

Решение проблемы магнитного экранирования на примере материалов компании Würth Elektronik

Владимир РЕНТЮК
rvk.modul@gmail.com

В статье даются основные понятия в части магнитного экранирования и перераспределения магнитного потока, описание материалов, предлагаемых компанией Würth Elektronik для этих целей, рассмотрены практические примеры их применения.

При разработке самых разнообразных устройств магнитное экранирование является важным аспектом, так как обеспечивает соответствие требованиям по электромагнитной совместимости (ЭМС), выдвигаемым к любым электронным приборам. Чтобы понять, насколько это требование важно для современной, в том числе российской электроники, следует оценить хотя бы общее число действующих стандартов типа ГОСТ Р, посвященных данной тематике (www.emci.ru/testig.html). Кроме того, достаточно часто возникает задача повлиять на распределение магнитных полей либо на величину индуктивности, например, передающей антенны, как независимой, так и непосредственно выполненной на печатной плате в виде проводника, катушки.

Помимо глобальных проблем экранирования, часто возникают и локальные вопросы. И если экранирование в части электрической составляющей электромагнитного поля не вызывает особых сложностей, то экранирование магнитной составляющей электромагнитных полей является не столь простой задачей, как это может показаться. Впервые автор статьи столкнулся с такой проблемой, когда в сложном и компактном устройстве обнаружилось, что тороидальный мощный силовой трансформатор, который по своей сути не должен был стать источником помехи (поэтому и был применен он, а не более технологичный U-образный), — им стал. Надо заметить, что регламенты по электромагнитной совместимости самого изделия выполнялись, но изделие не отвечало требованиям технического задания и технических условий именно по причине магнитной помехи, которая оказывала влияние на работу одного из внутренних блоков. Выяснить, откуда взялась помеха и что она собой представляет, уда-

лось только после разработки специальных датчиков для проведения измерений: один из них воспринимал обе составляющие поля, второй, выполненный в цельном латунном корпусе, — только магнитную составляющую помехи. Именно здесь нас и ожидал сюрприз. Помеха имела ярко выраженную магнитную составляющую.

Причиной, как выяснилось, была неравномерная намотка вторичных обмоток (их было несколько) трансформатора, их неравномерная нагрузка по току и форма самого тока в обмотках (нагрузка трансформатора была нелинейной). Поэтому попытка окружить трансформатор металлическим экраном должного эффекта не дала. Все предпринятые действия были напрасны, пока не вспомнили, что, кроме электрической составляющей электромагнитного поля, имеется еще и магнитная, которую можно убрать посредством перераспределения магнитных полей трансформатора. Но, что нас немало удивило, экран из пермаллоя (который нам даже удалось покрыть медью) оказался бессилён. Устранить излучение помехи помог экран лишь из отожженного в вакууме пермаллоя, то есть когда он стал эффективным поглотителем именно магнитной составляющей помехи.

Этот пример наглядно показывает, что к решению вопросов электромагнитной совместимости необходимо подходить комплексно. Редакция журнала в своих публикациях неоднократно поднимала вопросы электромагнитной совместимости. Наглядные примеры того, что получается из-за неправильного подхода к решению описанной проблемы, приведены, в частности, в публикациях [1, 2]. На рис. 1 изображен график, показывающий распределение затрат в зависимости от этапа работ, на которых решаются вопросы электромагнитной совместимости [3].

В большинстве случаев в технической литературе описываются решения, касающиеся подавления именно электрической составляющей. Обычные электропроводящие экраны защищают изделие от внешних помех посредством создания обратного поля, отражения электрической помехи или отвода наведенной на экран энергии на общий провод или, как мы говорим по старинке, — на «землю». Обычно это влияет на передачу сигнала. Одной из причин подобного влияния являются возникающие при таком экранировании паразитные емкости и связи. В предпочтительном варианте магнитное поле должно концентрироваться и управляться только там, где это необходимо. Данный подход обеспечивает защиту окружающих устройств и повышает эффективность экранирования. Для этого рекомендуется использовать материалы с высоким значением относительной магнитной проницаемости и низким значением потерь на частоте передачи сигнала.

Как решить эту проблему? Очевидно, что на современном уровне применение такого крайне нетехнологичного подхода, как описанный выше вариант экранирования с помощью отожженного пер-

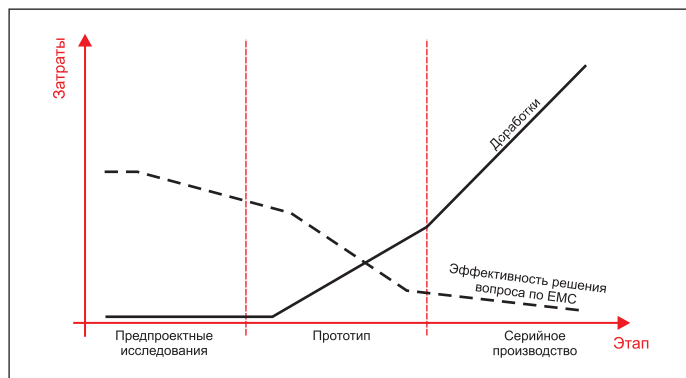


Рис. 1. Распределение затрат на выполнение требований по электромагнитной совместимости в зависимости от этапа работ

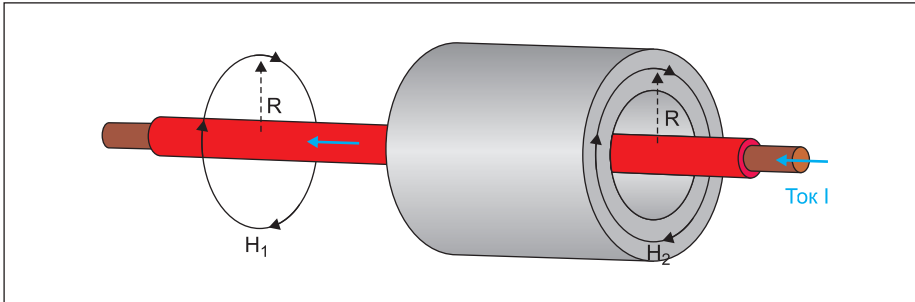


Рис. 2. Магнитное поле проводника

маллоя, неприемлем. Применение пластин из ферритовых материалов также нетехнологично из-за их хрупкости и сложности придания им нужной геометрии. Решить проблемы можно на основе современных материалов. Такие материалы предлагает компания Würth Elektronik (полное название Würth Elektronik eiSos GmbH & Co. KG EMC & Inductive Solutions) концерна Würth Group. Международный концерн Würth был основан в 1945 году. Компании концерна работают в 84 странах, главный офис расположен в Германии. Именно компания Würth Elektronik является одной из самых успешных производственных подразделений концерна Würth Group. Компания Würth Elektronik является поставщиком фильтров, широкого спектра индуктивностей, трансформаторов, разъемов WE LAN RJ45 с интегрированными трансформаторами и индикаторами состояния, помехоподавляющих фильтров, EMC-компонентов, EMC-ферритов для кабельной продукции, D-SUB-соединителей с ЕМР-фильтрами, SMD-антенн, варисторов, а также представляющих интерес для настоящей статьи специальных материалов для магнитного экранирования.

Упомянутые экранирующие материалы представлены компанией Würth Elektronik двумя типами продуктов — это гибкие поглощающие электромагнитные помехи листы WE-FAS и гибкие листы WE-FSFS из спеченного ферритового материала. Листы WE-FAS

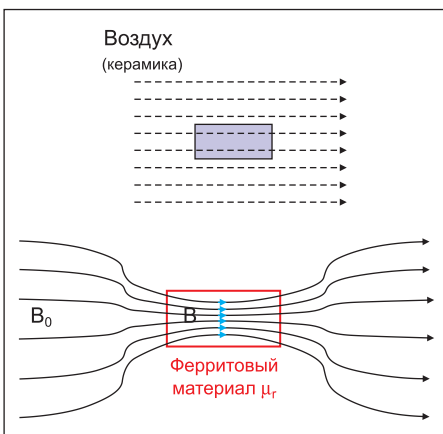


Рис. 3. Влияние ферромагнитного материала на магнитное поле

выпускаются в двух модификациях: для поглощения электромагнитных помех WE-FAS ЕМI и для использования в технологии радиочастотных меток WE-FAS RFID.

Для того чтобы лучше понять проблему, вспомним немного теории [3]. Как известно, электромагнитное поле создается током через проводник (рис. 2). То есть прохождение тока через проводник обуславливает возникновение магнитного поля.

При этом напряженность магнитного поля H зависит от геометрии проводника, количества витков (если это катушка) и силы тока, но не зависит от материала. Так, для одиночного проводника (рис. 2) напряженность магнитного поля составит:

$$H_1 = H_2 = H = I/(2\pi \times R),$$

где I — сила тока, R — радиус.

Более фундаментальной характеристикой магнитного поля является вектор магнитной индукции B . Именно он определяет силу действия магнитного поля на движущиеся заряженные частицы и токи. И вот он-то как раз и зависит от магнитных свойств материала. Если на пути магнитного поля попадается материал, обладающий магнитными свойствами (рис. 3), происходит перенаправление линий магнитного поля. На этом принципе и основано магнитное экранирование.

Магнитная индукция проводника в воздухе (а более точно, в вакууме) связана с напряженностью магнитного поля выражением:

$$B = \mu_0 \times H,$$

где μ_0 — это магнитная постоянная, равная приблизительно $1,26 \times 10^{-6}$ Н/А (или Гн/м).

Влияние ферритового материала учитывается специальным коэффициентом — относительной магнитной проницаемостью μ_r , которая, собственно, и учитывает проявление магнитных свойств материалов по отношению к вакууму. При этом формула, приведенная выше, принимает вид:

$$B = \mu_0 \times \mu_r \times H,$$

$$\text{а } \mu_r = 1/\mu_0 \times \Delta B/\Delta H \text{ или } \mu_r = B/B_0.$$

Здесь необходимо учитывать, что относительная магнитная проницаемость μ_r зависит не только от свойств материала, но и от температуры, а также от плотности тока. Эти зависимости влияют на выбор материала для конкретного применения. Еще одним решающим фактором является то, что ферромагнитные материалы обладают неидеальными характеристиками, таким образом, относительная магнитная проницаемость μ_r имеет комплексный характер, то есть она зависит еще и от частоты. В общем виде, который важен для рассматриваемого случая:

$$\mu_r = \mu' - j\mu'',$$

где μ' — это действительная часть, μ'' — реактивная часть, описывающая зависящие от частоты потери, или, как их называют, потери на гистерезис. Эти потери приводят к разогреву материала и ухудшению его магнитных свойств. Для рассматриваемых материалов графики поведения действительной и реактивной составляющих относительной магнитной проницаемости представлены на рис. 4 [4].

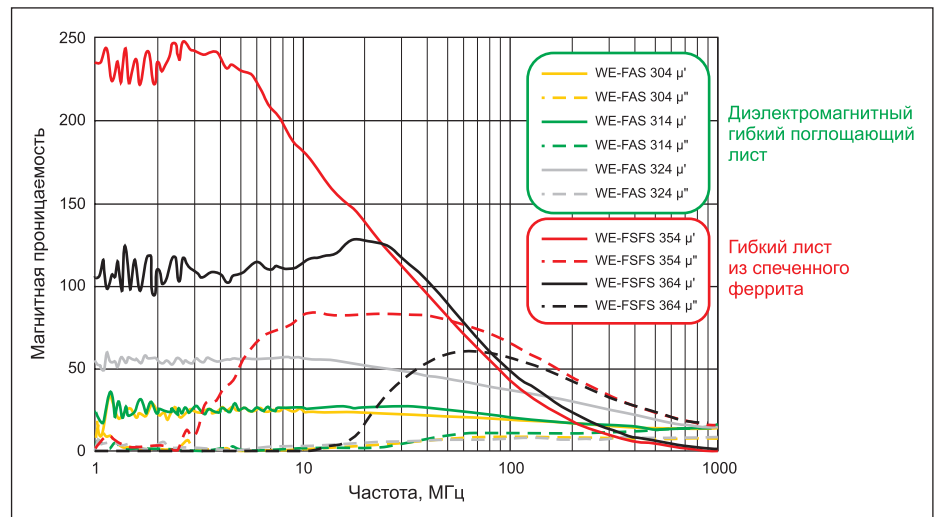


Рис. 4. Графики, показывающие комплексность магнитной проницаемости материалов компании Würth Elektronik

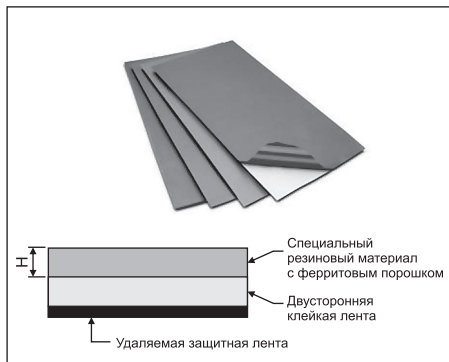


Рис. 5. Листы материала WE-FAS EMI и WE-FAS RFID

Материал WE-FAS EMI выпускается в виде двухслойных листов с липким слоем (рис. 5).

Листы представляют собой специальный композитный полимерный материал с наполнителем в виде ферритового порошка. Для удобства монтажа листы оснащены двухсторонней липкой лентой, которая имеет удаляемый защищенный слой (рис. 5). Материал WE-FAS EMI предназначен для экранирования аппаратуры в диапазоне частот 500 МГц – 5 ГГц (304xx) и 500 МГц – 3 ГГц (324xx), диапазон рабочих температур –20...+90 °С, пожаростойкость соответствует UL94-V047. Основные характеристики материала приведены в таблице 1. Области применения материала WE-FAS EMI:

- экранирование корпусов оборудования;
- межплатное экранирование;
- экранирование путем наклейки на корпуса интегральных микросхем, процессоров и контроллеров;
- экранирование кабелей, которые нуждаются в высокой гибкости;
- экранирование жидкокристаллических дисплеев и светодиодных мониторов.

Применение материала WE-FAS EMI весьма эффективно для целей экранирования в таких цифровых устройствах, как ноутбуки, CD/DVD-плееры, цифровые камеры, смартфоны и мобильные телефоны, GPS-приемники и многое другое.

Таблица 1. Характеристики материала серии WE-FAS EMI

| Номер для заказа | Длина, мм | Ширина, мм | Толщина, мм | Поверхностное сопротивление R_s , Ом/См ² | Относительная магнитная проницаемость, μ' на 1 МГц |
|------------------|-----------|------------|-------------|--|--|
| 30403S | 330 | 210 | 0,3 | >10M | 23 |
| 30405S | 330 | 210 | 0,5 | >10M | 23 |
| 30410S | 330 | 210 | 1 | >10M | 23 |
| 32401S | 297 | 210 | 0,1 | >10M | 39 |
| 32402S | 297 | 210 | 0,2 | >10M | 39 |
| 32403S | 297 | 210 | 0,3 | >10M | 39 |
| 32405S | 297 | 210 | 0,5 | >10M | 39 |
| 324075S | 297 | 210 | 0,75 | >10M | 39 |
| 32410S | 297 | 210 | 1 | >10M | 39 |
| 34401 | 297 | 210 | 0,1 | >10M | 100 |
| 34402 | 297 | 210 | 0,2 | >10M | 100 |
| 34403 | 297 | 210 | 0,3 | >10M | 100 |

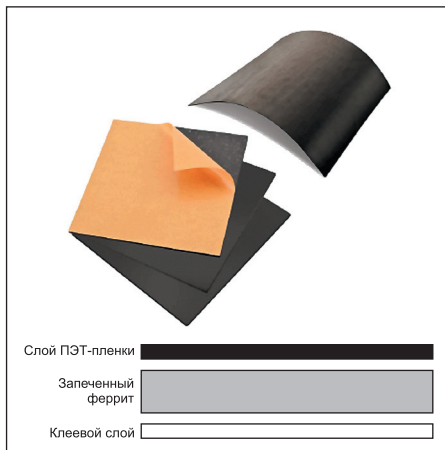


Рис. 6. Листы материала WE-FSFS

Материал WE-FAS RFID внешне похож на WE-FAS EMI (рис. 5). Он также гибкий и двухслойный на липкой основе, характеризуется высокой пожаростойкостью, диапазоном рабочих температур –25...+90 °С с прочностью на разрыв 6 МПа. Материал выпускается в листах размером 297×210 мм, толщиной 0,1, 0,2 и 0,3 мм, которую определяют две последние цифры в номере заказа. Сопротивление WE-FAS RFID по постоянному току не менее 1×10^8 Ом (**Внимание!** На сайте изготовителя в размерности этого параметра допущена ошибка), максимальная относительная магнитная проницаемость μ' на частоте 13,56 МГц — 25 (314xx) и 55 (334xx), реактивная часть магнитной проницаемости μ'' на частоте 13,56 МГц не менее 1. Область применения материала — метки радиочастотной идентификации RFID.

Материал WE-FSFS (рис. 6), как уже отмечалось выше, выполнен по несколько иной технологии. Он состоит из трех слоев:

- защитный слой из полиэтилентерефталатной пленки (ПЭТ). Обеспечивает высокое поверхностное сопротивление и прочность сцепления, необходим для защиты ферритового слоя;
- предварительно нарезанный запеченный ферритовый слой. Это основа продукта. Его магнитные свойства обеспечивают концентрацию и управление внешними магнитными полями;
- клеевой слой. Высокая адгезивная прочность клеевого материала позволяет защитить феррит и легко использовать этот продукт.

В отличие от WE-FAS материал WE-FSFS не имеет полимерного заполнения, что обеспечивает ему большую относительную магнитную проницаемость. А гибкость придает ему ПЭТ-пленка и специальная нарезка спеченного ферромагнитного материала.

Основные технические характеристики WE-FSFS приведены в таблице 2. Спеченные ферритовые листы WE-FSFS компании Würth Elektronik предназначены для высокоэффективного перенаправления магнитного потока. Правильное управление маг-

Таблица 2. Основные технические характеристики материалов серии WE-FSFS

| Группа (стандарт) | Номер для заказа | Длина, мм | Ширина, мм | Толщина, мм | Поверхностное сопротивление R_s , Ом | μ' (1 МГц) | μ'' (13,56 МГц) | μ' (1 МГц) | μ'' (13,56 МГц) |
|---------------------------|------------------|-----------|------------|-------------|--|----------------|---------------------|----------------|---------------------|
| WE-FSFS 354 (WPC-GI, PMA) | 354001 | 120 | 120 | 0,1 | >1 | 230 | 150 | <2 | 90 |
| | 354002 | 120 | 120 | 0,2 | >1 | 230 | 150 | <2 | 90 |
| | 354003 | 120 | 120 | 0,3 | >1 | 230 | 150 | <2 | 90 |
| | 354004 | 60 | 60 | 0,1 | >1 | 230 | 150 | <2 | 90 |
| | 354005 | 60 | 60 | 0,2 | >1 | 230 | 150 | <2 | 90 |
| | 354006 | 60 | 60 | 0,3 | >1 | 230 | 150 | <2 | 90 |
| WE-FSFS 364 (AMFP, WCT) | 364001 | 120 | 120 | 0,1 | >1 | 110 | 120 | <2 | 2 |
| | 364002 | 120 | 120 | 0,2 | >1 | 110 | 120 | <2 | 2 |
| | 364003 | 120 | 120 | 0,3 | >1 | 110 | 120 | <2 | 2 |
| | 364004 | 60 | 60 | 0,1 | >1 | 110 | 120 | <2 | 2 |
| | 364005 | 60 | 60 | 0,2 | >1 | 110 | 120 | <2 | 2 |
| | 364006 | 60 | 60 | 0,3 | >1 | 110 | 120 | <2 | 2 |

нитным потоком улучшает передачу энергии и данных в индуктивно связанных системах технологии: NFC, RFID, беспроводного питания и т.д. Таким образом, достигается большая эффективность коммуникационной системы и увеличивается диапазон ее действия.

Эффективность экранирования при использовании материала WE-FSFS представлена на графике на рис. 7. Здесь приведен пример поглощения помех от микрополосковой линии путем накрытия ее листами материала WE-FSFS 354 размером 60×60 мм разной толщины [5]. Эффективность экранирования обеспечивает присущий этому материалу широкий частотный диапазон по μ'' .

Эффективное использование перенаправления силовых линий наглядно показано на примере RFID-устройств и устройств стандарта NFC (англ. NFC — Near field communication, «коммуникация ближнего поля», «ближняя бесконтактная связь»). Технология NFC — это система беспроводной высокочастотной связи малого радиуса действия, которая предоставляет возможность обмена данными между устройствами, находящимися на расстоянии около 10 см, она была анонсирована в 2004 году. Система является расширением стандарта бесконтактных карт (ISO 14443), она объединяет интерфейс смарт-карты и считывателя в единое устройство. Устройство NFC может поддерживать связь как с существующими смарт-картами, так и со считывателями стандарта ISO 14443, а также с другими устройствами NFC — таким образом, оно совместимо с существующей инфраструктурой бесконтактных карт, уже использующейся в общественном транспорте и платежных системах. Технология NFC нацелена, прежде всего, на применение в цифровых мобильных устройствах.

Когда металлическая пластина помещается рядом с RFID- или NFC-антенной, они не могут эффективно работать. В роли такой металлической пластины могут выступать любые проводящие поверхности, например батарея, слой общего проводника в печатной плате, металлический корпус, аккумуляторная батарея.

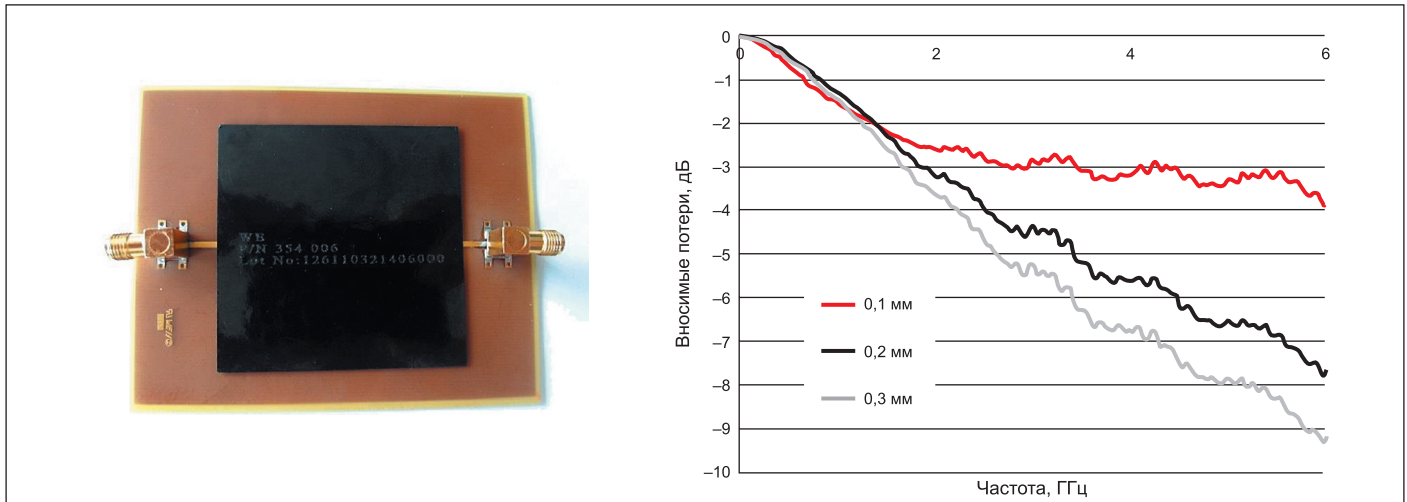


Рис. 7. Вносимые потери (S21) материалом WE-FSFS 354

Поток энергии, создаваемый антенной (она выполняется в виде катушки и представляет собой индуктивность), проходит через металл, вызывая из-за его высокой проводимости генерацию вихревых токов. Таким образом, индуктивность антенны и, главное, ее добротность будут уменьшаться. Из-за снижения индуктивности резонансная частота антенны сдвигается в область более высоких частот. Если она сдвинется в сторону от частоты 13,56 МГц, то связь между приемником и передатчиком будет невозможна. При использовании ферритового листа, расположенного между антенной и металлической пластиной, мы можем устранить этот эффект, увеличить индуктивность и вернуться в область более низких частот. Чем больше толщина используемого материала, тем больше сдвиг. Чтобы достичь оптимальной настройки, выбор толщины ферритового листа и его магнитная проницаемость должны подбираться для каждого конкретного приложения. На примерах [4], представленных на рис. 8–10, между антенной NFC и алюминиевой пластиной толщиной 2 мм были помещены ферритовые листы WE-FSFS 364 различной толщины. При этом был измерен сдвиг частоты.

Еще более перспективным направлением использования описываемого материала является одно из самых современных направлений — системы передачи энергии для

питания различных устройств, например систем беспроводной зарядки смартфонов [6]. Проблема в том, что здесь требуется передача энергии достаточно большой мощности.

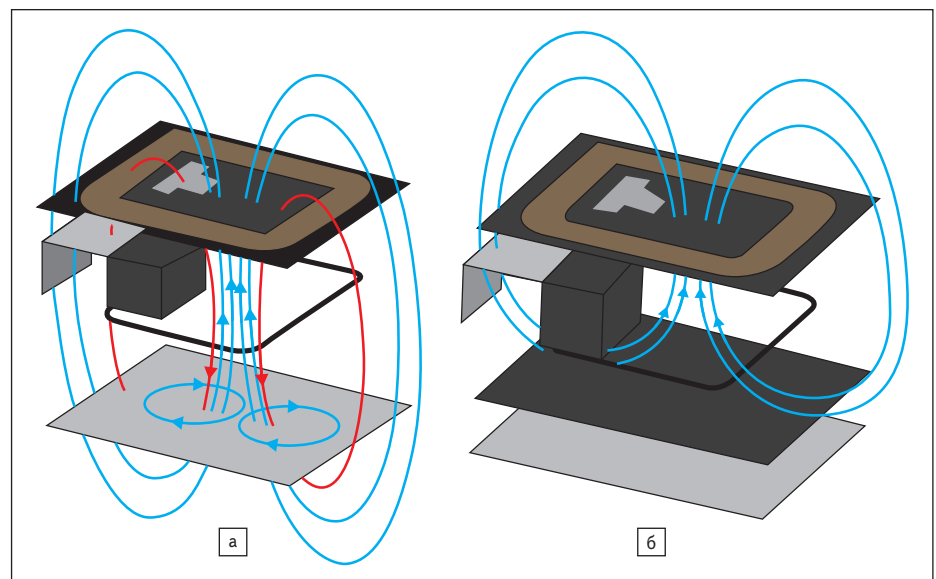


Рис. 8. Магнитное экранирование на примере NFC: а) без экранирования; б) с экранированием

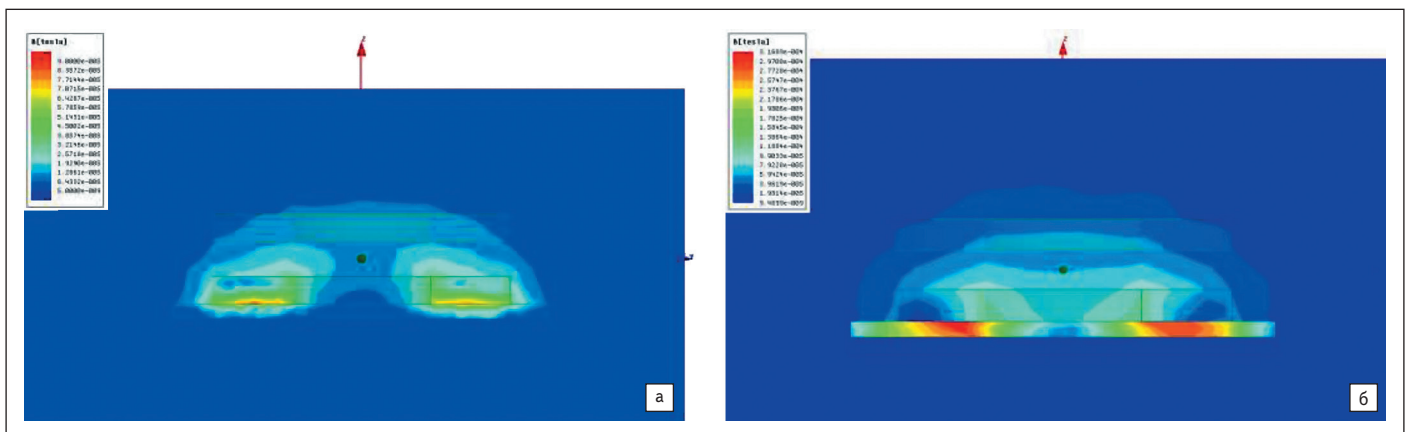


Рис. 9. Модель перераспределения полей в условиях магнитного экранирования на примере NFC: а) без экранирования; б) с экранированием

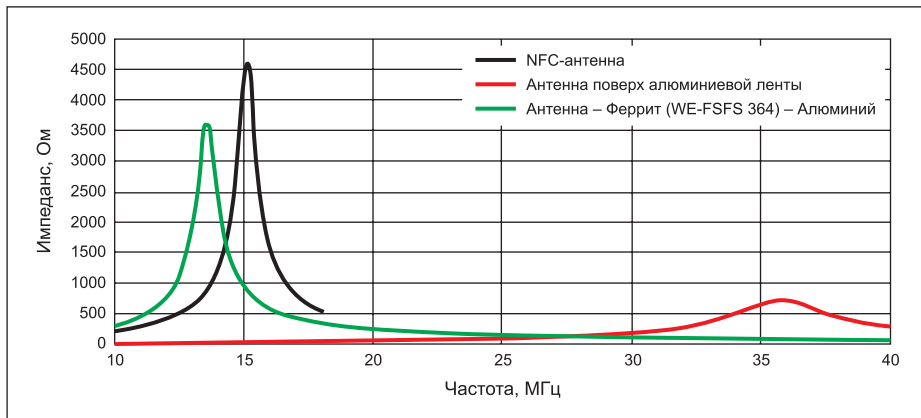


Рис. 10. Эффект от ферритового экрана на примере NFC (резонансная частота сдвигается в нужную область, а добротность и Q увеличиваются)

рядного устройства. Но данный процесс будет иметь и негативные последствия, поскольку эти магнитные поля приведут к саморазогреву любого токопроводящего компонента — например, самой аккумуляторной батареи. Индуктивная связь также будет причиной помех, создавая паразитные петли прохождения тока в проводящих компонентах, в частности, в интегральных микросхемах, проводниках печатной платы и т.п. Таким образом, появятся проблемы в части излучения электромагнитных и радиопомех. Использование магнитных экранов, располагаемых за передающей и приемной катушками, позволяет решить эту проблему и предохраняет внутренние структуры мобильного и зарядного устройств, поскольку концентрирует магнитный поток в рамках системы индуктивной связи передающей и приемной катушек. Другими словами, чтобы обеспечить защиту схемы, необходимо разместить ферритовые листы за катушками передатчика и приемника.

На рис. 12 представлены результаты проведенного моделирования. Здесь показана концентрация потока в катушке передатчика

Что касается систем передачи энергии с использованием индуктивной связи, то в настоящее время существует несколько стандартов. И именно для них адаптированы материалы семейства WE-FSFS (табл. 3).

Материал ферритового листа WE-FSFS может быть выбран для получения оптимальной характеристики, то есть с максимальным значением μ' и минимальным значением μ'' в нужной области рабочих частот (табл. 1) для конкретного приложения. Так, потери, описываемые параметром μ'' , у материала WE-FSFS 354 меньше 2 до частоты 2 МГц, а вот μ' этого материала больше 200. Это позволяет создавать идеальный экран для стандартов Qi и PMA. А материал WE-FSFS 364 лучше всего применять на высоких частотах, так как на частоте 13,56 МГц он имеет низкие потери ($\mu'' < 2$) при магнитной проницаемости μ' больше 100.

В процессе передачи энергии в индуктивно связанной паре катушек магнитный поток течет из передатчика через катушку приемника, используя его окружающую среду для того, чтобы замкнуть поток. Как видно на рис. 11, этот направленный поток течет через приемник и таким образом обеспечивает работу за-

Таблица 3. Стандарты беспроводной передачи энергии

| Стандарт | Диапазон частот |
|----------|-----------------|
| WPC-Qi | 100–205 кГц |
| PMA | 277–357 кГц |
| A4WP | 6,78 МГц |
| WCT | 13,56 МГц |

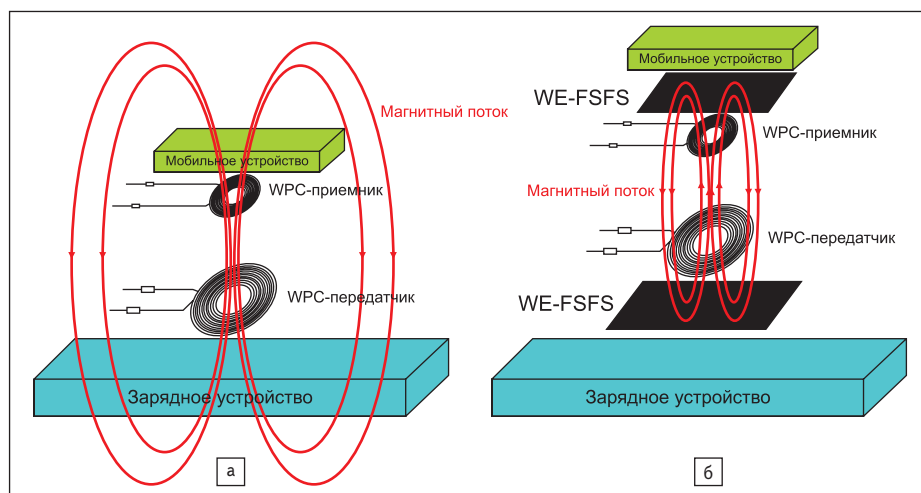


Рис. 11. Беспроводная передача энергии с помощью магнитного потока материалом WE-FSFS: а) без экранирования; б) с экранированием

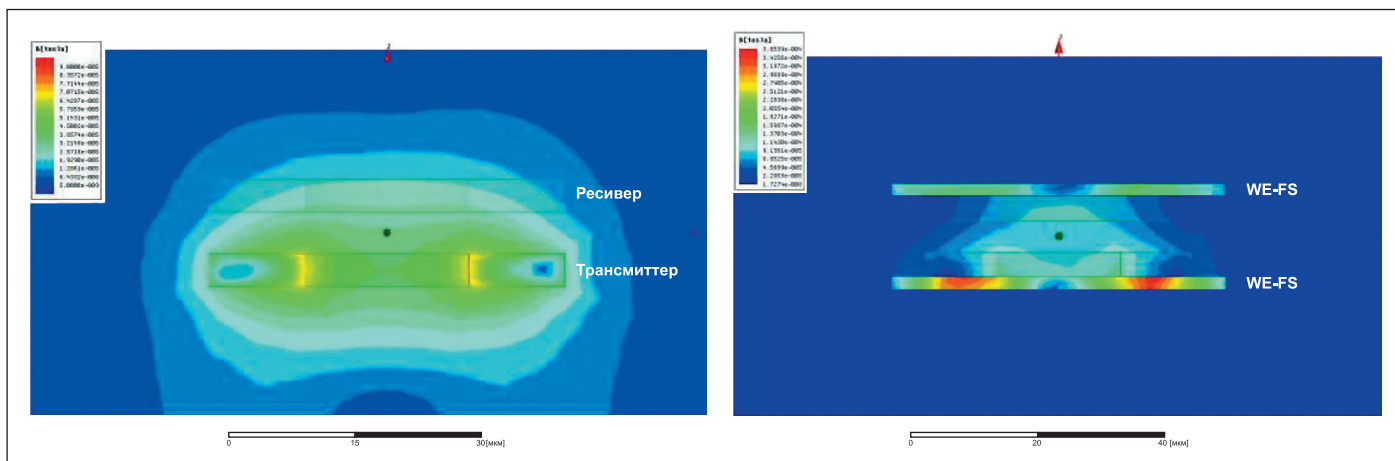


Рис. 12. Модель перераспределения полей без магнитного экранирования и с магнитным экранированием на примере системы беспроводной передачи энергии

Таблица 4. Влияние ферромагнитного материала WE-FSFS 354 на индуктивность плоской катушки

| Результат | Катушка на печатной плате | Катушка + 0,1 мм WE-FSFS 354 | Катушка + 0,2 мм WE-FSFS 354 | Катушка + 0,3 мм WE-FSFS 354 |
|---------------------|---------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| Индуктивность, мкГн | 8,4 | 12,8 | 13,6 | 14,2 |

(зеленый и желтый цвета) и взаимодействие этой катушки с катушкой приемника, а также поле, проходящее за катушкой приемника к задней части катушки передатчика (светло-синий цвет).

Кроме экранирования, еще одной важной областью применения описываемых материалов является повышение индуктивности плоских катушек. В таблице 4 [5] предложен достаточно информативный пример влияния материала WE-FSFS 354 на плоскую, выполненную методом травления катушку.

Как видно из таблицы 4, увеличение индуктивности плоской, выполненной методом травления катушки может быть легко достигнуто почти в 1,7 раза.

Приведенные примеры и краткие объяснения механизма взаимодействия, а также результаты измерений и компьютерного моделирования показывают, как при помощи описываемых материалов компании Würth Elektronik можно добиться существенных улучшений в экранировании устройств и в создании приборов, в которых используется технология с индуктивной связью. Применение таких материалов для управления магнитным потоком позволяет значительно улучшить характеристики экранирования в ответственных приложениях, таких как беспроводная передача энергии и ближняя бесконтактная связь. Выбор материалов в соответствии с рабочей частотой конечных устройств, максимизация магнитной проницаемости и минимизация потерь,

правильное размещение материала способны повысить эффективность передачи энергии и экранирования. Одновременно с минимизацией помех и паразитного излучения уменьшается и нагрев устройства из-за действия внешних полей. Еще одним важным преимуществом рассматриваемых материалов становится их возможность закрывать именно те зоны, которые необходимы. Этому способствуют не только физические свойства данных магнитных материалов, но и, что очень важно, их высокие диэлектрические свойства.

Благодаря своим высоким характеристикам, широкому ассортименту в части магнитной проницаемости и толщиной, гибкие похлупопоглощающие листы из композитного материала WE-FAS и листы из спеченного феррита WE-FSFS компании Würth Elektronik могут найти широкое применение при реализации задач в области новых технологий, связанных с повышением эффективности и степени интеграции любой электронной аппаратуры. ■

Литература

1. Рентюк В. Устранение конфликта интересов при разработке РЭА // Технологии в электронной промышленности. 2014. № 7.
2. Рентюк В. Практические вопросы применения ИМС изолированного интерфейса в части выполнения требования по электромагнитной совместимости // Компоненты и технологии. 2015. № 3.
3. Fölkel L. EMC SEMINAR. 2012, Würth Elektronik eiSos GmbH, 2012.
4. Ahuir J. V. Going Wireless with Magnetic Shielding. Application note. Würth Elektronik eiSos GmbH, 2013-10-15.
5. Ahuir J. V. Selection and Characteristics of WE-FSFS (Flexible Sintered Ferrite Sheet). Application note. Würth Elektronik eiSos GmbH, 2014-04-25.
6. Narayanan R. Wireless Power Charging Coil Changing Considerations. Application note. Würth Elektronik eiSos GmbH, 2015-02-23b.