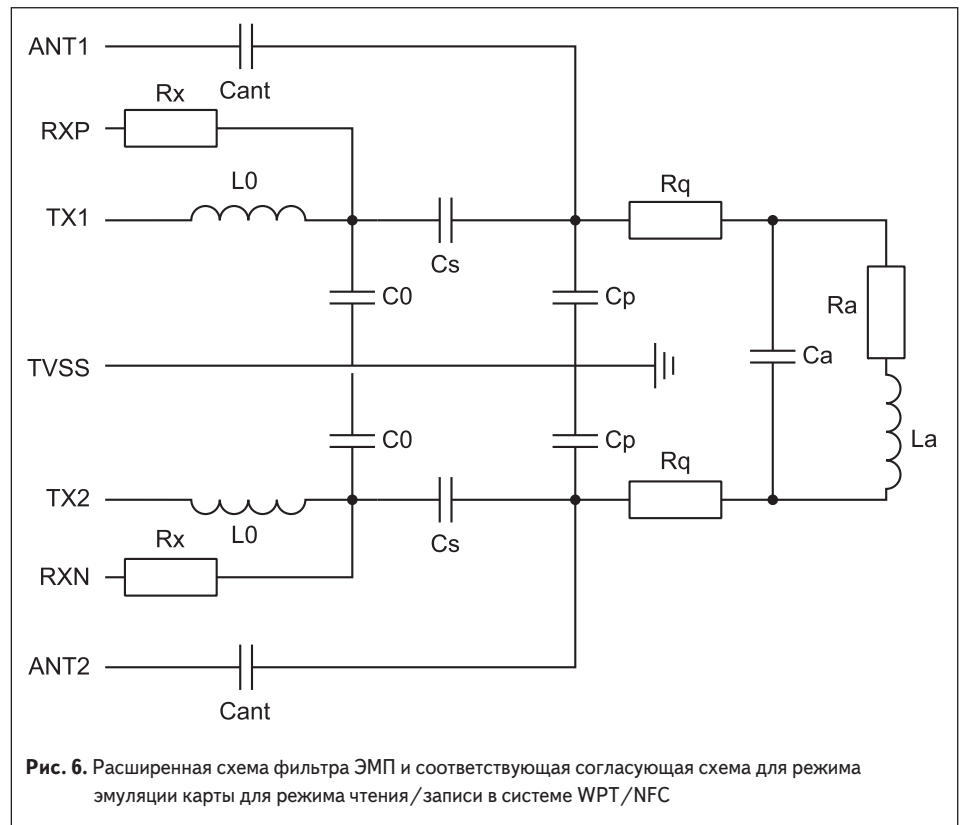


Рис. 6. Расширенная схема фильтра ЭМП и соответствующая согласующая схема для режима эмуляции карты для режима чтения/записи в системе WPT/NFC

нием смоделированных значений согласования и катушки D может быть достигнута связь с NFC-меткой типа 2 со скоростью передачи данных 106 кбит/с на расстоянии до 3 см.

Используя расширенный фильтр и схему согласования, представленные на рис. 6, с измененным значением демпфирующего

резистора на 20 Ом, можно увеличить скорость передачи данных до 848 кбит/с, хотя разделение обмена данными между инициатором и целью (в ее роли выступала смарт-карта Mifare DESFire EV1) уменьшилось до 4 мм.

Для передачи энергии на стороне передатчика и приемника использовалась часть WPT

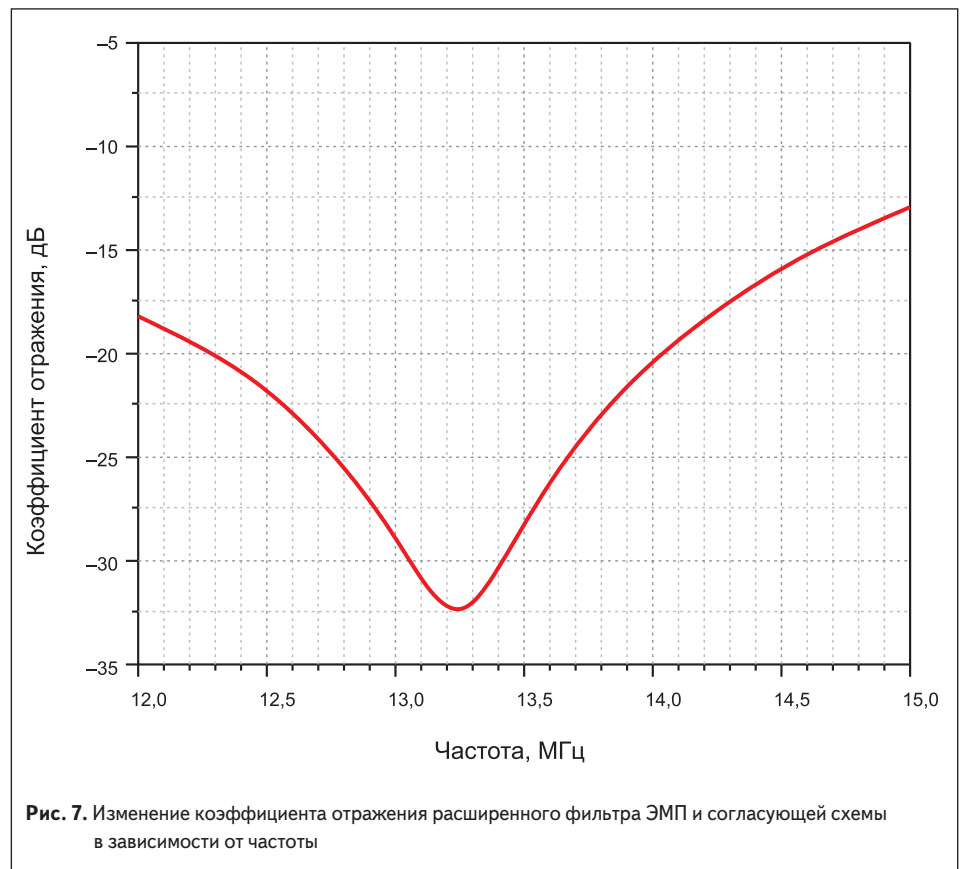


Рис. 7. Изменение коэффициента отражения расширенного фильтра ЭМП и согласующей схемы в зависимости от частоты

катушки D. При использовании резонансного емкостного конденсатора  $CR = 81$  нФ на стороне приемника и  $CT = 85$  нФ на стороне передатчика, при расстоянии между катушками 4 мм была достигнута эффективность DC/DC-преобразования около 85%. При этом беспроводная передача мощности до 60 Вт была достигнута при стандартных температурных условиях.

Максимальный КПД системы  $\eta_{\max}$  WPT можно рассчитать с помощью формулы (6) из [9]:

$$\eta_{\max} = \frac{k^2 Q^2}{(1 + \sqrt{1 + k^2 Q^2})^2} \approx 1 - \frac{2}{kQ}. \quad (6)$$

Добротность  $Q$  — это совокупный коэффициент добротности системы двух отдельных катушек, который можно рассчитать с помощью формулы (7) из [9]:

$$Q = \sqrt{Q_1 \times Q_2}. \quad (7)$$

Для расчета коэффициента связи  $k$  катушек использовалось следующее уравнение:

$$k = \sqrt{1 - \frac{L_p}{L_{\text{leakp}}}}. \quad (8)$$

$L_p$  в формуле (8) — измеренная индуктивность катушки передатчика при заданном расстоянии между катушками 4 мм;  $L_{\text{leakp}}$  — паразитная индуктивность катушки передатчика, которая измеряется путем закорачивания катушки приемника на этом расстоянии и измерения индуктивности катушки передатчика. Используя формулы (6)–(8), можно вычислить максимальную эффективность комбинированных катушек передатчика и приемника, которая приводит к значениям, сведенным в таблицу 2.

Таблица 2 показывает, что максимальная эффективность системы беспроводной передачи энергии WPT составляет 94%, что достигается с катушкой A на стороне приемника и катушкой D на стороне передатчика. Причины потерь WPT-катушек — это омические потери, взаимное влияние из-за близости и скин-эффекты. Кроме того, для оценки общей эффективности системы во внимание должны быть приняты потери в инверторе на стороне передатчика и потери синхронного выпрямителя на стороне приемника.

**Таблица 2.** Комбинации WPT/NFC-катушек компании Würth Elektronik и максимальные значения эффективности (КПД)

| Тх катушка (табл. 1) | Rx катушка (табл. 1) | Коэффициент связи k | Добротность Q | $\eta_{\max}$ % |
|----------------------|----------------------|---------------------|---------------|-----------------|
| D                    | A                    | 0,56                | 61            | 94              |
| D                    | B                    | 0,52                | 48            | 92              |
| D                    | C                    | 0,33                | 48            | 87              |

## Выводы

В статье описана основа WPT/NFC-системы на катушках компании Würth Elektronik. В частности, рассмотрены параметры согласования и схема фильтров для части NFC. При этом показано, что может быть реализована скорость передачи данных 106 кбит/с на расстоянии между инициатором и целью до 3 см и 848 кбит/с на расстоянии до 4 мм. Для части WPT был выполнен расчет резонансных контуров и протестирована сама система беспроводной передачи данных. При этом был достигнут КПД 85% при расстоянии между передатчиком и приемником 4 мм с использованием части WPT катушки D в качестве передатчика и приемника. Для комбинации катушки D в качестве передатчика и катушки A в качестве приемника может быть достигнута максимальная эффективность системы 94%.

Следующим шагом в процессе разработки станет изготовление системы приемника, способной демодулировать поток битов NFC и визуализировать переданное сообщение. NFC-часть катушек A и C будет использоваться в качестве меток. Другая цель — продемонстрировать, что связь и передача энергии могут работать одновременно.

Примером применения такой WPT/NFC-системы может служить система беспроводной зарядки для мобильных устройств, обеспечивающая платёжные услуги. Преимущество подобной WPT/NFC-системы заключается в том, что высокая скорость передачи данных системы NFC может быть достигнута при одновременной беспроводной передаче высокой мощности в одном небольшом и эффективном устройстве.

Дополнительная информация по тематике статьи доступна в [10, 11]. ■

## Литература

1. AN11564 PN7120 Antenna Design and Matching Guide, Rev. 1.1. 18 April 2016, 299411. Application note. [www.nxp.com/docs/en/application-note/AN11564.pdf](http://www.nxp.com/docs/en/application-note/AN11564.pdf)

2. Coskun V., Ok K., Ozdenizci B. Near Field Communication from theory to practice. Wiley, 2012.
3. Desai E., Shajan M. G. A Review on the Operating Modes of Near Field Communication, International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT). 2012.
4. The exponential growth of mobile internet application and advancement of 3G and 4G networks is anticipated to drive the market. [www.grandviewresearch.com/industry-analysis/near-field-communication-nfc-market](http://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/near-field-communication-nfc-market)
5. Würth Elektronik eiSos, ANP70c, Proprietary wireless power transfer solution for high performance including data transmission. Application Note, 2018. [www.we-online.com/web/en/electronic\\_components/produkte\\_pb/application\\_notes/ANP070\\_Proprietarywirelesspowertransfersolution.php](http://www.we-online.com/web/en/electronic_components/produkte_pb/application_notes/ANP070_Proprietarywirelesspowertransfersolution.php)
6. UM10883 PN7462 family Quick Start Guide – Development Kit. User manual. Rev. 1.6. 14 May 2018, 319816. [www.nxp.com/docs/en/user-guide/UM10883.pdf](http://www.nxp.com/docs/en/user-guide/UM10883.pdf)
7. Baier T. Automated Impedance Adjustment of 13.56 MHz NFC Reader Antennas. Master Thesis, 2014.
8. NFC Tags & Tag Types. [www.electronics-notes.com/articles/connectivity/nfc-near-field-communication/tags-types.php](http://www.electronics-notes.com/articles/connectivity/nfc-near-field-communication/tags-types.php)
9. Bosshard R., Muhlethaler J., Kolar J. W., Stevanovic I. Optimized magnetic design for inductive power transfer coils. Twenty-Eighth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). Long Beach, CA, USA, 2013.
10. Унтеррайтмайер А. Решение компании Würth Elektronik для высокоэффективной беспроводной передачи энергии и данных по одному каналу // Компоненты и технологии. 2019. № 3.
11. Надлер А., Сом К. Беспроводная передача энергии большой мощности для устройств, работающих в условиях индустриальной среды // Компоненты и технологии. 2017. № 7, 8.