

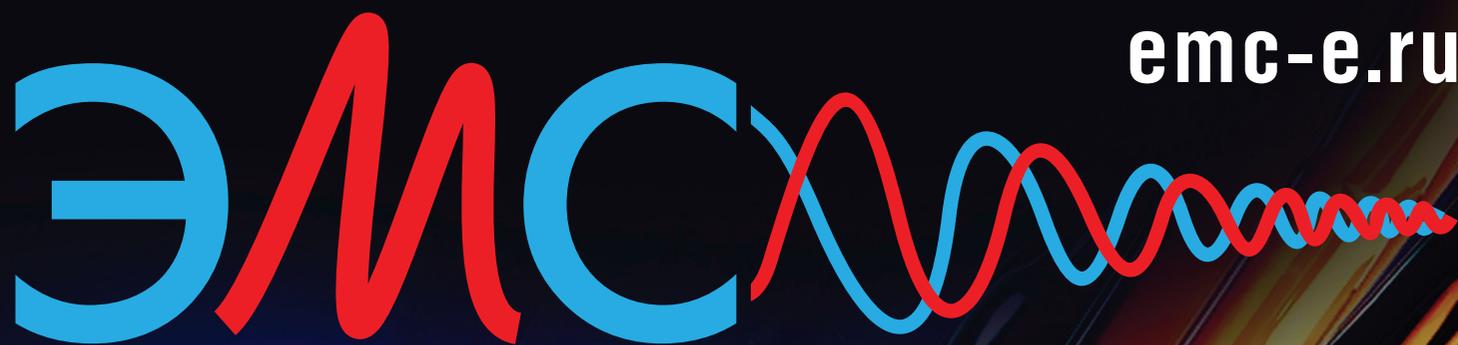
2018
Выбор и использование
ферритовых бусин
для подавления звона
в импульсных преобразователях

55
Концепция эффективного
EMI-экранирования

2018
Что нужно знать об испытаниях
на выполнение требований
по ЭМС для изделий
коммерческого назначения

emc-e.ru

ЭМС



ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ В ЭЛЕКТРОНИКЕ

СБОРНИК
2018

SUCOFLEX 126 — инновационное развитие серии кабельных сборок SUCOFLEX 100

SUCOFLEX_126

сочетает в себе преимущества кабелей 100-й серии с плетеным и сплошным центральным проводником за счет инновационной технологии его формирования с опрессовкой.

- Применение до 26,5 ГГц
- Минимальный КСВН
- Отличная стабильность фазы и амплитуды
- Низкие потери
- Широкий ассортимент соединителей
- Дополнительные защиты
- Складские позиции



Технические характеристики	SUCOFLEX 126	SUCOFLEX 126E	SUCOFLEX 126EA
Масса, г/м	70	66	171
Мин. радиус изгиба (однократный), мм	16	16	30
Мин. радиус изгиба (многократный), мм	25	25	50
Диапазон рабочих температур, °С	-55...+125	-40...+85	-40...+85
Оболочка	FEP	PUR	PUR
Наличие защиты	нет	нет	да
Внешний диаметр, мм	5,5	5,5	10,3
Фазовая стабильность при изгибе °el/ГГц	<0,9	<0,9	<0,9
Фазовая стабильность в диапазоне температур (-40/+85 °С), ppm	<1500	<1500	<1500
Стабильность затухания при изгибе, дБ	±0,2	±0,2	±0,2
Стабильность затухания в диапазоне температур, %/°С	<0,2	<0,2	<0,2
Стабильность затухания при встряхивании, дБ	±0,1	±0,1	±0,1

Позиции на складе в Москве

Обозначение	Описание	Длина, мм	Макс. частота, ГГц
SF126EA/Nm/Nm/1000mm	N-вилка – N-вилка	1000	18
SF126EA/11DV-41/11N-452/1000mm	NMD 3,5 мм* – N-вилка	1000	18
SF126EA/11PC3.5-43/11PC3.5-43/1000mm	3,5-мм вилка – 3,5-мм вилка	1000	26,5
SF126EA/11DV-41/11PC3.5-43/1000mm	NMD 3,5 мм* – 3,5-мм вилка	1000	26,5

* Непосредственное подключение к NMD портам анализаторов цепей.

от редакции

Не секрет, что задача по обеспечению электромагнитной совместимости современного электронного оборудования, масштабы использования которого постоянно растут в соответствии с рыночным спросом, как никогда становится все более насущной. Чтобы работоспособность систем отвечала требованиям нынешних приложений, производители должны учитывать влияние электромагнитного излучения одних устройств на функционирование других, делая их устойчивыми к помехам.

В настоящем ежегодном издании собраны статьи из разных отраслевых журналов, посвященные наиболее актуальным аспектам этой очень серьезной проблемы. Читатели найдут в сборнике статьи, посвященные стандартизации, в т.ч. тестированию и новой законодательной базе, материалы об особенностях применения пассивных компонентов в высокоскоростных системах, а также помехоподавляющих фильтров, публикации о заземлении электронной аппаратуры и концепциях эффективного экранирования электромагнитных помех, а также статьи по разработке, конструированию и испытаниям на электромагнитную совместимость.

Разумеется, нам хорошо известно, что существует другое отраслевое издание на эту же тему. Однако, поскольку она неисчерпаема, мы хотим воспользоваться возможностью осветить ее полнее, представив в одном сборнике самую широкую площадку для русскоязычных публикаций.

Мы приглашаем к сотрудничеству авторов и компании, которые желают поделиться своим опытом, рассказать о решении проблем обеспечения ЭМС на практических примерах, представить свою продукцию.

Следующий ежегодник планируется к выпуску в июне 2019 г.

*С наилучшими пожеланиями,
редакция ежегодника «ЭМС»*

Содержание

Стандарты ЭМС

Владимир РЕНТЮК

Электромагнитная совместимость:
проблема, от которой не уйти 4

Гери ПЕТИТ (Ghery PETTIT)

Перевод и комментарии:

Владимир РЕНТЮК

Что нужно знать об испытаниях на выполнение требований
ЭМС для изделий военного и аэрокосмического назначения.
Краткий обзор..... 6

Стив ХЕЙС (Steve HAYES)

Перевод, дополнения и комментарии:

Владимир РЕНТЮК

Что такое риски и анализ рисков применительно к ЭМС..... 13

Пассивные компоненты

Владимир РЕНТЮК

Синфазные дроссели для высокоскоростных интерфейсов:
рекомендации по выбору 16

Синфазные дроссели от Pulse Electronics —
эффективная защита высокоскоростных линий передачи 20

Кристофер РИЧАРДСОН (Christopher RICHARDSON)

Ранжит БРАМАНПАЛЛИ (Ranjith BRAMANPALLI)

Выбор и использование ферритовых бусин для подавления звона
в импульсных преобразователях..... 22

Владимир Рентюк (Rvk.modul@gmail.com)

Многослойные ферритовые элементы компании TDK EPCOS —
эффективное и удобное решение проблемы ЭМС..... 29

Владимир СМЕРНОВ, Алевтина ШАЛАЕВА

Керамические помехоподавляющие конденсаторы
и фильтры нижних частот АО «НИИ «Гириконд» 34

Константин ВЕРХУЛЕВСКИЙ

Защитные TVS-устройства компании Semtech:
разнообразие выбора..... 42

ЭМП-фильтры

Карстен ЮРГЕНС (Carsten YURGENS)

Применение помехоподавляющих фильтров
на выходе преобразователей частоты..... 48

Игорь КУРАЕВ

Применение помехоподавляющих входных фильтров 52

Заземление

Владимир ГУРЕВИЧ

Проблемы заземления электронной аппаратуры
электроэнергетических объектов..... 58

Экранирование

Лоран ФОЛКЕЛЬ (Lorandt FÖLKEL)

Перевод: Евгений КАРТАШЕВ

Концепция эффективного ЕМП-экранирования..... 64

Экранирующие листы Flexield серии IFL
для подавления шума 68

Экранирующие корпуса от Gainta Industries Ltd. —
эффективное решение проблемы ЭМС..... 72

Хорхе Виктория АВИР (Jorge Victoria AHUIR)

Магнитная защита для беспроводных систем 73

Хорхе Виктория АВИР (Jorge Victoria AHUIR)

Гибкие ферритовые пластины WE-FSFS и их выбор..... 77

Главный редактор

Леонид Чанов | leonid.chanov@ecomp.ru

Технический редактор

Владимир Фомичев | vladimir.fomichev@ecomp.ru

Дизайн и верстка

Людмила Яуфман | ludmila.yaufman@fsmedia.ru

Отдел рекламы

Ирина Миленина | irina@fsmedia.ru
Антон Денисов | anton.denisov@ecomp.ru
Елена Живова | elena.zhivova@ecomp.ru

Москва

ул. Южнопортовая, д. 7, строение Д, этаж 2
Тел./факс: (495) 9873720

Санкт-Петербург

197101, Петроградская наб., д. 34, лит. Б
Тел. (812) 438-1538
Факс (812) 346-0665
e-mail: compitech@fsmedia.ru, web: www.kite.ru

Редакция не несет ответственности за информацию, приведенную в рекламных материалах.
Полное или частичное воспроизведение материалов допускается с разрешения
ООО «Медиа Кит» и ООО «ИД Электроника»

В сборнике использованы материалы из журналов «Компоненты и технологии», «Силовая Электроника», «СВЧ-Электроника», «Электронные компоненты».

Содержание

Топология печатных плат

Александр ПОНОМАРЕВ

Основные вопросы обеспечения электромагнитной совместимости 80

САПР

Семен ДУБИЦКИЙ

Инженерное моделирование квазистатического электромагнитного поля в программе ELCUT для задач электроники..... 84

Разработка и конструирование

Андреас НАДЛЕР (Andreas NADLER)

Кем СОМ (Cem SOM)

Перевод, дополнения и комментарии: Владимир РЕНТЮК

Беспроводная передача энергии большой мощности для устройств, работающих в условиях индустриальной среды..... 89

Стив СЭНДЛЕР (Steve SANDLER)

Перевод, дополнения и комментарии: Владимир РЕНТЮК

Тенденция к миниатюризации: как решить проблемы ЭМС и целостности питания..... 95

Анатолий САВЕЛЬЕВ (anatoly.saveliev@eu.tdk.com)

Олег ГНЕУШЕВ (oleg.gneushev@eu.tdk.com)

Первое универсальное интегрированное решение для различных приводов электродвигателей 101

Андрей КОЛПАКОВ (Andrey.Kolpakv@semikron.com)

Базовые проблемы силовой электроники: ЕМІ и ЕМС..... 106

Александр ПОЛИКАРПОВ

Как уменьшить излучение с помощью полностью интегрированной развязки по шинам данных и питания 114

Борис ЛАРЧЕНКО

Использование гальванического разделения цепей для улучшения электромагнитной совместимости..... 120

Джейсон ТОЛЛЕФСОН (Jason TOLLEFSON)

Обеспечение ЭМС Ethernet-приложений в жестких условиях эксплуатации 124

Испытания на ЭМС

Владимир РЕНТЮК

Что нужно знать об испытаниях на выполнение требований по ЭМС для изделий коммерческого назначения 126

Гери ПЕТИТ (Ghery PETTIT)

Перевод и дополнения: Владимир РЕНТЮК

Что требуется при подготовке изделия для испытаний, как их проводят и чем они заканчиваются..... 133

Халид КАЧАЕВ

Метрологические аспекты разработки испытательных комплексов ЭМС 140

Мэтью Ван Ден БЕРГ

Рекомендации по проверке испытательных систем на электромагнитную совместимость..... 142

Владимир БЕЛОВ, Владимир ПЕТРОВ,

ООО «РОДЕ и ШВАРЦ РУС»

Конфигурирование испытательной лаборатории ЭМС с открытой архитектурой 148

Сергей ЛЮТАЕВ, начальник ИЛ ЭМС, АО «ТЕСТПРИБОР»

Экранированные и беззехвые камеры «ТЕКО» — конкурентное решение в рамках программы импортозамещения 151

Илья РОМАНОВ

Резонансный метод в испытаниях на восприимчивость к высокочастотному магнитному полю 154

Кеннет УАЙТ (Kenneth WYATT)

Перевод, дополнения и комментарии: Владимир РЕНТЮК

Устранение проблем, выявленных в ходе испытаний изделия на выполнение требований по ЭМС 157

Сергей ЛЮТАЕВ

Методы испытаний кабельных жгутов на электромагнитную совместимость 163

Владимир БЕЛОВ, Владимир ПЕТРОВ

Интеграция лаборатории ЭМС в систему распределенного проектирования прототипов изделий приборостроения 167

Электромагнитная совместимость: проблема, от которой не уйти

Владимир РЕНТЮК
Rvk.modul@gmail.com

В настоящее время мы видим экспоненциальный рост применения электронного оборудования, большая часть которого имеет встроенные преобразователи энергии, генераторы, передатчики и приемники. Это и приборы для самого широкого потребления, и устройства, непосредственно влияющие на нашу жизнь и безопасность. Кроме того, наблюдается бурное развитие решений технологии «Интернета вещей» (IoT), постепенно меняющих привычную нам среду. Настоящая серия статей посвящена испытаниям, необходимым для подтверждения требований ЭМС.

С ростом количества устройств, основанных на передаче радиосигналов, производителям становится крайне сложно обеспечить их работоспособность без учета влияния электромагнитного излучения одного оборудования на функционирование другого. Отсюда следует, что подобные устройства необходимо рассматривать с такой важной точки зрения, как генерация ими электромагнитных помех и устойчивость самого оборудования к внешнему воздействию излучения от других приборов.

Так что если вы разработчик или поставщик электрического или электронного оборудования, то у вашего продукта всегда имеются требования по электромагнитной совместимости (ЭМС), отображенные в его технических характеристиках (спецификации или технических условиях). Они могут вытекать из стандартов, которым должны соответствовать выпускаемые изделия, иначе их просто нельзя будет продавать на рынке. Иногда клиент включает свое видение этой проблемы в техническое задание на разработку продукта или заказ на поставку (однако для рыночных изделий уменьшить установленные требования заказчик не вправе, и лазейка подменить стандарт техническими условиями здесь не сработает). Следует помнить, что выполнение требований по электромагнитной совместимости, как и стандартов по безопасности, обязательно и контролируется соответствующими органами по сертификации конкретного вида продукции. Несоблюдение регламентов по ЭМС возможно лишь в том случае, если это макет или опытный образец, изделие специального назначения, одиночная продукция, не предназначенная для продажи, и решения, разработанные не для рынка, а поставляемые по отдельным контрактам с оговоренными условиями и рисками заказчика.

Итак, когда вы должны выполнить определенные требования, как доказать, что изготовленный вами продукт соответствует им? Как правило, вы подтверждаете их испытанием продукта. Хорошо, а что это означает? Каковы эти испытания? Что и как должно проверяться?

Именно подобные вопросы будут достаточно тщательно рассмотрены в предлагаемой серии статей, но уже сейчас можно сказать, что испытания по ЭМС можно разделить на две большие категории. Это собственное излучение, или наводка электромагнитных помех (в стандартах именуется «индустриальные радиопомехи», которые делятся на наводимые либо кондуктивные и излучаемые), и устойчивость к воздействию внешних электромагнитных помех, или восприимчивость, если это касается военного и аэрокосмического оборудования. Задача испытаний — установить, сколько радиочастотной энергии излучает продукт и каков уровень его устойчивости к внешним электромагнитным воздействиям разного типа. Испытания на устойчивость к электромагнитным помехам проводятся для определения того, будет ли продукт работать должным образом, когда он подвергается воздействию различных источников электромагнитной энергии в предполагаемых условиях эксплуатации.

Требования стандартов по ЭМС постоянно меняются, причем в сторону ужесточения нормативов. Классическим примером может служить стандарт по регламентации индустриальных радиопомех для оборудования информационных технологий (*англ.* Information Technology Equipment, ITE), такой причудливый термин для компьютеров и их периферийных устройств установлен стандартом CISPR 22 (российский аналог — ГОСТ 30805.22-2013). Само

название CISPR представляет собой аббревиатуру от французского наименования Международного комитета по радиопомехам — Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques. Он, в свою очередь, является специальным комитетом Международной электротехнической комиссии (МЭК). Первая редакция стандарта CISPR 22 опубликована еще в 1985 году, а шестое и окончательное издание появилось в сентябре 2008 года (в РФ действует редакция 2006-го). Впоследствии, в 2012 году, CISPR 22 вместе с CISPR 13 «Радиовещательные приемники, телевизоры и другая бытовая радиоэлектронная аппаратура» был заменен на CISPR 32 «Электромагнитная совместимость оборудования мультимедиа. Требования к электромагнитной эмиссии» (аналог РФ — ГОСТ CISPR 32-2015). В начале марта 2017 года МЭК отменила CISPR 13 и 22 (на территории РФ они пока действуют). Таким образом, в международном масштабе стандарт CISPR 32 обеспечивает общие требования к электромагнитной эмиссии для радиовещательных приемников, оборудования информационных технологий и мультимедийного оборудования. Второе издание впервые опубликованного в 2012 году стандарта CISPR 32 было выпущено уже в 2015-м, а в настоящее время Рабочая группа 2 Подкомитета I CISPR занимается поправками к этому изданию CISPR 32. Цель описания эволюции одного из основополагающих стандартов по ЭМС заключается не в подробностях, а в том, чтобы показать, что стандарты в этой области постоянно обновляются и заменяются. CISPR 20 и CISPR 24 будут отозваны МЭК в 2020 году.

Здесь приведена лишь выборка стандартов, которые постоянно пересматриваются. Еще одной существенной проблемой для производителя является не только соблю-

дение конкретных требований, выходящих за рамки международных стандартов и принятых в тех странах, где продукт должен быть продан, но и знание действующих версий стандарта для конкретного продукта. Чтобы понять, насколько это важно для современной, в том числе российской электроники, следует оценить хотя бы общее число существующих стандартов типа ГОСТ Р, посвященных данной тематике (www.emci.ru/testig.html).

Редакция журнала в своих публикациях неоднократно поднимала вопросы электромагнитной совместимости и приводила наглядные примеры, демонстрирующие, что происходит из-за неправильного подхода или запаздывания в решении вопросов ЭМС [1, 2]. На рисунке приведен график, показывающий распределение затрат в зависимости от этапа работ, в ходе которых решаются вопросы электромагнитной совместимости [3].

Итак, что же ждет нас в дальнейшем? Легкой жизни не предвидится. Стандарты будут развиваться и заменяться. И по-прежнему накладывать требования для продуктов с учетом их специфики и рынков сбыта. Регламенты по ЭМС не исчезнут, а станут только жестче, и их нельзя игнорировать, если мы хотим продвигать свой продукт на рынок. Кроме того, следует постоянно помнить, что нужно не только учитывать требования по ЭМС в уже разработанном конечном решении, но и уделять этим непростым вопросам самое пристальное внимание на этапе проектирования, поскольку в своей основе продукт должен иметь заданную функциональность. Рынок не прощает потерь времени на доработку изделий.

Проблема, поднятая в этой статье, далеко не простая. Она многогранна и выходит за рамки обязательной сертификации, к которой иногда относятся, как студенты к сданному предмету (зубрил, сдал, забыл). Возьмем, к примеру, обычный смартфон, содержащий несколько различных радиоустройств: сотовый телефон, Bluetooth, Wi-Fi, GPS, FM-приемник... Плюс цифровые схемы, которые должны функционировать с работающими передатчиками и при этом сами не генерировать недопустимый уровень помех. Решение вопросов совместимости здесь полностью лежит на совести разработчика. Данные аспекты пока (еще только пока) не подпадают под требования нормативных документов, но если ваш продукт не сможет должным образом функционировать, сочетая все возможные источники излучений и их приемники, то подобное изделие, скорее всего, не будет успешным на рынке даже при минимальной по отношению к конкурентным товарам стоимости.

Статьи, предлагаемые читателям, будут посвящены не частным аспектам ЭМС

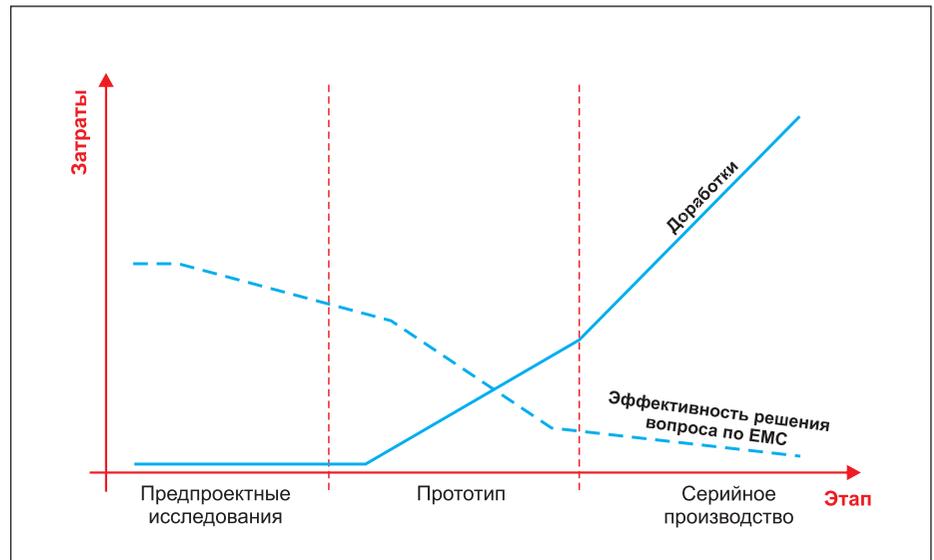


Рисунок. Распределение затрат на выполнение требований по электромагнитной совместимости в зависимости от этапа работ

по конкретному типу продукции, которым обычно уделяется внимание, а общим проблемам того, что означает и скрывает в себе проверка на выполнение требований по ЭМС. Здесь не является самоцелью рассмотрение узких вопросов элементов фильтрации ЭМП, экранирования и использования испытательного оборудования — об этом говорится довольно часто и важность такой информации не нужно недооценивать. Читателям будет предложено взглянуть на проблему ЭМС с другого ракурса и ознакомиться с особенностями испытаний оборудования коммерческого, военного и аэрокосмического назначения, а также узнать, как подготовить оборудование и себя к подобным испытаниям и устранить проблемы, возникающие при тестировании изделий в сертифицированной лаборатории ЭМС (опираясь на богатый личный опыт, могу сказать, что пройти его с первого раза — редкая и большая удача). Кроме того, будет уделено внимание анализу и управлению рисками ЭМС.

В основу статьи положены адаптированные автором к текущему положению вещей в Российской Федерации статьи из [4] с комментариями, дополнениями, уточнениями и пояснениями в соответствии с международными стандартами и стандартами, действующими на территории РФ. Важность этой темы подчеркивает, например, и тот факт, что в 2017 году проводится пять представительных мировых конференций по вопросам ЭМС: АРЕС-2017 (Тампа, Флорида, США); Международная выставка EMV-2017 (Штутгарт, Германия); Симпозиум по EMS + SIPI (Нешнел Харбо, Мэриленд, США); Automotive Testing Expo (Нови, Мичиган, США) и EDI CON USA (Бостон, Массачусетс, США). Только весной текущего года в России

состоялись две практические конференции, посвященные проблемам ЭМС, с широким кругом участников. Это «Технологии, измерения и испытания в области электромагнитной совместимости — ТехноЭМС-2017» [5], которая прошла в Москве в марте, и VI Всероссийская научно-техническая конференция на тему «Электромагнитная совместимость», проведенная в мае.

Автор благодарит Кеннета Уайтта (Kenneth Wyatt), старшего технического редактора журнала «Interference Technology Magazine» (издательство ITEM Media), и бывшего директора EEE EMC Society Гери Петита (Ghery Pettit), который в настоящее время занимает должность председателя технического комитета по стандартизации CISPR SC I, за разрешение использовать опубликованные ITEM Media материалы. ■

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. Рентюк В. Решение проблемы магнитного экранирования на примере материалов компании Würth Elektronik // Компоненты и технологии. 2015. № 8.
4. 2017 EMC TESTING GUIDE, INTERFERENCE TECHNOLOGY GUIDE SERIES, 2017 ITEM Media. www.learn.interferencetechnology.com/2017-emc-testing-guide/
5. www.technoemc.ru
6. www.test-expert.ru/news/detail.php?ID=942

Что нужно знать об испытаниях на выполнение требований ЭМС для изделий военного и аэрокосмического назначения. Краткий обзор

Гери ПЕТИТ (Ghery PETTIT)
Ghery@PettitEMCConsulting.com

Перевод и комментарии:
Владимир РЕНТЮК

В рамках второй из анонсированных в [1] статей нас будут интересовать общие требования по электромагнитной совместимости (ЭМС) изделий военного и аэрокосмического назначения. Испытания на ЭМС такого оборудования охватывают весьма широкий спектр самых разнообразных продуктов данного направления техники. И хотя стандарты, включая ограничения и методы тестирования, могут различаться, все они в части проверки на соответствие требованиям ЭМС имеют общие черты. Используемое оборудование и схемы измерений во многом похожи на оборудование и схемы, приведенные в первой статье цикла [2], однако у них есть свои особенности. Впервые оригинальная статья [3] опубликована в выпуске [4]. Читателям она предлагается в авторском переводе с комментариями, дополнениями и уточнениями согласно действующим международным стандартам и нормативным документам, используемым на территории Российской Федерации.

Что касается оборудования военного и аэрокосмического назначения, здесь основные требования в части ЭМС, так же как и для продуктов коммерческого назначения, — это соответствие задаваемым ограничениям на уровни наводимых и излучаемых помех, а также на уровни чувствительности к воздействиям электромагнитных полей с учетом области применения

и специфики конкретного оборудования. Для оборудования военного и аэрокосмического назначения испытания на уровни помех и связанные с ними ограничения предназначены в первую очередь для обеспечения надежного функционирования всех остальных систем конечного изделия в условиях наведенных и излучаемых помех по цепям подключения, а также взаимной эмиссии

и воздействия внешних электрических, электромагнитных и магнитных полей. Эти нормы жестче и более детально проработаны. Причем и оборудование, и системы не обязательно содержат те или иные радиоприемные или радиопередающие устройства. Важность решения данной проблемы наглядно иллюстрируют примеры, демонстрирующие последствия неадекватной с точки зрения ЭМС конструкции, приведенные, в частности, в публикации [5].

Хотя во многих типах военного и аэрокосмического оборудования проблемы ЭМС могут быть устранены внесением оперативных изменений (что греха таить, зачастую из-за сложности подобного оборудования и насыщенности систем так и поступают), но для выявления слабых мест по-прежнему требуется проведение испытаний не только на уровне НИОКР, но и сертификации изделий. Обнаружение отклонений на начальных этапах разработки значительно сократит затраты на последующую увязку всей системы в целом. Поэтому без испытаний невозможно обойтись, однако они, как известно, не являются некоей самоцелью, а должны проводиться по стандартизированной методике и опираться на соответствие установленным граничным нормативам.

Примеры аварий и проблем, связанных с нарушениями требований в части ЭМС

В период между 1981 и 1987 годами несколько вертолетов Blackhawk UH-60 потерпели аварии, в которых погибли 22 военнослужащих. Как оказалось, аварии были связаны с недостаточной устойчивостью навигационного оборудования к воздействию внешних электромагнитных полей при пролете вертолетов вблизи антенн мощных радиовещательных станций. Именно их воздействие и приводило к неконтролируемому самопроизвольному смертельному пикированию.

Еще один пример касается штурмовика с вертикальным взлетом и посадкой AV-8B Harrier. Самолет был потерян, а пилот погиб в результате косвенных последствий от удара молнии, вызвавшего большие наведенные электрические токи внутри крыла самолета. Соединитель внутри системы топливных баков крыла не был способен выдерживать подобные нагрузки, в результате протекающий через него ток вызвал искру, которая в свою очередь и привела к взрыву топлива.

Согласно информации из отраслевых источников, Военно-воздушные силы США вынуждены были устранить потенциальную проблему от излучаемых высокочастотных сигналов бомбардировщиков B-2. Анализ показал потенциальные проблемы помехи радарной системы Raytheon AN/APQ-181, размещенной на B-2A и оказывающей влияние на системы коммерческой спутниковой связи, вводимой в эксплуатацию после 2007 года. В результате проведенных исследований было установлено, что радиолокатор B-2 может не только нарушить их функционирование, но и повредить коммерческие спутники связи, за что ВВС США будут нести прямую ответственность. Ожидаемая общая сметная стоимость переработки была оценена в \$1,3 млрд.

Таблица 1. Установленные MIL-STD-461G требования к эмиссии и восприимчивости

Метод/ требование	Описание
CE101	Conducted Emissions, Audio Frequency Currents, Power Leads
	Кондуктивные помехи, токи звуковой частоты, провода подключения питания
CE102	Conducted Emissions, Radio Frequency Potentials, Power Leads
	Кондуктивные помехи, радиочастотные потенциалы, провода подключения питания
CE106	Conducted Emissions, Antenna Port
	Кондуктивные помехи, антенные порты
CS101	Conducted Susceptibility, Power Leads
	Кондуктивная восприимчивость, провода подключения питания
CS103	Conducted Susceptibility, Antenna Port, Intermodulation
	Кондуктивная восприимчивость, антенные порты, интермодуляция
CS104	Conducted Susceptibility, Antenna Port, Rejection of Undesired Signals
	Кондуктивная восприимчивость, антенные порты, подавление паразитных (нежелательных) сигналов
CS105	Conducted Susceptibility, Antenna Port, Cross-Modulation
	Кондуктивная восприимчивость, антенные порты, перекрестная модуляция
CS109	Conducted Susceptibility, Structure Current
	Кондуктивная восприимчивость, наведенные токи
CS114	Conducted Susceptibility, Bulk Cable Injection
	Кондуктивная восприимчивость, влияние помех, наведенных на кабелях
CS115	Conducted Susceptibility, Bulk Cable Injection, Impulse Excitation
	Кондуктивная восприимчивость, влияние помех, наведенных на кабелях, импульсные помехи
CS116	Conducted Susceptibility, Damped Sinusoidal Transients, Cables and Power Leads
	Кондуктивная восприимчивость, затухающие колебательные помехи, кабели и провода подключения питания
CS117	Conducted Susceptibility, Lightning Induced Transients, Cables and Power Leads
	Кондуктивная восприимчивость, переходные процессы, инициированные ударом молнии, кабели и провода подключения питания
CS118	Conducted Susceptibility, Personnel Borne Electrostatic Discharge
	Кондуктивная восприимчивость, электростатические разряды от персонала
RE101	Radiated Emissions, Magnetic Field
	Электромагнитная эмиссия, магнитные поля
RE102	Radiated Emissions, Electric Field
	Электромагнитная эмиссия, электрические поля
RE103	Radiated Emissions, Antenna Spurious and Harmonic Outputs
	Электромагнитная эмиссия, гармонические и побочные сигналы антенн
RS101	Radiated Susceptibility, Magnetic Field
	Электромагнитная восприимчивость, магнитные поля
RS103	Radiated Susceptibility, Electric Field
	Электромагнитная восприимчивость, электрические поля
RS105	Radiated Susceptibility, Transient Electromagnetic Field
	Электромагнитная восприимчивость, переходные процессы электромагнитных полей

Примечание переводчика. Прошу обратить внимание, что в ряде текущих публикаций на тему стандарта MIL-STD-461 используются устаревшие данные из версии F и ниже, которые содержат меньше критериев оценки оборудования. При необходимости уточнить различия в версиях стандарта следует обратиться к [8] и к полным описаниям версий стандарта.

Тестирование по выполнению регламентов ЭМС для оборудования военного и аэрокосмического назначения выполняется на уровне системы и подсистемы. Требования на уровне оборудования или подсистемы обеспечивает последняя версия стандарта MIL-STD-461G [6], а требования на уровне системы или платформы размещения оборудования (носителя) устанавливает стандарт MIL-STD-464C [7]. В публикации [5] приведены подробные сведения по обоим весьма объемным стандартам. Задача данной статьи, не вникая в подробности и излишнюю детализацию, дать общие сведения по основным испытаниям на выполнение требований ЭМС, в частности те, которые устанавливает базовый стандарт MIL-STD-461G на интересующие нас оборудование и подсистемы.

Почему для обзора были выбраны именно стандарты США — MIL-STD-461G и MIL-STD-464C? Дело в том, что на практике они давно стали международными и соответствие их требованиям часто указывается

в документации не только на оборудование или изделия оборонного и аэрокосмического направления, но и там, где нужно подтвердить высокую надежность и устойчивость к внешним воздействиям, в том числе и относительно ЭМС. Чаще всего они используются в области разработки систем управления, вычислительных систем, компонентов авиационной и автомобильной техники и изделий двойного назначения. Кроме того, с ними сталкиваются и при закупке импортных комплектующих изделий и оборудования, в том числе не только оборонного назначения.

Система испытаний, положенная в основу стандарта MIL-STD-461G в части ответственности по ЭМС, включает поверку на уровни излучаемых электромагнитных помех (эмиссию) и восприимчивости к ним, а также на уровни кондуктивных (наведенных) помех и на восприимчивость к таким помехам. Стандарт MIL-STD-461G разделяет эти требования на четыре основные категории. Категория CE — кондуктивные помехи;

CS — восприимчивость к кондуктивным помехам; RE — излучаемые электромагнитные помехи (эмиссия) и RS — восприимчивость к электромагнитной эмиссии. В каждой категории имеется несколько типов испытаний, которые сведены в таблицу 1, соответствующую таблице IV Emission and susceptibility requirements стандарта MIL-STD-461G. Неоспоримым достоинством стандарта, как и большинства стандартов MIL-STD, является четкость и однозначность не только всех норм и методик, но и толкования результатов. Вместе с тем данный стандарт не ограничивает разработчика жесткими рамками там, где не требуется. Последнее наблюдалось в советских стандартах, которые в отношении военной тематики нередко были отраслевыми (ОСТы, причем часть из них существует и в настоящее время), засекреченными, имели как минимум гриф ДСП (для служебного пользования) и хранились не в отделе стандартизации, а в первом отделе.

Здесь важно точно знать определения, для этого воспользуемся их трактовкой соответствующими стандартами, действующими на территории РФ:

1. Понятие «кондуктивные помехи» (англ. continuous conducted emissions) подразумевает напряжения/токи помех непрерывного характера, существующие на проводах источника питания и других проводах элемента/модуля, которые могут создавать помехи работе бортового приемника.
2. Понятие «кондуктивная восприимчивость» (англ. conducted susceptibility) предполагает восприимчивость системы к кондуктивным (наведенным) сигналам в кабелях, подключенных к системе.
3. Понятие «электромагнитная эмиссия», или «электромагнитная помеха» (англ. radiated emissions), подразумевает электромагнитную помеху, распространяющуюся в пространстве.
4. Понятие «электромагнитная восприимчивость» (англ. radiated susceptibility) определяет способность рецептора реагировать на электромагнитную помеху.

Краткое описание каждого из этих видов испытаний будет приведено ниже. Они взяты из стандарта MIL-STD-461G и обобщены с помощью информации, которая содержится в [5, 10 и 11]. Кстати, полный текст MIL-STD-461G составляет 280 страниц, поэтому все, что изложено в данной статье, должно восприниматься исключительно как справочная информация. Для практических целей следует использовать оригинальную редакцию стандарта MIL-STD-461G [6], причем после самого тщательного ее изучения. Официальная текущая версия, или, как мы говорим, «учтенная копия» стандарта, как и его предыдущие версии C, D, E и F, бесплатно доступна на сайте: http://quicksearch.dla.mil/qsDocDetails.asp?id_number=35789.

Виды испытаний по стандарту MIL-STD-461G

Категория CE101.

Кондуктивные помехи, токи звуковой частоты, провода подключения питания

Категория CE101 применима для оценки помех в полосе частот 30 Гц – 10 кГц, наводимых на проводах, по которым оборудование получает мощность от источников питания, не являющихся частью испытываемого оборудования (ИО). Эти требования не устанавливают нормы на выходных клеммах непосредственно источников питания. Уровни помех (они предусмотрены в дБмкА) определяются измерением тока на каждом проводе, в том числе и в общем проводе. Требования, устанавливаемые этой категорией, имеют различия, основанные на характере использования оборудования и его специфике. Конкретные ограничения обусловлены областью применения оборудования, входным напряжением, частотой, мощностью и силой тока.

Категория CE102.

Кондуктивные помехи, радиочастотные потенциалы, провода подключения питания

Категория CE102 устанавливает ограничения по уровню кондуктивных помех в полосе частот 30 кГц – 10 МГц для проводов, по которым оборудование получает мощность от источников питания, не являющихся частью испытываемого оборудования. Эти требования не устанавливают нормы на выходных клеммах источников питания. Оценка помех в низкочастотной области направлена на обеспечение того, чтобы ИО не искажало качество питания, для чего регламентируются допустимые уровни искажения напряжения на шинах питания всего комплекта оборудования. Искажение напряжения служит основой для оценки качества электроэнергии, поэтому пределы, указанные в категории CE102, соответствуют именно уровням напряжения и установлены в дБмкВ. Уровни напряжения кондуктивных помех определяются их измерением на выходе эквивалента сети LISN (*англ.* LISN — Line Impedance Stabilization Network, схема стабилизации полного импеданса линии или эквивалент полного сопротивления сети, ЭПСС, подробно [2]). В отличие от предельных значений по току, описанных в категории CE101, пределы CE102, как уже было сказано, базируются на напряжении. Основной предел по максимальному уровню помех установлен в соответствии с номинальным напряжением питания и не зависит от силы тока. Несоблюдение ограничений, налагаемых категорией CE102, касается импульсных стабилизаторов напряжения и генерируемых ими гармоник.

Категория CE106.

Кондуктивные помехи, антенные порты

Категория CE106 устанавливает ограничения по уровню кондуктивных помех в полосе частот 10 кГц – 40 ГГц (зависит от рабочей частоты оборудования) и содержит требования по уровням помех для антенных входов/выходов передатчиков, приемников и усилителей. Цель проверки — подтверждение устойчивости приемников, размещаемых как в составе, так и вне тестируемого оборудования, от возможного нарушения их функционирования в результате излучения от антенны ИО. Требования категории CE106 не распространяются на стационарные установленные антенны.

Категория CS101.

Кондуктивная восприимчивость, провода подключения питания

Категория CS101 устанавливает уровни восприимчивости к кондуктивным помехам входных проводов подачи питания в диапазоне частот 30 Гц – 150 кГц для оборудования, работающего от напряжения переменного и постоянного тока. В общем случае эта категория применяется для оборудования с потреблением менее 30 А на фазу, но также предназначена и для систем с питанием от сети переменного тока с потреблением более 30 А на фазу, но лишь тогда, когда такая система имеет рабочую частоту, не превышающую 150 кГц, и чувствительность не хуже 1 мкВ (например, 0,5 мкВ). Если ИО работает на постоянном токе, данное требование применимо в диапазоне частот 30 Гц – 150 кГц. Если же ИО работает на переменном токе, это требование применимо начиная со второй гармоники рабочей частоты ИО (для частоты 50 Гц – 100 Гц, для 60 Гц соответственно 120 Гц) и до 150 кГц. Цель испытаний — гарантировать, что технические характеристики ИО не ухудшаются от наличия помех в указанном диапазоне частот на данной форме выходного напряжения источника питания.

Категории CS103, CS104 и CS105.

Кондуктивная восприимчивость, антенные порты, интермодуляция, подавление паразитных (нежелательных) сигналов, перекрестная модуляция

Эта серия испытаний для первичных приемников включает методы тестирования для проверки входа приемника на чувствительность к интермодуляции (CS103), подавлению паразитных (нежелательных) сигналов (CS104) и перекрестной модуляции (CS105). Первоначально такие типы испытаний не были разработаны для традиционных перестраиваемых радиоприемников супергетеродинного типа. В текущей версии рассматриваемого стандарта нормативы по вос-

приимчивости предусмотрены для такого оборудования и подсистем, как приемники связи, радиочастотные усилители, передатчики, радиолокационные приемники, акустические приемники и приемники радиоэлектронной борьбы (РЭБ). Здесь необходимо указать требования, которые согласуются с характеристиками обработки сигнала для подсистемы и конкретными процедурами тестирования, предназначенными для проверки соответствующего регламента.

Процедура тестирования ИО по выполнению требований CS103 используется для определения наличия продуктов интермодуляции, которые могут быть вызваны нежелательными сигналами на входных портах антенны ИО. Испытания проводятся в диапазоне частот 15 кГц – 10 ГГц, причем на выходе ИО при соблюдении предельных требований, предусмотренных в отдельной спецификации на поставку оборудования, не должны фиксироваться уровни от продуктов интермодуляции, выходящие за пределы заданных допусков.

Процедура тестирования ИО по выполнению требований CS104 применяется для оценки подавления паразитных (нежелательных) сигналов на входных портах антенны ИО. Испытания проводятся в диапазоне частот 30 Гц – 20 ГГц. В отличие от требований CS103 для аппаратуры морских кораблей и подводных лодок этот норматив относится ко всем типам приемников. Указанные частоты являются функцией внешнего интерфейса оцениваемого устройства, при этом на выходе ИО при соблюдении предельных требований, предусмотренных в отдельной спецификации на поставку оборудования, не должны фиксироваться уровни от продуктов интермодуляции, выходящие за пределы заданных допусков.

Что касается восприимчивости к перекрестной модуляции, определенной требованием CS105, здесь испытания проводят, как и для категории CS104, в диапазоне частот 30 Гц – 20 ГГц, но только для приемников, работающих с амплитудной модуляцией, что должно быть указано в спецификации на поставку оборудования. Проверка, как и для требований CS103 и CS104, осуществляется подачей соответствующих сигналов на антенный порт (с контролем их уровня на входе) и оценкой продуктов перекрестной модуляции на выходе ИО.

Категория CS109.

Кондуктивная восприимчивость, наведенные токи

Требования CS109 — это узкоспециализированный тест для оценки устойчивости оборудования к наведенным токам в полосе частот помехи 60 Гц – 100 кГц. Испытания по CS109 выполняются для очень чувствительного корабельного

оборудования военно-морского флота, с чувствительностью не хуже 1 мкВ (например, 0,5 мкВ), в случае, когда приемники работают в частотном диапазоне данного теста. Носимое оборудование освобождено от выполнения требований CS109. Цель испытаний — гарантировать, что оборудование не реагирует на магнитные поля, вызванные токами, протекающими в структуре платформы (носителя), на которой установлено оборудование. Предельные уровни чувствительности (в дБмкА) были выявлены как следствие эксплуатационных проблем из-за токов, наводимых на шкафах (корпусах) оборудования, и детерминированы в ходе лабораторных измерений характеристик отклика на данное воздействие выбранных типов приемников. Испытания проводят внесением паразитных сигналов непосредственно на корпус ИО.

Категория CS114.

Кондуктивная восприимчивость, влияние помех, наведенных на кабелях

Требования по CS114 предназначены для проверки способности тестируемого устройства выдерживать заданные уровни радиочастотных сигналов в полосе частот 10 кГц – 200 МГц, наведенных на кабелях. Используются для всех электрических кабелей, подключенных к корпусам ИО.

Категория CS115.

Кондуктивная восприимчивость, влияние помех, наведенных на кабелях, импульсные помехи

Требования по CS115 используются для проверки восприимчивости по электрическим кабелям, подключенным к корпусам ИО. Основная задача заключается в оценке защиты оборудования от быстрых переходных процессов, особенно с крутыми фронтами (передним и задним), которые могут возникнуть во время переключения оборудования или в результате внешних воздействий, таких как молния и электромагнитный импульс. Параметры импульса установлены в А/с, частота повторения 30 Гц, минимальная длительность воздействующего импульса 30 нс.

Категория CS116.

Кондуктивная восприимчивость, затухающие колебательные помехи, кабели и провода подключения питания

Требования по CS116 применимы для проверки восприимчивости по всем электрическим кабелям, подключенным к корпусам ИО, а также на каждом проводе подключения питания. Концепция заключается в моделировании электрических сигналов тока и напряжения, возникающих на корпусах от возбуждения естественных резонансов с помощью управляемого затухающего сигнала синусоидальной формы, приведенного на рис. 1.

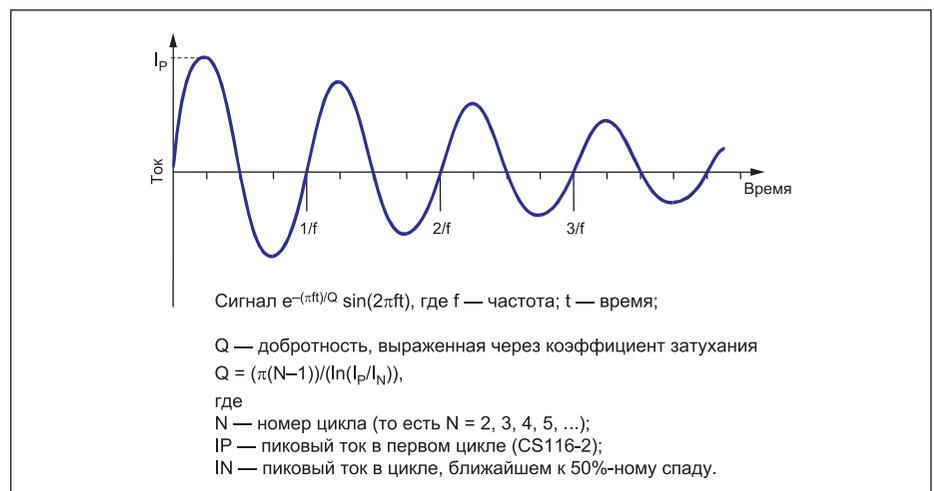


Рис. 1. Нормализованный испытательный сигнал для проверки требований по CS116

Категория CS117.

Кондуктивная восприимчивость, переходные процессы, инициированные ударом молнии, кабели и провода подключения питания

CS117 является одним из двух новых методов испытаний, добавленных в MIL-STD-461G. Требования по CS117 используются для проверки восприимчивости по всем электрическим кабелям, подключенным к корпусам ИО, а также на каждом проводе подключения питания и распространяются на судовое оборудование, расположенное над палубой или содержащее соединительные кабели, проходящие над палубой. Концепция заключается в устранении косвенных последствий от удара молнии на уровне оборудования, как указано в стандарте MIL-STD-464, и не предназначена для устранения прямых эффектов от удара молнии или близких ударов молнии. Тестирования проводят различными нормализованными испытательными сигналами, в том числе и сложной формы.

Категория CS118.

Кондуктивная восприимчивость, электростатические разряды от персонала

Требования по CS118 предусматривают проверку устойчивости оборудования к электростатическим разрядам. Тестированию подлежат электрические, электронные и электромеханические подсистемы и оборудование, имеющее контакт с персоналом. Следует отметить, что нормы CS118 не применимы к таким предметам, как боеприпасы. Концепция заключается в моделировании электростатического разряда, вызванного контактом с человеком, а контрольные точки выбирают на основе наиболее вероятных мест такого контакта. На поверхностях для испытаний определяется несколько точек, которые при нормальной эксплуатации легкодоступны операторам оборудования. Типичные контрольные точки — это области кнопочной клавиатуры, переключатели, регуляторы, индикаторы

и оболочки разъемов, расположенные на каждой поверхности ИО. Стандарт предусматривает четыре уровня устойчивости.

Категория RE101.

Электромагнитная эмиссия, магнитные поля

Критерий RE101 применяется для идентификации излучения в диапазоне 30 Гц – 100 кГц от оборудования и корпусов подсистем, в том числе подключаемых электрических кабелей. RE101 является специальным требованием, предназначенным для оценки и управления магнитными полями для приложений, в которых такое оборудование устанавливается, потенциально чувствительных к магнитным полям низкой частоты.

Категория RE102.

Электромагнитная эмиссия, электрические поля

Критерий RE102 применяется для идентификации излучения в диапазоне частот 10 кГц – 18 ГГц и излучаемых помех от ИО и связанных с ним кабелей. Оценивается защита чувствительных приемников от радиопомех, поступающих через антенны.

Категория RE103.

Электромагнитная эмиссия, гармонические и побочные сигналы антенн

Критерий RE103 может применяться в качестве альтернативы для CE106 при тестировании передатчиков с их предполагаемыми антеннами. Это требование считается выполненным, если уровни излучения не превышают допустимый предел в режиме передачи, установленный по критерию RE102. Однако предпочтительным является критерий CE106, который следует использовать всегда, когда это возможно. Однако для систем, использующих активную антенну, или когда антенна установлена стационарно и не снимается, или мощность передачи слишком вы-

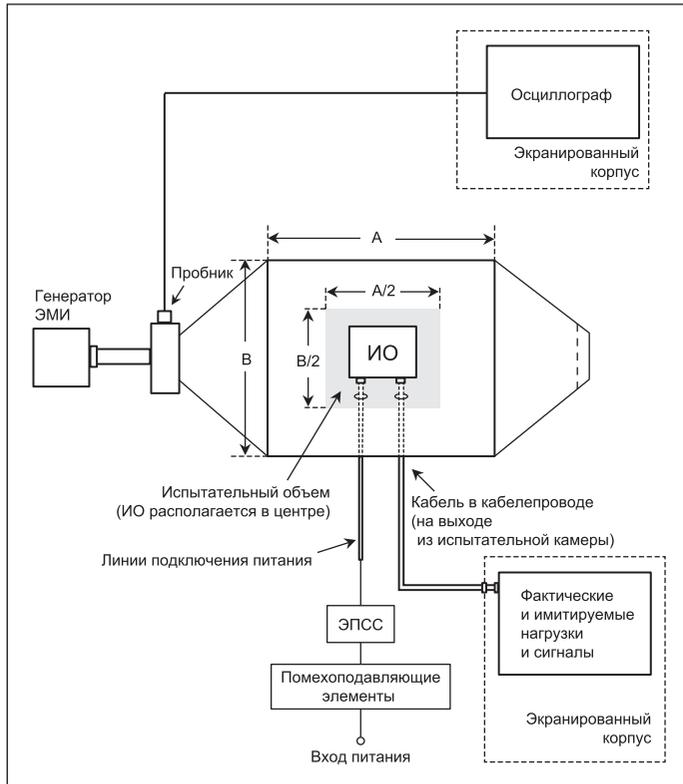


Рис. 2. Типичная испытательная установка для проверки оборудования на воздействие электромагнитного импульса с использованием плоскопараллельной излучающей системы (вид сверху)

сока, необходимо обратиться к критерию RE103. Испытания по RE103 применимы и по существу идентичны CE106 для передатчиков в режиме передачи в заданных диапазонах частот и пределах мощностей. Частотный диапазон данного типа испытаний основан на рабочей частоте ИО.

Категория RS101.

Электромагнитная восприимчивость, магнитные поля

Требования по RS101 — узкоспециализированные испытания. Они определяют восприимчивость наземного оборудования армии и флота, предназначенного для разминирования или обнаружения мин, к магнитным полям в полосе частот 30 Гц – 100 кГц. Кроме того, данные нормы применяются для оборудования кораблей и подводных лодок ВМФ с рабочей частотой 100 кГц или менее и чувствительностью не хуже 1 мкВ (например, 0,5 мкВ), для военно-морского авиационного оборудования, установленного на самолетах с использованием воздушного охлаждения, и внешнего оборудования на самолетах, которые могут запускаться электромагнитными пусковыми системами. Это требование не применимо для оборудования радиосвязи с работой через антенны. Проверка по критерию RS101 должна подтвердить, что характеристики оборудования, подверженного воздействию низкочастотных магнитных полей, не ухудшаются в процессе эксплуатации.

Категория RS103.

Электромагнитная восприимчивость, электрические поля

Требования по RS103 устанавливаются в диапазоне частот 2 МГц – 18 ГГц, но верхняя частота может достигать 40 ГГц, если это определено закупочной организацией. Условия в рамках RS103 предусмотрены как для корпусов ИО, так и для связанных с ними кабелей. Основная задача заключается в обеспечении того, чтобы оборудование работало без ухудшения своих характеристик при наличии электромагнитных полей, создаваемых передающими антеннами, расположенными как на борту, так и снаружи. Пределы зависят от кон-

кретной области применения и основаны на уровнях, которые, как ожидается, будут встречаться в течение срока службы оборудования. Следует отметить, что требования в рамках RS103 необязательно будут наилучшими из возможных относительно той окружающей среды, в которой данное оборудование может использоваться.

Категория RS105.

Электромагнитная восприимчивость, переходные процессы электромагнитных полей

Требования RS105 призваны продемонстрировать способность тестируемого устройства выдерживать воздействие электромагнитных импульсов (ЭМИ) с большой крутизной фронта (нарастания), другими словами, ЭМИ, возбуждающие переходный процесс в виде электромагнитной волны в свободном пространстве. Испытания по RS105 применяются для оборудования в корпусах, располагаемого вне носителя, на котором размещено оборудование, подвергаемое воздействию ЭМИ, или для внутреннего оборудования в случае плохо экранированных или неэкранированных носителей. Однако кабели такого оборудования во время испытаний должны быть защищены и помещены в экранированный кабелепровод. В отличие от испытаний, описанных выше, проверка на воздействие ЭМИ не имеет близкого коммерческого аналога, но устойчивость к подобным воздействиям критична для оборудования военного и аэрокосмического назначения. Обобщенная блок-схема установки для проведения испытаний на воздействие электромагнитного импульса показана на рис. 2, а форма возбуждающего воздействующего импульса — на рис. 3 [6].

Не все тесты необходимы для каждого типа устройства или предполагаемой среды использования. Для того чтобы разделить устройства по типам и областям эксплуатации, в стандарте MIL-STD-461G имеется таблица, представленная в виде матрицы (TABLE V. Requirement matrix). Таблица 2 показывает, как применяются требования стандарта на основе предполагаемого использования устройства.

Для получения более подробной информации можно обратиться к [5, 9, 10] или непосредственно к стандарту MIL-STD-461G [6]. Кроме того, в руководствах [4 и 5] представлены перечни стандартов, применяемых к различным типам военного оборудования, а также список литературы по данной проблематике.

Что касается аэрокосмического оборудования, популярным и распространенным нормативным документом в части ЭМС, требуемым FAA (Federal Aviation Administration, Федеральное управление гражданской авиации — центральный орган государственного управления США в области гражданской авиации) для коммерческих самолетов, являются квалификационные требования DO-160 “Environmental Conditions and Test Procedures for Airborne Equipment” [11]. Они были разработаны RTCA (Radio Technical Commission for Aeronautics, Радиотехническая комиссия по аэронавтике) на граж-

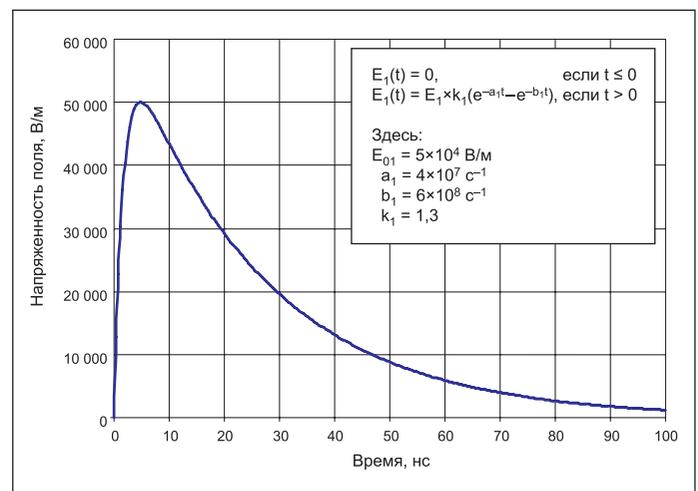


Рис. 3. Испытательный импульс при проверке на воздействие ЭМИ

данские самолеты и регламентируют условия окружающей среды и процедуры испытаний для бортового оборудования. В настоящее время действует версия DO-160G в редакции 8 декабря 2010 года с изменением 1 от 16 декабря 2015 года. В РФ используется аналогичный документ KT-160D (QR-160D) в редакции от 8 декабря 2004 года [12], введенный в действие с 1 октября 2005 года. Он входит в перечень Авиационного регистра МАК «Сертификация авиационной техники и ее производств». Решая комплексную задачу обеспечения летной годности гражданской авиационной техники, МАК создал эту нормативную базу сертификации, состоящую из Авиационных правил (АП), гармонизированных с аналогичными правилами США (FAR) и Объединенной Европы (JAR/CS).

Исходя из сказанного, основными в данном направлении являются требования DO-160G. Так что производители, выпускающие продукты для этого рынка, должны использовать действующую на текущий момент официальную копию требований и полностью понимать содержание данного документа (KT-160D содержит 327 страниц), а испытательная лаборатория для поверки их продукции должна быть надлежащим образом аккредитована.

Требования DO-160 охватывают гораздо больший круг вопросов, чем проблемы, касающиеся нормативов по ЭМС, которым посвящена настоящая статья. Тем не менее регламенты по ЭМС включают в себя кондуктивные помехи в цепях питания и восприимчивость оборудования к таким помехам, восприимчивость к переходным процессам, провалам и перерывам в подаче питающего напряжения. Устанавливаются испытания, позволяющие определить, сможет ли оборудование противостоять воздействию пиков напряжения, поступающих на оборудование и на его цепи подачи питания, причем для систем с питанием как от напряжения переменного, так и постоянного тока. Устанавливается восприимчивость к электромагнитным помехам звуковой частоты по цепям питания, что позволяет определить, будет ли оборудование адекватно реагировать на помехи с частотными составляющими, которые обычно имеют место для систем летательных аппаратов. Оценивается восприимчивость оборудования и всей конфигурации его подключения к помехам индукции, воздействующим через провода линий связи и корпус оборудования, что связано с особенностями среды установки оборудования. Кроме того, оценивается радиочастотная восприимчивость (радиоизлучение и проводимость), восприимчивость к удару молнии и чувствительность к электростатическому разряду.

Тестирование авионики требует сложных решений, поскольку габариты конечных изделий могут быть весьма внушительными (рис. 4).

Таблица 2. MIL-STD-461G. Матрица соответствия требованиям

Оборудование и подсистемы, установленные в, на или запускаемые от следующих носителей оборудования или мест установки	Применимость требования к оборудованию																		
	CE101	CE102	CE106	CS101	CS103	CS104	CS105	CS109	CS114	CS115	CS116	CS117	CS118	RE101	RE102	RE103	RS101	RS103	RS105
Надводные корабли	A	A	L	A	S	L	S	L	A	S	A	L	S	A	A	L	L	A	L
Субмарины	A	A	L	A	S	L	S	L	A	S	L	S	S	A	A	L	L	A	L
Самолеты, наземные войска, включая аэродромы	A	A	L	A	S	S	S		A	A	A	L	A	A	A	L	A	A	L
Самолеты, ВМФ	L	A	L	A	S	S	S		A	A	A	L	A	L	A	L	L	A	L
Самолеты, ВВС		A	L	A	S	S	S		A	A	A	L	A		A	L			A
Космические системы, включая ракеты-носители		A	L	A	S	S	S		A	A	A	L			A	L			A
Наземное оборудование, наземные войска		A	L	A	S	S	S		A	A	A	S	A		A	L	L	A	L
Наземное оборудование, ВМФ		A	L	A	S	S	S		A	A	A	S	A		A	L	L	A	L
Наземное оборудование, ВВС		A	L	A	S	S	S		A	A	A		A		A	L			A

Примечание.

A: Применимо.

L: Ограничено, как указано в отдельных разделах настоящего стандарта.

S: Требования должны указываться в закупочной документации.

Хотя в начале статьи было сказано, что методики испытания и базовые схемы подключения испытательного оборудования для проверки требований в части ЭМС коммерческого и военного оборудования схожи, тем не менее существуют различия, которые необходимо учитывать. Выше уже были представлены некоторые отличия в части испытательных импульсов и схемы испытаний (рис. 2–4), далее также приведен ряд важных моментов, требующих внимания.

Если для испытаний по выполнению требований по ЭМС коммерческого оборудования общепринятым является применение эквивалента сети (ЭПСС, LISN) индуктивностью 50 мкГн, то для испытаний по CE101 и CE102 существуют особые случаи, в которых необходим эквивалент сети с индуктивностью 5 мкГн. Как уже говорилось, уровни для испытаний по нормам CE101 приведены в дБмКА. Здесь ЭПСС используются только для стабилизации линейного импеданса, а сами измерения выполняются с помощью датчиков токов. В то же время уровни по CE102 установлены в дБмкВ, измерения проводятся так же, как и для коммерческих продуктов, с приемником, подключенным к выходному порту ЭПСС, а другой выходной порт или порты нагружаются эквивалентом 50 Ом. Следует отметить, что MIL-STD-461G предусматривает на выходе ЭПСС аттенуатор на 20 дБ, защищающий измерительное оборудование от переходных процессов. Это не является обязательным условием в стандартах для коммерческого оборудования, но его имеет смысл учитывать при лабораторных испытаниях коммерческих продуктов.

Военные стандарты, описывающие регламенты и методики испытаний на соответствие ЭМС, такие как MIL-STD-461G, для тестирования на уровни собственного излучения предполагают использование различных антенн. В отличие от них стандарты на коммерческое оборудование, например CISPR 32 и ANSI C63.4, требуют наличия лишь антенн с линейной поляризацией (вертикальной

и горизонтальной) и не настаивают на испытаниях на переменное магнитное поле.

В MIL-STD-461G, в отличие от коммерческих стандартов, для выполнения требования RE101 указан датчик в виде катушки диаметром 13,3 см, содержащий 36 витков провода. Также должен присутствовать приемник, способный проводить измерения в диапазоне частот 30 Гц – 100 кГц.

В том же стандарте требование RE102 устанавливает оценку излучения в полосе частот от 10 кГц. Для этого в диапазоне 10 кГц – 30 МГц применяется штыревая антенна длиной 104 см (41"). Этот диапазон частот вообще не рассматривается в CISPR 32 или Правилах FCC для излучения. Таким образом, требования к антенне и приемнику здесь иные. В полосе 30–200 МГц используется биконическая антенна, широко распространенная и при испытаниях коммерческих продуктов. В полосе частот 200 МГц – 1 ГГц согласно стандарту MIL-STD-461G предусмотрен двойной гребенчатый рупор. Это совершенно иная антенна, чем те, что предназначены для тестирования коммерческих продуктов, — настраиваемые дипольные антенны или логопериодическая антенная решетка симметричных вибраторов.

Для испытаний на уровни электромагнитных излучений различаются и схемы тестов. При этом нужны не только различные схемы подключения, но и само оборудование. Так, для стандарта MIL-STD-461G не понадобится настраиваемая по высоте установка антенны или специальная мачта, способная перемещать антенну.

Что касается устойчивости или, как это определяет MIL-STD-461G, восприимчивости к электромагнитному излучению, в рамках испытаний по категории RS103 могут быть необходимы значительно более высокие напряженности электромагнитных полей. Если стандарт CISPR 35 определяет напряженность 3 В/м в полосе частот 80 МГц – 1 ГГц и на нескольких дискретных частотах до 5 ГГц (с возможностью тестирования нескольких

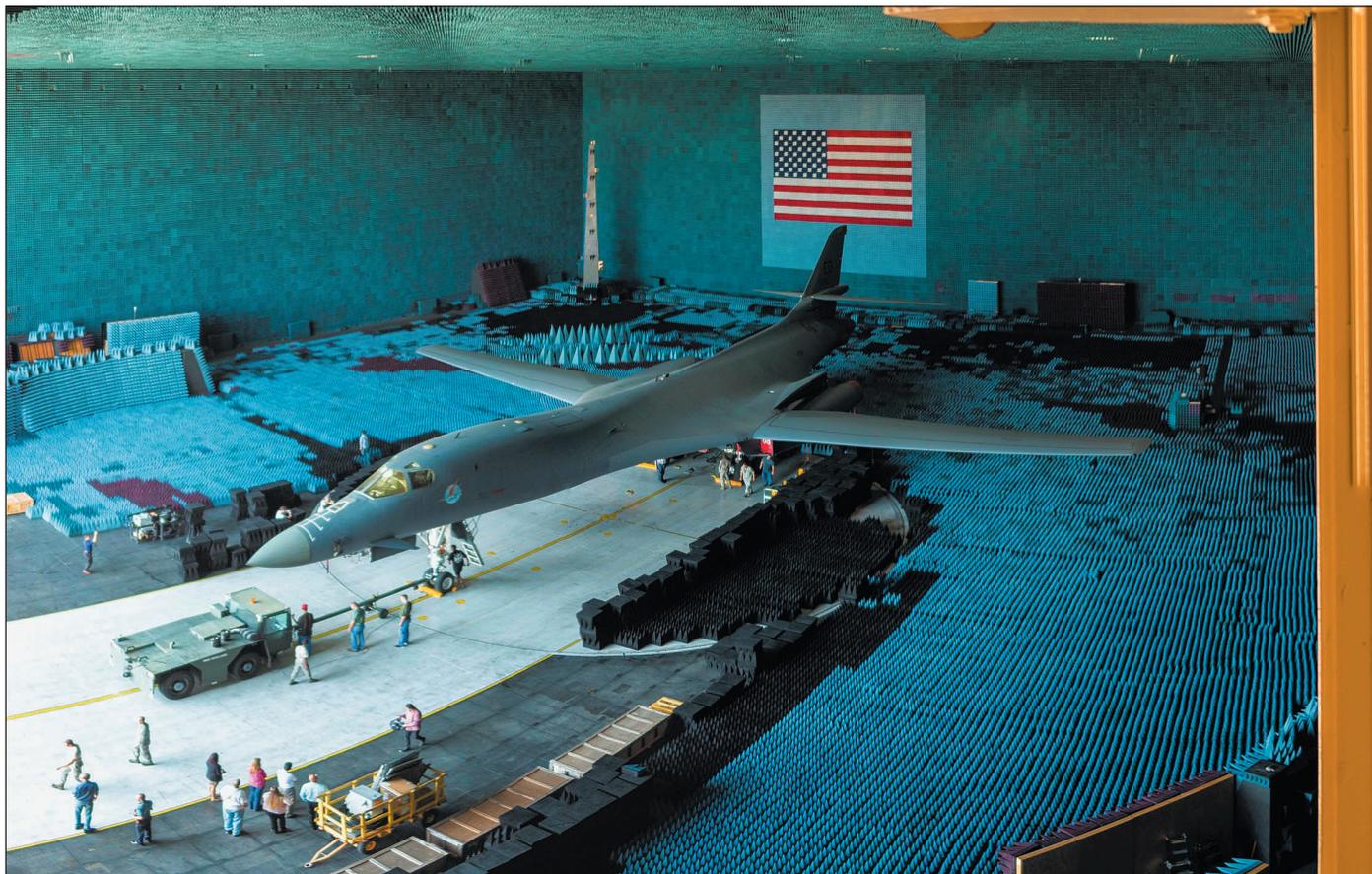


Рис. 4. Тестирование бомбардировщика B1-B Лансер на уровень ЭМП в крупнейшей в мире полностью безэховой камере, имитирующей условия свободного пространства [13]

дискретных частот при уровнях напряженности до 30 В/м), то для определенного оборудования в рамках стандарта MIL-STD-461G следует проводить тестирования на уровнях 20–200 В/м в диапазоне частот 2 МГц – 40 ГГц. Здесь также должно присутствовать дополнительное тестовое оборудование (генераторы сигналов, усилители, антенны и т.д.), не обязательное для испытаний коммерческих продуктов.

Каждый тест в рамках стандарта MIL-STD-461G требует особого испытательного оборудования, часть которого может использоваться и для тестирования коммерческих продуктов. Кроме указанной цели исключить влияние систем и оборудования военного и аэрокосмического назначения друг на друга, подобные испытания решают еще одну, косвенную задачу — уменьшение вероятности обнаружения военной техники по остаточному электромагнитному излучению, например РЛС типа «Кольчуга». Эта уникальная в своем роде пассивная РЛС была разработана и серийно выпускалась в Украине донецким заводом «Топаз», ныне ее производство восстанавливается на НПК «Искра» в Запорожье. При организации испытаний на соответствие MIL-STD-461G важно не только его точное понимание. Необходимо убедиться и в том, что оборудование вашей лаборатории или той, которой вы доверили проверку своих изделий, пригодно для ее проведения. Это совсем не лишний шаг, необходимо быть полностью уверенным, что испытания будут выполнены тщательно, должным образом, а их результат позволит принять правильные решения.

В настоящей публикации и в [2] были рассмотрены требования и особенности испытаний продуктов коммерческого, военного и частично аэрокосмического назначения относительно их соответствия по электромагнитной совместимости. Такие испытания — сложный и ответственный процесс, который не может быть пущен на самотек. Как же подготовить оборудование и самого себя к столь непростому процессу? Этому будет посвящена следующая часть анонсированного в [1] цикла статей по выполнению требований ЭМС. ■

Литература

1. Рентюк В. Электромагнитная совместимость: проблема, от решения которой не уйти // Ком-поненты и технологии. 2017. № 7.
2. Рентюк В. Что нужно знать об испытаниях на выполнение требований по ЭМС для изделий коммерческого назначения // Компоненты и технологии. 2017. № 7.
3. Pettit G. Summary of Military and Aerospace EMC Tests. Pettit EMC Consulting, 2017.
4. 2017 EMC Testing Guide. Interference Technology Guide Series. 2017 ITEM Media. www.learn.interferencetechnology.com/2017-emc-testing-guide/
5. 2016 Military EMC Guide. Interference Technology. www.interferencetechnology.com/wp-content/uploads/2016/10/2016-IT-Military-EMC-Guide.pdf
6. MIL-STD-461G Requirements for the Control of Electromagnetic Interference Characteristics of Subsystems and Equipment, Revision G. Defense Acquisition System. 11 December. 2015.
7. MIL-STD-464C Interface Standards Electromagnetic Environmental Effects, Requirements for Systems, Revision G. Defense Acquisition System. 1 December. 2010.
8. Смирнов А., Басалаев К. Тест на совместимость // Эксперт+. 2015. № 1.
9. Javor K. MIL-STD-461G: The Compleat Review // Interference Technology. April 2016.
10. Javor K. Why Is There AIR (in MIL-STD-461G)? // Interference Technology, April 2016.
11. RTCA/DO-160G. RTCA. December 2010. www.my.rtca.org/nc_store?search=DO-160G
12. КТ-160D/14D. Условия эксплуатации и окружающей среды для бортового авиационного оборудования (Внешние воздействующие факторы). Требования, нормы и методы испытаний. 08.12.2004.
13. www.en.wikipedia.org/wiki/Benefield_Anechoic_Facility

Что такое риски и анализ рисков применительно к ЭМС

Стив ХЕЙС (Steve HAYES)
Steve.Hayes@element.com

Перевод, дополнения и комментарии:
Владимир РЕНТЮК

Изменения, внесенные в Европейскую Директиву по ЭМС в 2016 г., были вызваны необходимостью согласовать формулировки и терминологию, чтобы обеспечить ее соответствие ряду других директив Европейского союза. Это касалось присвоения знака CE, так называемого CE Marking, и введения стандартного текста и отдельных разделов, изложенных в Новой законодательной базе (New Legislative Framework, NLF). Предлагаемая статья — пятая и последняя из серии публикаций на тему электромагнитных помех (ЭМП) и электромагнитной совместимости (ЭМС), анонсированных в [2]. Оригинальная статья [3], опубликованная в [4], здесь представлена с комментариями и дополнениями переводчика. Перевод выполнен с разрешения ITEM Media. Предлагаемая статья предназначена в первую очередь тем, кого интересует выход на европейский рынок.

Европейская Директива по электромагнитной совместимости (ЭМС) 2014/30/EU [1] была обновлена в 2014 году, заменив Директиву 2008/108/EC, и вступила в силу с апреля 2016 года. Сегодня этот документ распространяется на любой новый продукт, поступающий в ЕС с указанной даты.

Новая законодательная база, или NLF, представляет собой комплекс мер, направленных на ужесточение надзора за рынком и повышение качества оценки соответствия продукции требованиям стандартов, другими словами — ужесточение требований к присвоению маркировки CE. Одной из причин усиления требований и самой процедуры присвоения маркировки является злоупотребление имевшимися лазейками в европейском законодательстве. В качестве примера процитирую заявления Центрального офиса нотифицированного органа Европейского союза, SIA “International Center for Quality Certification — ICQC”: «В последнее время мы сталкиваемся с ЕС Сертификатами соответствия (EC Certificate of Conformity, EC Certificate of Compliance) на продукцию производства России и Украины, выданными нотифицированными институтами из Турции. В Турции отсутствуют нотифицированные органы по сертификации продукции для ЕС согласно требованиям Директивы по электромагнитной совместимости 2004/108/EC (Directive 2004/108/EC Electromagnetic compatibility — EMC), что ставит под сомнение признание данных ЕС Сертификатов соответствия на территории стран — членов Европейского союза» [5].

И как следствие: «ЕС Сертификат соответствия на продукцию, попадающую под действие Директивы 2004/108/EC, с правом нанесения маркировки CE, могут выдавать исключительно нотифицированные органы ЕС, имеющие нотификацию по Директиве 2004/108/EC».

Не будем обсуждать, чего тут больше — заботы о безопасности или о защите своего рынка, как это было сделано при введении Директивы RoHS и последовавших за ней аналогичных директив других стран [7]. Утешим себя тем, что, как говорят французы, закон есть закон, и мы должны строго следовать его букве. Необходимо помнить, что именно производитель несет юридическую ответственность за обеспечение соблюдения основных требований безопасности выпускаемой продукции с правом нанесения знака CE. Изготовители, экспортирующие продукцию в страны Европейского союза, подпадающую под обязательную процедуру маркирования, обязаны учитывать свою юридическую ответственность. Кроме того, новое законодательство регламентирует даже продукцию, поступающую в рамках интернет-торговли.

NLF уточняет и усиливает применение законодательства, действующего на внутреннем рынке ЕС (EU Internal Market), для чего принимаются следующие шаги:

- совершенствуются правила надзора за рынком для лучшей защиты потребителей и профессионалов от опасных продуктов, включая импортируемые извне;
- устанавливаются четкие и прозрачные правила аккредитации органов оценки соответствия;
- повышаются качество и достоверность оценки соответствия путем установления четких и понятных требований к нотификации органов оценки;
- разъясняется применение CE-маркировки;
- уточняется терминология, используемая в законодательстве по оценке соответствия;
- обеспечивается четкое и более согласованное между различными секторами рынка законодательство, регулирующее требования к продуктам;
- уточняются обязательства всех операторов рынка по всей цепочке поставок;
- создаются такие условия, чтобы продукты были более прослеживаемыми;
- обеспечивается, чтобы органы, проводящие оценки соответствия, были независимыми и имели не только определенные права и возможности, а и определенные оперативные обязательства;
- обеспечивается, чтобы каждое государство — член ЕС обладало надежными, но соразмерными механизмами надзора за рынком и правом применения требований на основе набора общих требований на уровне ЕС.

Новая законодательная база — New Legislative Framework состоит из следующих документов:

- Регламент 765/2008 — устанавливает правила организации и проведения аккредитации органов по оценке соответствия; создает основу для надзора за рынком и контроля продукции, поступающей извне ЕС; определяет общие принципы маркировки продукции знаком CE.
- Решение 768/2008 — устанавливает общие правила реализации продукции на рынке ЕС; определяет обязанности субъектов экономической деятельности; определяет требования к нотифицирующим и нотифицируемым органам; описывает модули оценки соответствия.
- Регламент 764/2008 — устанавливает процедуры по применению национального технического законодательства.



Рисунок. Оценка рисков и управление ими

В ходе указанных изменений во все директивы, включая Директиву по ЭМС, было введено такое понятие, как «риск».

Однако само понятие «риск» в пределах этого документа имеет несколько значений. Во-первых, в самом начале это риски, связанные с продуктом, за которые отвечает производитель. А во-вторых и в-третьих, есть продукты, несущие в себе риск, и за них несут ответственность органы по контролю за рынком; кроме того, есть еще действия, требуемые от субъектов в цепочке поставок продуктов, где были выявлены риски.

Что означает риск в контексте ЭМС?

В Директиве об электромагнитной совместимости (ЭМС 2014/30/EU, далее — Директива ЭМС) установлено, что производители «... должны выполнять адекватный анализ и оценку риска(ов)». Однако сама Директива ЭМС касается лишь функциональности и не содержит какой-либо оценки уровня безопасности, включая электромагнитную безопасность, которая описана другими Директивами СЕ, такими как Директива о низковольтном оборудовании (LVD) 2014/35/EU, Директива о безопасности машин и оборудования, Директива о медицинских устройствах и т. д. Итак, какие виды интересующих нас в рамках настоящей статьи рисков оцениваются?

Для ответа на этот вопрос, во-первых, важно понять, что такое анализ и оценка риска.

Анализ рисков — процедуры выявления факторов рисков и оценки их значимости, по сути, анализ вероятности того, что произойдут определенные нежелательные события и отрицательно повлияют на достижение целей проекта. Анализ рисков включает оценку рисков и методы снижения рисков или уменьшения связанных с ними неблагоприятных последствий.

В нашем случае, связанном с электромагнетизмом, анализ рисков — это процесс выявления всех потенциальных опасностей, имеющих отношение как непосредственно к продукту, так и к его влиянию на окружающую среду, в которой он будет использоваться.

Оценка рисков — определение количественным или качественным способом величины (степени) рисков.

Если в результате проведенного анализа и оценки остаточный риск будет высок, необходимо принять дополнительные меры для его снижения до более приемлемого уровня. Этот последний этап, с учетом информации из других источников (например, статей в таких из-

даниях, как Interference Technology) и отзывов от клиентов, целевых или фокус-групп, формирует уже стратегию управления рисками, как это показано на рисунке.

Многие опасности, выявленные при оценке риска, будут учитываться в рамках применимого гармонизированного, или, как его еще называют, согласованного, стандарта (*англ.* harmonised standard) — другими словами, это общий стандарт на определенную группу продуктов. Однако следует отметить, что не все опасности и, следовательно, риски могут быть выявлены и идентифицированы таким путем.

Гармонизированный стандарт обеспечивает «презумпцию соответствия» Директиве для областей, которые охватывает стандарт, но не может использоваться для того, чтобы лишь на его основании можно было утверждать, что продукт соответствует требованиям Директивы ЭМС, то есть простым применением общего стандарта без дальнейшего анализа рисков.

В качестве хорошей иллюстрации приведем следующий пример. Испытательное оборудование с батарейным питанием, используемое для регистрации температур в нагревательной печи в технологическом процессе, может быть оценено в соответствии со стандартом на этот продукт, а именно EN/IEC 61326-1 “Electrical equipment for measurement, control and laboratory use — EMC requirements — Part 1: General requirements” (в РФ действует аналогичный стандарт ГОСТ Р МЭК 61326-1-2014 «Оборудование электрическое для измерения, управления и лабораторного применения. Требования электромагнитной совместимости. Часть 1. Общие требования»).

Данный стандарт предусматривает проведение испытания для оценки функциональности продукта в присутствии преднамеренных излучаемых радиочастотных полей от внешних передатчиков и устройств класса ISM (*англ.* Industrial, Science, and Medical, подразумевается излучение, выделенное для устройств промышленного, научного и медицинского назначения). Этот диапазон согласно стандарту EN/IEC 61000-4-3 учитывает проверку устойчивости к частотам выше 80 МГц (в РФ действует аналогичный стандарт ГОСТ 30804.4.30-2013 (IEC 61000-4-30:2008) «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Методы измерений показателей качества электрической энергии»). Кроме того, стандарт EN/IEC 61000-4-6 определяет требования и испытания для оценки устойчивости к излучению радиопередатчиков и устройств ISM ниже диапазона 80 МГц до 150 кГц (в РФ действует аналогичный стандарт

ГОСТ Р 51317.4.6-99 (МЭК 61000-4-6-96 «Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к кондуктивным помехам, наведенным радиочастотными электромагнитными полями. Требования и методы испытаний»).

Проблема заключается в том, что согласно EN/IEC 61000-4-6 оценка осуществляется только для кондуктивных помех, поскольку длины волн ниже частоты 80 МГц не позволяют обеспечить необходимую точность и повторяемость результатов и считается, что кондуктивные помехи здесь преобладают над излучением [6].

Означает ли это, что производитель может просто игнорировать такую проверку и считать, что его устройство устойчиво к частотам ниже 80 МГц? Строго говоря, нет. Идентификация риска должна учитывать тот факт, что частота 27 МГц достаточно часто используется для устройств категории ISM, например для обработки материала или в качестве основной частоты для устройств высокочастотного нагрева. Вам должно быть хорошо известно, что в этом случае будет создано значительное электромагнитное поле. Но для него у вас пока еще нет оценки, если испытания выполнялись только согласно упомянутому выше стандарту. Ответственный производитель идентифицирует эту опасность и примет все меры, чтобы уменьшить потенциальный риск. А для того чтобы и остаточный риск был низким, выполнит и дополнительные испытания помимо тех, что определены в гармонизированном стандарте общего назначения.

Вышеприведенный пример лишь один из многих аналогичных, но он ясно показывает, что применение унифицированного стандарта само по себе не подходит для демонстрации соответствия Директиве по электромагнитной совместимости и не является гарантией. Для того чтобы изделие отвечало всем требованиям, необходим более широкий подход, основанный не только на типе продукта, но и на области его применения.

Вот еще один пример. Планшетный ПК можно использовать не только в быту, но и в коммерческой деятельности, и даже в промышленности не с жесткими условиями окружающей среды. Если учесть, что изготовителю необходимо подумать обо всех вероятных средах эксплуатации его продукта и предвидеть непредусмотренное его применение, то подобную процедуру также следует считать частью анализа риска. Скажем, производитель может с высокой долей вероятности предположить, что данное изделие будет использоваться в вагоне поезда, в другом транспортном средстве или, например, гораздо ближе к сотовому телефону, чем указывает гармонизированный стандарт на продукт, а именно CISPR35/EN55035 (в РФ действует аналогичный стандарт ГОСТ CISPR 32-2015 «Электромагнитная совместимость оборудования мультимедиа. Требования к электромагнитной эмиссии»). Ведь в непосредственной близости от передатчиков большей мощности изделие подвергается воздействию более высоких уровней электромагнитного излучения, нежели пределы, установленные стандартом. Все эти ситуации должны быть предусмотрены в процедуре оценки риска.

В большинстве нормативных документов, описывающих уровни ЭМП, ограничения накладываются начиная со 150 кГц, соответственно, проверка и испытания изделий также проводятся именно с этой частоты. Однако в настоящее время растет количество помех, генерируемых ниже данной граничной частоты. Например, зарядные устройства для электрических транспортных средств, инверторы для фотоэлектрических установок (солнечных батарей) и другие устройства используют в своей основе импульсное преобразование энергии с килогерцевой частотой, они создают в этом низкочастотном диапазоне значительные выбросы электромагнитного излучения. Очень немногие стандарты по ЭМС требуют испытания устройств на частотах ниже 150 кГц из-за неизвестных уровней по ЭМС (это проблема, связанная со стандартами [6]), но, тем не менее, такие помехи, и весьма значительные, есть. Несмотря на отсутствие в стандартах тестов на иммунитет к ЭМП на таких частотах, подобные проверки и соответствующие испытания необходимы для снижения рисков.

Крайне важно, чтобы опасности электромагнитного излучения были рассмотрены как часть общей оценки риска продукта. Специалисты, занимающиеся вопросами обеспечения безопасности, хорошо знакомы с оценками соответствующих рисков, и, как правило, их знания основаны на данных, полученных от широкого круга профессионалов, имеющих разные точки зрения на эту проблему. К сожалению, знания в области электромагнитного излучения не относятся к такой категории. Обычно они явно недостаточны, и это означает, что риски безопасности в части ЭМС нередко упускаются из виду [8].

Перед проведением любых испытаний на ЭМС их следует рассматривать параллельно с аспектами защиты от электромагнитного излучения. И если для тестирования на ЭМС требуется, чтобы продукт работал в нормальном режиме, то для тестирования на безопасность, связанную с электромагнитным излучением, может понадобиться иной набор параметров, которые должны быть оценены в самых разных условиях. В частности, для продукта с электронным выключателем питания предусматривается состояние «включено», когда он должен быть в состоянии «выключено». Это потребует оценки режима ожидания.

Выводы

Производителям необходимо обеспечить, чтобы анализ и оценка риска, связанного с электромагнитным излучением, проводились в соответствии с Директивой по электромагнитной совместимости. Данная процедура должна быть документирована и включать обоснование, приводящее к оценке общего остаточного риска.

Содержащиеся в гармонизированных стандартах проверки обеспечивают «презумпцию соответствия» только для параметров, которые они охватывают, а производитель должен дополнить их своими, для общего управления рисками. Это необходимо, чтобы выявить и оценить другие вероятные опасности.

Оценка рисков не относится к чему-то второстепенному, что можно передать от производителя субподрядчику, поскольку за общий риск всегда отвечает изготовитель, как говорилось в самом начале этой статьи. Тем не менее понимание рисков, связанных с электромагнитным излучением, и способы их смягчения — это то, что допустимо отдать на аутсорсинг. И независимо от того, кто это делает, все в целом следует рассматривать как часть общей оценки риска еще на этапе разработки и внедрения продукта. Только так вы обеспечите его успешный выход на рынок. ■

Литература

1. Directive 2014/30/EU of the European Parliament and of the council of 26 February 2014 on the harmonisation of the laws of the Member States relating to electromagnetic compatibility. www.icqc.eu/userfiles/File/Directive_2014_30_EU.pdf
2. Рентюк В. Электромагнитная совместимость: проблема, от решения которой не уйти // Компоненты и технологии. 2017. № 7.
3. Hayes S. What is an EMC risk analysis? Aerospace PQT, Element Materials Technology. www.element.com/nucleus/2017/08/17/13/42/what-is-an-emc-risk-analysis
4. 2017 EMC Testing Guide. Interference Technology Guide Series. ITEM Media, 2017. www.learn.interferencetechnology.com/2017-emc-testing-guide/
5. Сертификация продукции в Европейском союзе. Электромагнитная совместимость технических средств. Директива 2014/30/EU (2004/108/EC). www.icqc.eu/ru/emc.php
6. Рентюк В. Что нужно знать об испытаниях на выполнение требований по ЭМС для изделий коммерческого назначения // Компоненты и технологии. 2017. № 7.
7. Рентюк В. RoHS-директива: защита экологии или рынков? // Технологии в электронной промышленности. 2013. № 5.
8. Уайт К. Устранение проблем, выявленных в ходе испытаний изделия на выполнение требования по ЭМС // Компоненты и технологии. 2017. № 10.

Синфазные дроссели для высокоскоростных интерфейсов: рекомендации по выбору

Владимир РЕНТЮК
Rvk.modul@gmail.com

Так сложилось, что в технической литературе, посвященной вопросам подавления электромагнитных помех (ЭМП) и связанной с ними проблеме электромагнитной совместимости (ЭМС), основное внимание уделяется цепям питания (например, в детальной публикации по данной теме [1]). Однако проблема гораздо глубже.

Согласно двум обширным публикациям [2, 3], проблема ЭМП и ЭМС, кроме цепей питания, затрагивает и линии связи, и линии передачи сигналов. Причем это касается как коммерческого оборудования [2], так и оборудования специального назначения [3]. В обоих случаях к излучению собственных ЭМП и устойчивости к разнообразным внешним воздействиям, определяющим ЭМС, предъявляются довольно жесткие требования. Настоящая статья, написанная на базе документа компании Coilcraft [4], для решения указанных проблем предлагает эффективное решение по выбору основного помехоподавляющего элемента, а именно синфазного дросселя (Common Mode Choke), который может работать в высокоскоростных интерфейсах. Именно он является наиболее эффективным и широко используемым компонентом таких решений.

Что такое и как работает синфазный дроссель

Особенностью синфазного дросселя (Common Mode Choke) является то, что он имеет две обмотки, намотанные в противоположных направлениях (рисунок).

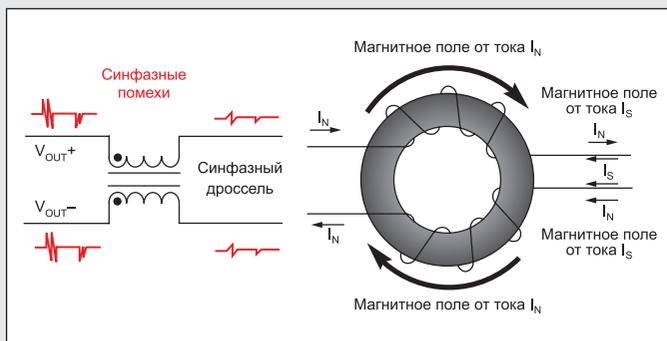


Рисунок. Принцип работы синфазного дросселя

Благодаря наличию противофазных обмоток синфазные токи I_S будут генерировать разностный магнитный поток в сердечнике, поскольку они текут в одном направлении. Таким образом, возникающий при этом импеданс эффективно гасит синфазные составляющие тока. Асинхронные, дифференциальные токи, проходя через дроссель, формируют возвращаемые токи I_N , которые не производят разностный магнитный поток и, следовательно, не затухают в таком дросселе. Данный подход имеет существенное преимущество: сердечник дросселя не входит в насыщение даже при наличии очень больших дифференциальных токов, поэтому для подавления синфазных составляющих в синфазных дросселях могут быть использованы сердечники с высокой магнитной проницаемостью без риска их перегрева из-за прохождения дифференциальных составляющих тока [1].

Вступление

Высокоскоростные интерфейсы данных, такие как USB, HDBaseT, HDMI, DVI и DisplayPort, для обеспечения их надежного функционирования требуют тщательного рассмотрения проблемы электромагнитных помех (ЭМП) и гарантированного выполнения нормативов по электромагнитной совместимости (ЭМС). Из множества инструментов, доступных разработчику в комплексном решении этой проблемы — устранения собственных ЭМП и влияния внешних на линии передачи сигнала, вход/выход интерфейса и размещения составляющих его компонентов, — наиболее действенным, несомненно, является дроссель синфазного фильтра. При этом необходимо выбрать такой дроссель, который будет эффективно использоваться для самых разнообразных видов сигналов, в широком температурном диапазоне изменений и в условиях высокой спектральной плотности, характерной для высокоскоростных каналов передачи. Синфазные дроссели должны не только осуществлять подавление помех, но и поддерживать целостность передачи информации по высокоскоростным каналам связи. Как уже говорилось, они могут быть необходимы для выполнения требований стандартов FCC и международных стандартов соответствия с конкретными нормативными требованиями. Так, один из основных стандартов FCC CFR 47 применяется, как правило, к радиочастотным устройствам (Часть 15), а также устанавливает определенные регламенты функционирования промышленного, научного и медицинского оборудования (Часть 18). В дополнение к общепринятым стандартам могут быть и другие условия, обязательные для точно указанных приложений. Например, крупные автопроизводители поддерживают собственные требования к ЭМП и ЭМС для оборудования транспортных средств [8].

Проблема выбора синфазного дросселя

Выбор оптимального синфазного дросселя для конкретного приложения зависит от целого ряда факторов, которыми ни в коем случае нельзя пренебрегать. Первый шаг при выборе наиболее подходящего дросселя — определение именно тех вариантов его исполнений, которые не будут ослаблять и оказывать негативное влияние на передачу дифференциального (полезного) сигнала. Для этого необходимо учитывать скорости передачи данных в рамках используемого интерфейса, для справки они приведены в таблице.

Скорость передачи данных определяет протокол связи, следовательно, он определяет и нужную полосу пропускания для работы в дифференциальном режиме, то есть непосредственно в режиме передачи информации.

Очень важно, хотя и относительно просто, выбрать синфазный дроссель с подходящим ослаблением дифференциального сигнала для

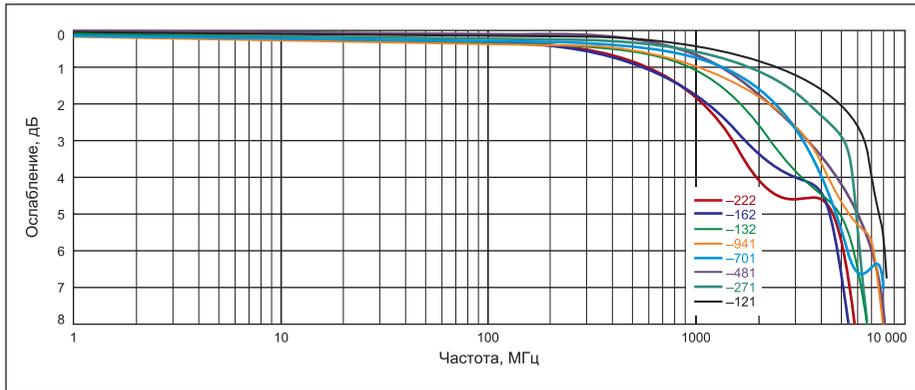


Рис. 1. График, показывающий затухания для дифференциального высокочастотного сигнала на примере синфазных дросселей серии 0805USBN компании Coilcraft



Рис. 2. Синфазные дроссели серии 0805USBN компании Coilcraft

диапазона частот в соответствии с используемым интерфейсом. На рис. 1 показана амплитудно-частотная характеристика (АЧХ), позволяющая определить частоту среза для дифференциального сигнала, вносимую синфазными дросселями серии 0805USBN компании Coilcraft. Если определять ее по стандартному уровню -3 дБ, то частота среза, а значит, и полоса пропускания для дифференциального сигнала расположена выше 1 ГГц и в зависимости от типа дросселя простирается вплоть до 6,5 ГГц. Таким образом, частотные искажения дифференциального высокочастотного сигнала могут быть минимизированы, и что немаловажно, с сохранением его гармонических составляющих — это делает синфазные дроссели компании Coilcraft серий 0805USBN и 0805USBF, типоразмера 0805 и серии 0603USB, типоразмера 0603 подходящими для типичных скоростей передачи данных USB3.1 Gen 1. Пример исполнения дросселей показан на рис. 2. Однако здесь есть проблема. Разработчику необходимо учитывать не только частотные, но и нагрузочные характеристики дросселя, то есть номинальный рабочий ток, а иногда и устойчивость изоляционного барьера, о чем мы будем говорить ниже.

Если для используемой скорости передачи данных относительно требований к влиянию дросселя на дифференциальный сигнал все достаточно просто и предсказуемо, то для подавления синфазного сигнала не все

так очевидно. Поэтому этой части проблемы необходимо уделить особое внимание. Глубина требуемой фильтрации здесь также зависит от скорости передачи данных, но ее сложнее прогнозировать из-за влияния всех возможных физических аспектов конкретного приложения, способных воздействовать на уровень нежелательных генерируемых ЭМП и ограничить устойчивость в рамках определения ЭМС. Оказать влияние на конечную конструкцию могут не только чисто схемные решения интерфейса в рамках его протокола, но и конструктивное решение, включающее такие моменты, как согласование входного/выходного импеданса, импеданс контактов самого разъема, ширина печатного проводника линии подключения и влияние экранирования.

Разумеется, когда возникает проблема, важно определить ее источник и принять правильное решение. Самый простой способ — подобрать дроссели, специально разработанные для конкретного приложения. То есть фильтрующие дроссели, созданные с учетом требований конкретных приложений, скажем, синфазные дроссели для USB. Наглядный пример от компании Coilcraft был представлен выше.

Однако поскольку проблемы ЭМП и ЭМС в реальной жизни не всегда вписываются в заранее подготовленные решения, ключом к их решению является доступ к данным по эффективности фильтрации. Выбор нужного синфазного дросселя может быть облегчен с помощью интерактивного инструмента CM Choke Finder (полное наименование инструмента Common Mode Choke Finder), предложенного компанией Coilcraft.

Инструмент доступен с домашней страницы компании (www.coilcraft.com) через меню Design Tools с переходом на CM Choke Finder. Активировать его можно и по прямой ссылке (www.coilcraft.com/apps/finder/cmffinder.cfm). При этом не требуется ни регистрация, ни подписка на рассылку новостей. После активации откроется окно, интересующая нас часть которого представлена на рис. 3.

Для начала следует указать требования к фильтрации для своего приложения, а именно нужный импеданс в омах (в этом случае ставите флажок на Impedance) или затухание на определенной частоте или частотном диапазоне в децибелах (ставьте флажок на Attenuation). Если же вам необходим синфазный дроссель с конкретной индуктивностью, то ставите флажок на Inductance и задаете ее в микрогенри. Этот вариант используется в качестве альтернативы и сверки, когда значение индуктивности уже определено, но по некоторой причине потребовало корректировки.

Кроме данных параметров, надо указать рабочий ток (Current) в амперах и частоту среза для синфазного режима (Frequency to attenuate). Это может быть либо частота среза (ставьте флажок перед окошком MHz) в мегагерцах, либо в полосе частот в мегагерцах «от и до» (to), при этом диапазон частот ограничен полосой частот 0,1–3000 МГц (максимум), что и указано ниже окошек установки диапазона.

Через Mounting можно также задать соответствующий вариант конструктивного исполнения SMT (для монтажа на поверхность) или Leaded (с выводами, для установки в отверстия). Или ограничить вы-

Таблица. Типичные скорости передачи данных

Сигнальный интерфейс	Скорость передачи
USB2.0 (High Speed)	480 Мбит/с
USB3.1 Gen 1 (SuperSpeed) (бывший USB3.0)	5 Гбит/с
USB3.1 Gen 2 (SuperSpeed+)	10 Гбит/с
HDMI	1,65–6 Гбит/с
HDBaseT	До 10,2 Гбит/с
FireWire 800/S800T (IEEE 1394b-2002/IEEE 1394c-2006)	До 800 Мбит/с
FireWire S1600/S3200	1,57 и 3,15 Гбит/с
LVDS per ANSI/TIA/EIA-644-A	До 1,9 Гбит/с
PCI Express 2.0	500 Мбит/с
SATA 1.0/2.0/3.0/3.1/3.2	1,5; 3; 6; 16 Гбит/с
DVI	До 3,96 Гбит/с
DisplayPort	До 8,1 Гбит/с



Рис. 3. Окно задания параметров для выбора синфазного дросселя в симуляторе CM Choke Finder

Recommended chokes E-mail results

Actual size	Free sample	Graph Pick 6 max	Part number	CM attenuation 1 MHz dB min	DM attenuation 1 MHz dB max	Inductance min μ H	DCR per line Ohms	Rated current A rms	Isolation voltage Vrms	Lines	Mount	Length mm	Width mm	Height mm	Price @1000	AEC grade
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	MSD1048-103	4	0	8	0.053	1.5	200	2	SM	10.30	10.30	5.00	\$0.72	
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	LPD5010-822	3	0	6.56	0.7	0.5	100	2	SM	4.80	4.80	0.90	\$0.93	
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	MSD1514-103	3	0	8	0.018	6.8	500	2	SM	15.50	15.50	14.20	\$1.71	
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	MSD1278-822	3	0	6.56	0.05	2.76	500	2	SM	12.30	12.30	8.05	\$0.76	3
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	LPD4012-103	3	0	8	0.75	0.5	100	2	SM	4.02	4.02	1.20	\$0.45	
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	1206USB-872	3	0	0.51	0.39	0.5	250	2	SM	3.30	1.70	1.93	\$0.31	
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	1206USB-113	3	0	0.623	0.44	0.5	250	2	SM	3.30	1.70	1.93	\$0.31	
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	MSD1583-103	3	0	8	0.031	3.68	500	2	SM	15.50	15.50	8.60	\$1.10	

Can't find what you need? [Help](#)

Рис. 4. Рекомендованные по заданным параметрам синфазные дроссели

Recommended chokes E-mail results

Actual size	Free sample	Show all parts	Line color	Part number	CM attenuation 1 MHz dB min	DM attenuation 1 MHz dB max	Inductance min μ H	DCR per line Ohms	Rated current A rms	Isolation voltage Vrms	Lines	Mount	Length mm	Width mm	Height mm	Price @1000	AEC grade
	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		LPD4012-103	3	0	8	0.75	0.5	100	2	SM	4.02	4.02	1.20	\$0.45	
	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		1206USB-872	3	0	0.51	0.39	0.5	250	2	SM	3.30	1.70	1.93	\$0.31	
	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		1206USB-113	3	0	0.623	0.44	0.5	250	2	SM	3.30	1.70	1.93	\$0.31	

Рис. 5. Перечень выбранных для сравнения синфазных дросселей

бор дросселями, отвечающими требованиям к автомобильному оборудованию AEC-Q200. Здесь предусмотрены два критерия: Grade 1 (125°) и Grade 3 (85°) — имеется в виду рабочая температура +125 и +85 °С.

Допустим, нам необходим синфазный дроссель поверхностного монтажа, обеспечивающий бесперебойное в части ЭМП и требований по ЭМС функционирование интерфейса USB 2.0. Как известно, рабочий ток здесь ограничен 0,5 А, а частота среза может быть выбрана равной 1 МГц. Именно эти условия указаны на рис. 3.

После того как условия заданы, нажимаем на виртуальную кнопку поиска подходящих вариантов FIND (она справа), и открывается перечень соответствующих синфазных дросселей (рис. 4).

Относительный недостаток инструмента Common mode Choke Finder — нельзя ограничить выбор дросселя, например, нужным типоразмером, поэтому список получается обширный и разбираться в нем приходится вручную: либо прокруткой, либо, на наше счастье, через «правка-поиск» на странице, с указанием, скажем, 0805 (если это, конечно, поддерживается вашим браузером). В данном случае нас ждет разочарование — синфазных дросселей такого типоразмера, отвечающих заданным требованиям, нет, но есть два дросселя типоразмера 1206.

В новой, открывшейся вкладке вы получаете весьма обширную информацию. Фотографии внешнего вида (причем в масштабе, близком к фактическому), гиперссылка через обозначение для заказа на спецификацию (колонка Part number); частоту среза для синфазного сигнала по уровню -3 дБ (CM attenuation 1 MHz dB min); затухание для дифференциального сигнала на частоте среза (DM attenuation 1 MHz dB max); индуктивность в микрогенри (Inductance min μ H); сопротивление катушки по постоянному току в омах (DCR per line Ohms); рабочий ток в амперах (Rated current Arms); напряжение изоляции (Isolation voltage Vrms). И кроме того, конструктивные параметры — размеры в миллиметрах, рекомендуемую цену и соответствие требованиям для оборудования, используемого в автомобильной промышленности.

Первыми в таблице указаны дроссели с наибольшим импедансом/ослаблением синфазных сигналов на заданной вами частоте. Далее можно отсортировать результаты по другим критериям — по току, сопротивлению по постоянному току (DCR) или габаритам.

Одна из самых мощных функций этого инструмента — возможность сравнивать на одном и том же графике до шести разных дросселей, что делает выбор оптимального продукта намного проще, чем когда

их частотные характеристики приводятся на разных графиках — каждый на своем. Кривые импеданса и затухания показаны для каждого дросселя в нужном диапазоне частот. Перемещая курсор по графику, вы можете видеть точную точку и считать данные на любой интересующей частоте через небольшое всплывающее окно. Активация этой функции осуществляется установкой флажков в колонке Graph Pick 6 max возле выбранных компонентов.

Итак, давайте сравним два подходящих нам дросселя типоразмера 1206, специально разработанных для USB-интерфейса, — 1206USB-113, 1206USB-872 [5] и один LPD4012-103 [6]. Результат мы получим, активировав виртуальную кнопку **Graph Pick 6 max**. Первым мы увидим, что в таблице остались лишь выбранные нами дроссели и показан цвет линии, которым будут отображаться их частотные характеристики (рис. 5).

Ниже будут представлены графики, первый по умолчанию — это АЧХ, а вернее зависимость затухания (Attenuation) относительно выбранной частоты (рис. 6), в данном случае относительно 1 МГц. Вторым — зависимость импеданса от частоты (рис. 7) и также относительно 1 МГц. Чтобы не использовать прокрутку, графики можно переключать, кликнув мышкой

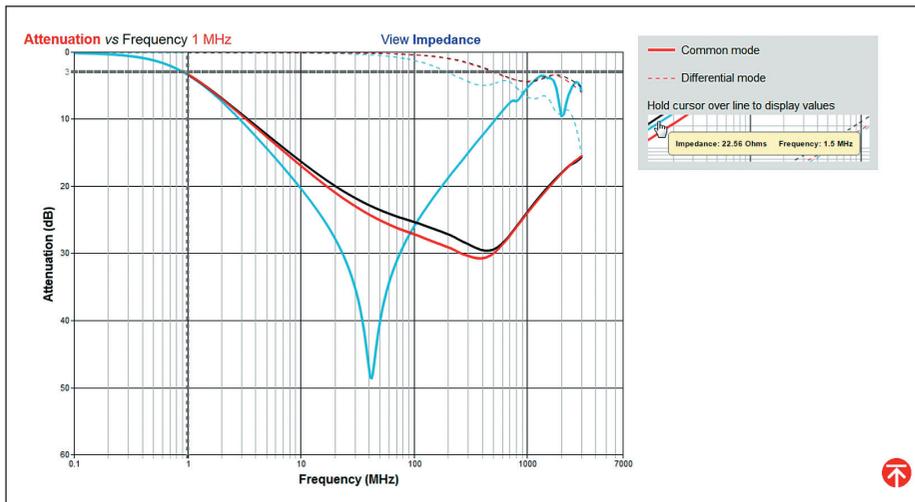


Рис. 6. График зависимости затухания от частоты для выбранных типов синфазных дросселей

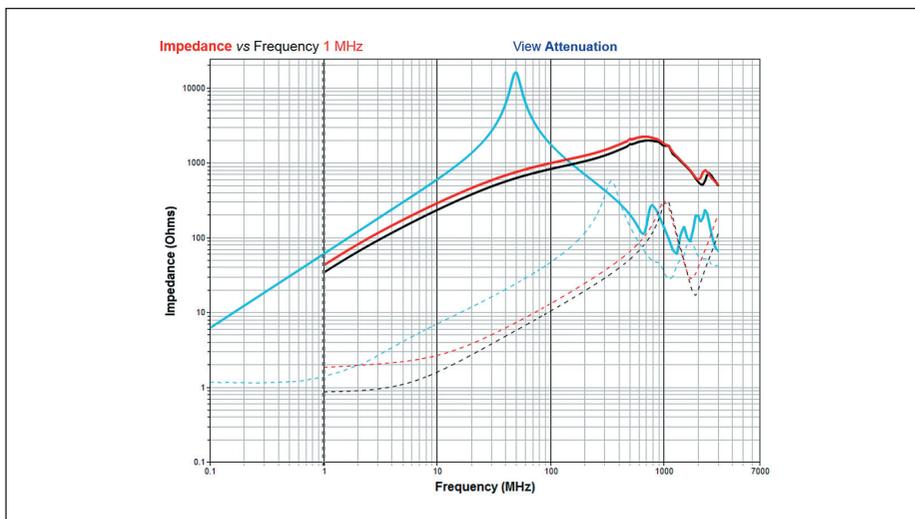


Рис. 7. График зависимости импеданса от частоты для выбранных типов синфазных дросселей

на **Impedance** (в опции View Impedance) или **Attenuation** (в опции View Attenuation), тип графика изменится. Кроме того, справа имеется указание, как изображаются графики для синфазного (Common mode) и дифференциального (Differential mode) режимов, и пример того, как пользоваться курсором.

Из дополнительных опций доступны: корректировка начальных условий (виртуальная кнопка **Revise Input**), отправка результатов по электронной почте (e-mail results), сохранение результатов в виде pdf-файла (пиктограмма) и помощь (виртуальная кнопка **Help**) в виде запроса в службу технической поддержки. Что касается сохранения результатов, если вы не сделали выбор и не вывели графики, то в pdf-файл сохранится только весь перечень предложенных дросселей, без начальных условий. Если выбор был сделан — сохранится таблица выбора и графики и вы получите ссылку на ваш проект. Начальные условия

не сохраняются, что можно считать некоторым неудобством. Что касается пересылки результатов по почте, придет не pdf-файл с результатами, а ссылка на страницу с начальными условиями и полной таблицей рекомендованных дросселей, что тоже не слишком удачно. Хотя здесь нет регистрации и опции типа «Кабинет» или «Мой Coilcraft», результаты проектирования сохраняются и доступны вам по ссылке, полученной по электронной почте или сохраненной вместе с pdf-файлом. Если вы об этом не позаботились, то выбор придется повторять с нуля. И хотя он прост и не затратен по времени, делать одну и ту же работу дважды — несерьезно.

Несмотря на выявленные неудобства, Common Mode Choke Finder компании Coilcraft — это самый сложный, но и наиболее простой в использовании онлайн-инструмент, доступный в отрасли. Он будет весьма полезным и хорошим дополнением при разработке проектов, упрощая создание филь-

тров ЭМП и выполнение непростых требований в части ЭМС. С его помощью можно выбрать синфазный дроссель, наиболее эффективный для решения конкретных задач.

Конечно, если вам не жалко своего времени, вы можете осуществить выбор синфазного дросселя и обычным путем, просматривая веб-страницы и изучая массу спецификаций. Но время, как известно, деньги. А потому лучше не тратить его попусту, а использовать с максимальной пользой. Для этого компания Coilcraft сделала еще один весьма удачный шаг в упрощении выбора описанных в настоящей статье компонентов — она разместила их на одной удобной странице (www.coilcraft.com/prod_em.cfm), с которой также открывается инструмент CM Choke Finder.

В заключение хочу отметить, что проблемы ЭМП и ЭМС не решаются сами по себе, их нельзя оставлять «на потом» и надеяться на авось. Практически все изделия подлежат обязательной сертификации на соответствие этим требованиям, и чем раньше вы займетесь решением проблемы, тем быстрее ваше изделие окажется на рынке, опередив или потеснив конкурентов. Помните, что затраты на доработку изделия уже на начальной стадии производства, в результате его несоответствия нормам по ЭМП/ЭМС, могут оказаться просто катастрофическими [7].

Литература

1. Робертс С. Решения проблемы пульсаций и помех DC/DC-преобразователей: входная и выходная фильтрация // Компоненты и технологии. 2015. № 8.
2. Рентюк В. Что нужно знать об испытаниях на выполнение требований по ЭМС для изделий коммерческого назначения // Компоненты и технологии. 2017. № 7.
3. Петит Г. Что нужно знать об испытаниях на выполнение требований ЭМС для изделий военного и аэрокосмического назначения // Компоненты и технологии. 2017. № 8.
4. Common Mode Filter Chokes for High Speed Data Interfaces Document 1009-2 Revised 07/01/16. www.coilcraft.com/pdfs/Doc1009_cm_chokes_hi_speed.pdf
5. USB 2.0 Common Mode Choke 1206, Document 386-1 Revised 06/01/1, Coilcraft Inc. 2017. www.coilcraft.com/pdfs/1206usb.pdf
6. Common Mode Chokes LPD4012, Document 1327-1 Revised 07/13/1 Coilcraft Inc. 2017. www.coilcraft.com/pdfs/lpd4012_cm.pdf
7. Ле Февр П. Электропитание и проблемы электромагнитной совместимости оборудования при работе в медицинских средах // Компоненты и технологии. 2016. № 5.
8. Зауэрвальд М. Десять советов для успешного проектирования автомобильной электроники с выполнением требований по ЭМС/ЭМП // Компоненты и технологии. 2016. № 5.

Синфазные дроссели от Pulse Electronics — эффективная защита высокоскоростных линий передачи

Синфазный дроссель — это индуктивный элемент в виде катушки с замкнутым магнитопроводом из феррита с высокой магнитной проницаемостью, содержащий две одинаковые обмотки, которые могут быть включены в противофазе. Данная конструктивная особенность не допускает ослабления полезного сигнала в высокоскоростных линиях связи, для которых такие дроссели являются необходимым компонентом не только как средство защиты от воздействия внешних электромагнитных помех (ЭМП), но и как решение для выполнения требований по электромагнитной совместимости (ЭМС).

Как известно, все высокоскоростные линии связи и внутренние интерфейсы используют для передачи пакетов данных дифференциальный сигнал — пару сигналов с равными амплитудами, но разными фазами, повернутыми относительно друг друга на 180° . При прохождении такого сигнала через синфазный дроссель каждая из его составляющих создает магнитный поток разной полярности. Оба потока нейтрализуют друг друга, что делает дроссель прозрачным для прохождения сигнала. Аналогично, синфазный сигнал, наведенный сторонним источником ЭМП, так же образован двумя сигналами с равной амплитудой, но с одинаковой фазой. При его прохождении через синфазный дроссель магнитные потоки двух сигналов складываются в ферритовом сердечнике, импеданс дросселя увеличивается, что приводит к значительному подавлению такого сигнала.

По сути, синфазный дроссель — это магнитный элемент, который подавляет синфазные сигналы за счет большого импеданса и, наоборот, характеризуется малыми вносимыми потерями и искажениями при прохождении через него дифференциального сигнала. Типовой пример применения ферритовых элементов для выполнения требований по ЭМС для высокоскоростных линий передачи данных и внутренних интерфейсов, а также типы

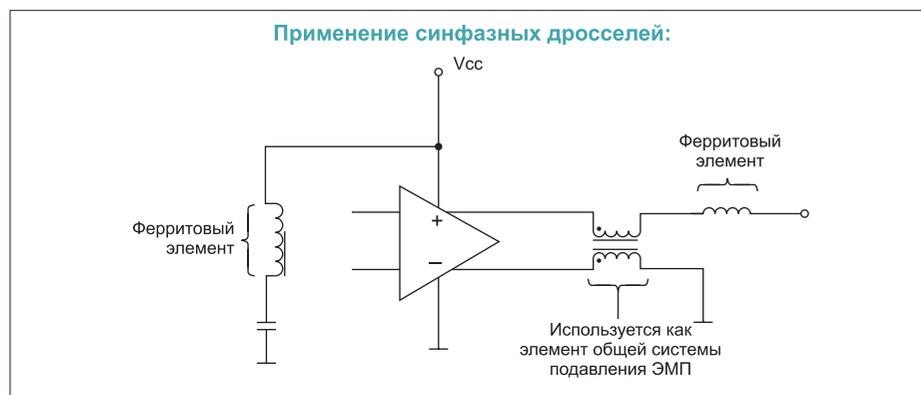


Рис. 1. Типовая схема для выполнения требований по ЭМС

необходимых для этого элементов представлены на рисунке.

В подобных приложениях преимущество синфазного дросселя заключается в том, что его сердечник не входит в насыщение даже при очень больших дифференциальных токах. Таким образом, для подавления нежелательных синфазных составляющих ЭМП в этих дросселях могут быть установлены сердечники с высокой магнитной проницаемостью без риска перегрева из-за потерь, вызванных проходящим через него полезным сигналом. В общем случае правильно спроектированные синфазные дроссели успешно подавляют внешние ЭМП в достаточно большом диапазоне частот, что,

собственно, и стало причиной их широкого распространения в качестве элементов защиты на линиях высокоскоростной связи, в том числе и для внутренних интерфейсов. Полезным побочным эффектом от использования синфазного дросселя является то, что из-за присущей реальному дросселю неидеальности в виде индуктивности рассеивания он также может быть предназначен для фильтрации дифференциальных шумов и помех при добавлении двух дополнительных конденсаторов соответствующей конкретному решению емкости. В этом случае он представляет собой индуктивность малого номинала, намного меньше индуктивности его противофазных обмоток.

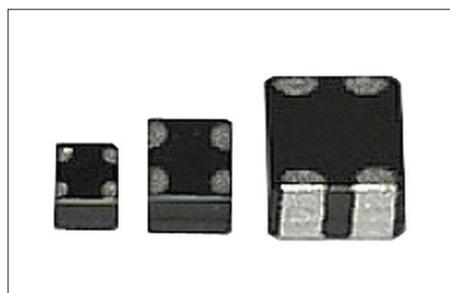


Рис. 3. MCMC — многослойные (Multi-Layer)

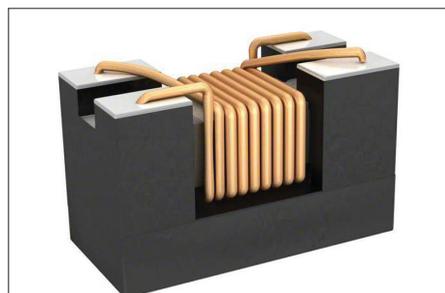


Рис. 2. CCMC — с проволоочной обмоткой (Wire Wound)

Таблица 1.

Основные области применения синфазных дросселей CCMC и MCMC компании Pulse Electronics

Промышленное оборудование	Испытательное оборудование
Автомобильные информационно-развлекательные системы	Зарядные устройства
Сетевое оборудование	Медицинское оборудование
Системы безопасности и видеокамеры	Телевизоры и дисплеи
Информационно-развлекательные системы на борту самолетов	Ноутбуки, смартфоны, нательная (носимая) электроника

Таблица 2.

Синфазные дроссели серии MCMC от компании Pulse Electronics

Тип дросселя	Импеданс на частоте 100 МГц, Ом	RDC, Ом (макс.)	Рабочий ток, mA (макс.)
Типоразмер 0201			
PE-0201MCMC600ST	60±25%	4,75	50
PE-0201MCMC900ST	90±25%	6,5	50
Типоразмер 0302			
PE-0302MCMC120GT	12±5 Ом	2,5	130
PE-0302MCMC470MT	47±20%	5	100
PE-0302MCMC900MT	90±20%	6,5	100
Типоразмер 0403			
PE-0403MCMC400ST	40±25%	2,5	100
PE-0403MCMC900ST	90±25%	4,5	100

Примечания. Рабочее напряжение (постоянного тока) — 5 В. Сопротивление изоляции (мин.) — 100 МОм.

Таблица 3.

Синфазные дроссели серии CCMC от компании Pulse Electronics

Тип дросселя	Импеданс на частоте 100 МГц, Ом	RDC, Ом (макс.)	Рабочий ток, mA (макс.)
Типоразмер 0805			
PE-0805CCMC670STS	67	0,25	400
PE-0805CCMC900STS	90	0,35	330
PE-0805CCMC121STS	120	0,3	370
PE-0805CCMC181STS	180	0,35	330
PE-0805CCMC261STS	260	0,4	300
PE-C805CCMC361STS	360	0,45	280
PE-0805CCMC601STS	600	0,55	200
PE-0805CCMC102STS	1000	0,8	150
Типоразмер 1206	90±25%	4,5	100
PE-1206CCMC900STS	90	0,3	370
PE-1206CCMC161STS	160	0,3	340
PE-1206CCMC261STS	260	0,5	310
PE-1206CCMC601STS	600	0,8	260
PE-1206CCMC102STS	1000	0,1	230
PE-1206CCMC222STS	2200	0,12	200
Типоразмер 1210			
PE-1210CCMC161STS	160	0,15	680
PE-1210CCMC271STS	270	0,25	640
PE-1210CCMC601STS	600	0,12	1000
PE-1210CCMC102STS	1000	0,35	480

Примечания. Рабочее напряжение (постоянного тока) — 50 В. Выдерживаемое напряжение — 125 В. Сопротивление изоляции (мин.) — 10 МОм.

Синфазный дроссель, служащий для защиты высокоскоростных линий связи от внешних ЭМП, — технологически сложное устройство, его качественное изготовление с гарантирован-

но повторяющимися в серийном производстве параметрами и с минимальными отклонениями предполагает наличие определенных навыков, материалов и оборудования.

Компания Pulse Electronics Networking BU является поставщиком надежным индуктивных компонентов для многих ведущих мировых изготовителей современного сетевого оборудования. Благодаря автоматизированному производству клиенты компании могут полностью доверять ее продукции в различных приложениях, требующих фильтрации и защиты от воздействия синфазных электромагнитных помех, включая автомобильное и телекоммуникационное оборудование и Ethernet, в том числе учитывая ее современную тенденцию развития — технологии PoE (Power over Ethernet — питание через Ethernet-кабель).

Недавно компания Pulse Electronics освоила производство и вывела на коммерческий рынок две новые серии синфазных дросселей технологии CCMC (Ferrite Chip Choke), представляющие собой традиционные ферритовые малогабаритные синфазные чип-дроссели с проволоочной обмоткой (Wire Wound), и MCMC (Multi-Layer Common Mode Chip Choke) — многослойные малогабаритные синфазные чип-дроссели. Оба типа устройств предназначены для поверхностного монтажа и выпускаются в нескольких стандартизованных типоразмерах. Высококачественные элементы от компании Pulse Electronics помогают решать проблемы подавления синфазных электромагнитных помех (ЭМП) на линиях связи, что облегчает выполнение требований в части электромагнитной совместимости (ЭМС).

Особенности и преимущества синфазных дросселей CCMC и MCMC компании Pulse Electronics

- высокий уровень подавления синфазных ЭМП без искажений и ослабления полезного сигнала;
- компактный форм-фактор, оптимизирующий занимаемое пространство на печатной плате;
- подходит для интерфейсов HDMI, MIPI, MDDI, MHL, DVI, USB3.0/3.1 CAN-шины, FireWire IEEE1349, LVDS и т. д.;
- диапазон рабочих температур: -40...+85 °С.

- ♦ синфазные и силовые дроссели
- ♦ датчики тока
- ♦ импульсные и изолирующие трансформаторы
- ♦ планарные трансформаторы
- ♦ чип индуктивности



www.macrogroup.ru
passive@macrogroup.ru

Официальный дистрибьютор Pulse Electronics

Выбор и использование ферритовых бусин для подавления звона в импульсных преобразователях

Кристофер РИЧАРДСОН
(Christopher RICHARDSON)
Ранжит БРАМАНПАЛЛИ
(Ranjith BRAMANPALLI)

В статье рассматриваются ферритовые бусины типоразмеров 0603 и 0805 компании Würth Elektronik, которые позволяют уменьшить скорость нарастания импульсов в переходных процессах при коммутации MOSFET верхнего плеча в синхронном понижающем преобразователе, чтобы уменьшить амплитуду и продолжительность звона.

Введение

«Звон» — распространенный термин, обозначающий нежелательные колебания, которые происходят при коммутации ключа и наличии паразитных индуктивностей и емкостей. Паразитная емкость ключа, высвобождающая энергию при его переключении, образует звон с паразитными индуктивностями дискретных силовых дросселей, проводников печатной платы, выводов компонентов, разъемов и т. д. Поскольку у печатных плат всегда имеются паразитные элементы, все импульсные преобразователи генерируют, по крайней мере, незначительный звон. Частоты этих электромагнитных помех (ЭМП), как правило, находятся в диапазоне 50–200 МГц. На этих частотах проводники печатных плат, а также входные и выходные выводы работают как антенны, приводя к появлению кондуктивных помех и излучаемого шума.

Большинство импульсных преобразователей работает на частотах до 5 МГц. Поскольку мощность высших гармонических составляющих, возникающих при коммутации, как правило, очень мала на частотах до 50 МГц и выше, на осциллограмме излучаемых ЭМП эти гармоники маскируются основной частотой и могут остаться незамеченными. Кроме того, если пульсации основной частоты относительно просто подавляются с помощью LC-фильтров,

то с гармониками высших порядков дело обстоит иначе. На частотах 50–200 МГц многие дроссели фильтра ведут себя не как индуктивности, а как емкости, и практически перестают ослаблять сигналы. Схожим образом ведут себя и конденсаторы фильтра, импеданс которых в диапазоне 50–200 МГц приобретает индуктивный характер. В таких случаях более эффективным способом фильтрации является использование ферритовых бусин, поскольку у них очень малое сопротивление на низких частотах (как правило, меньше 10 МГц). Однако у этих компонентов очень большие резистивные потери в диапазоне частот 10 МГц...1 ГГц, что зависит от их типа и конструкции. Как правило, ферриты применяются последовательно входным и выходным соединениям импульсных преобразователей, а также последовательно силовым ключам, как видно из рисунка 1.

Поскольку главным недостатком размещения ферритовых бусин на рисунке 1 является прохождение через них больших токов, номинальные сопротивления этих устройств по постоянному току должны соответствовать требованиям к мощности рассеивания. Кроме того, необходимо также учитывать рассеиваемую мощность устройствами при преобразовании высокочастотного звона в тепло. Величину рассеиваемой мощности высокочастотных токов трудно рассчитать, т. к. амплитуда сигналов почти полностью зависит от паразитных элемен-

тов. На практике ферритовые бусины выбираются так, чтобы их номинальный ток в два раза превышал фактическое максимальное значение тока через эти элементы. При небольшой мощности применяются недорогие устройства для поверхностного монтажа, но при высоких значениях мощности необходимо параллельно устанавливать большие ферриты, что приводит к удорожанию схемы и уменьшению свободного места на плате.

В статье рассматриваются ферритовые бусины типоразмеров 0603 и 0805, которые позволяют уменьшить скорость нарастания фронта в переходных процессах при коммутации MOSFET верхнего плеча в синхронном понижающем преобразователе, что, в свою очередь, позволяет уменьшить амплитуду и продолжительность звона. В частности, уменьшение скорости нарастания фронта импульсов обеспечивает превосходные результаты; при этом лишь незначительно возрастают потери на переключение. Эта задача решается путем тщательного выбора и настройки сопротивления, установленного в цепь затвора MOSFET или вывода с положительным напряжением питания для затвора в управляющей цепи. Однако ферритовая бусина того же размера, что и резистор, так же или даже лучше справляется с поставленной задачей. Выбор бусины осуществляется с помощью ее технического описания, что много сокращает время испытаний.

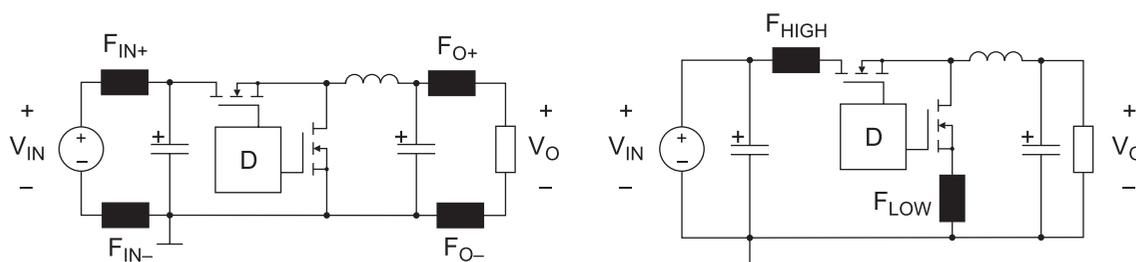


Рис. 1. Типовая схема синхронных понижающих преобразователей с использованием ферритовых бусин

Установка бусины последовательно бутстрепной схеме

На рисунке 2 показаны два возможных способа реализации элемента, ограничивающего скорость нарастания фронта импульсов: в цепь затвора MOSFET верхнего плеча или последовательно бутстрепной цепи. Второй способ предпочтительнее по трем основным причинам. Во-первых, при его использовании ограничивается только скорость восходящего фронта, благодаря чему экономится расходуемая мощность, т. к. в каждом цикле замедляется только один переходный процесс (при его замедлении, как известно, увеличиваются потери на переключение). Во-вторых, замедление скорости нарастания восходящего фронта управляющего MOSFET в синхронном понижающем преобразователе может стать причиной возникновения нежелательного сквозного тока между шинами питания,

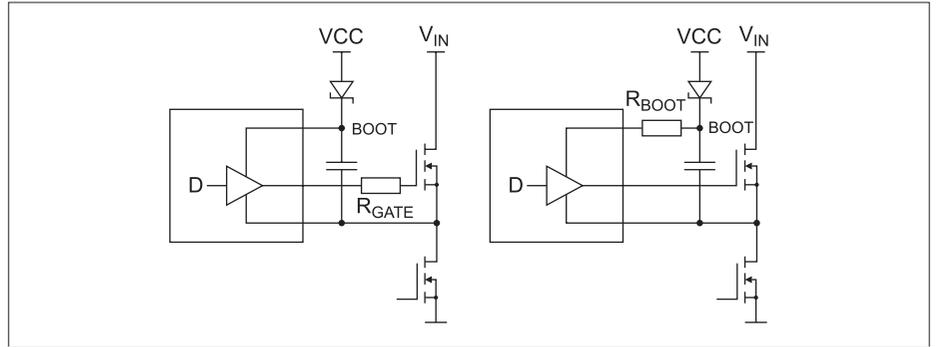


Рис. 2. Резисторы на затворе уменьшают время нарастания и спада импульсов, тогда как резисторы R_{BOOT} в бутстрепной цепи замедляют лишь нарастающий фронт

когда оба MOSFET одновременно находятся во включенном состоянии. В-третьих, если резистор затвора можно задействовать, только если MOSFET не встроен в преобразователь, то бутстрепный вывод доступен при использовании большинства понижающих регуляторов с собственными MOSFET, что повышает

применимость этого метода для управляющих микросхем многих других типов.

Выбор ферритовой бусины

Для рассматриваемого приложения предлагается демо-плата DC501A с синхронным

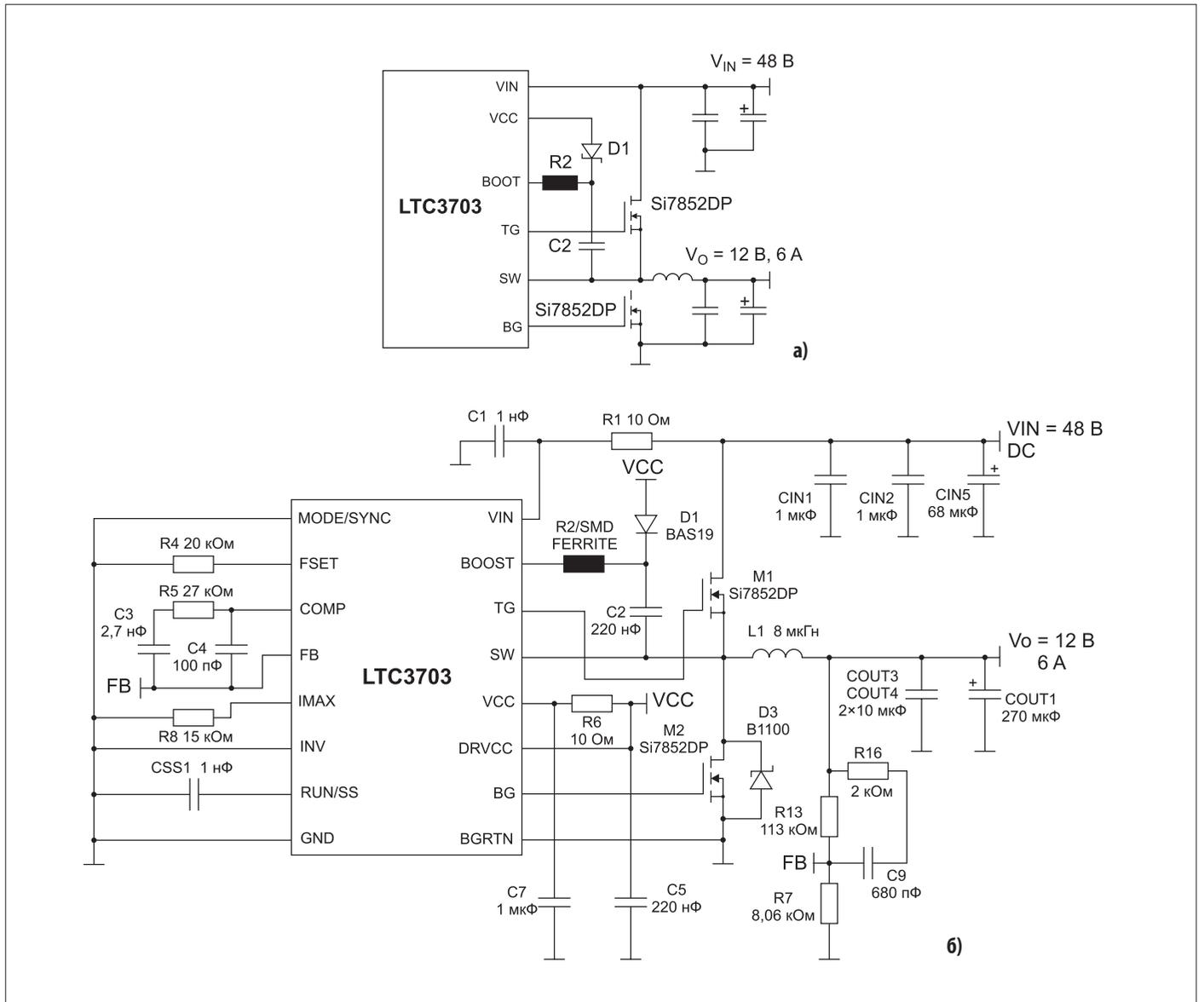


Рис. 3. а) В упрощенной схеме, используемой в демо-плате DC501, имеется элемент R2 для ограничения скорости нарастания фронта импульсов; б) полная схема

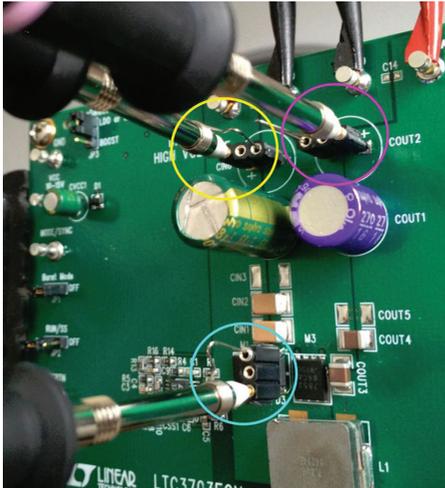


Рис. 4. Корректное измерение напряжения с малым уровнем шума. Желтым кружком обозначен вывод с входным напряжением, розовым — вывод с выходным напряжением, бирюзовым — коммутационный узел

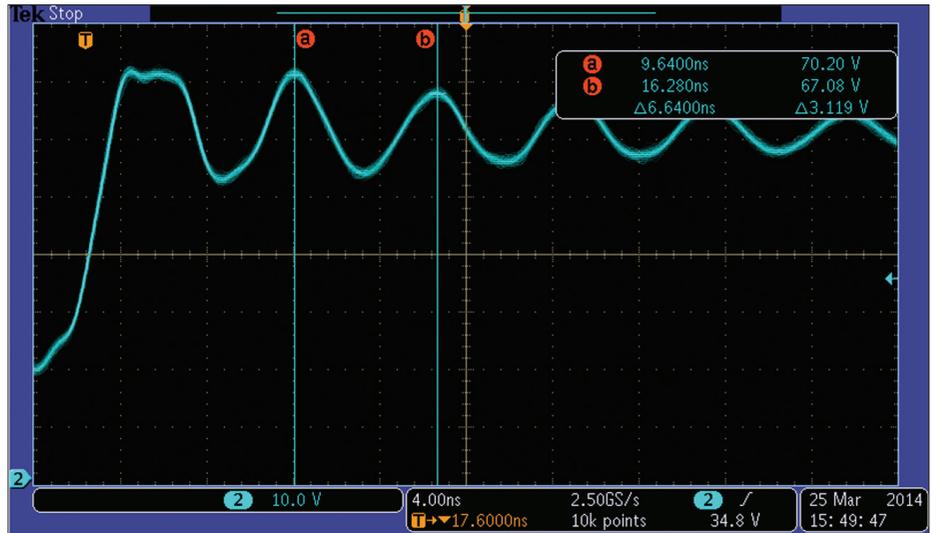


Рис. 5. Результаты измерения схемы без элементов управления скоростью нарастающего фронта показали, что период звона равен 6,64 нс, что соответствует частоте 150 МГц

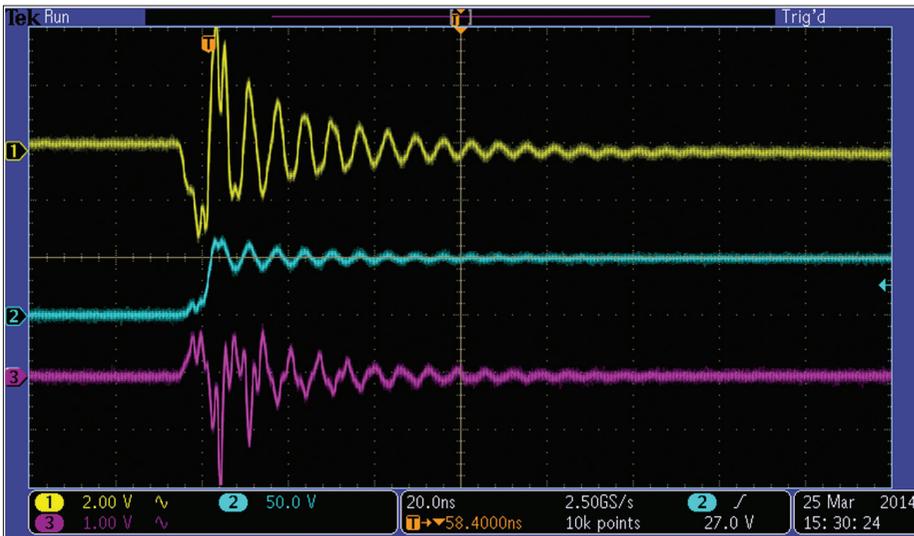


Рис. 6. Звон схемы демо-платы DC501A в отсутствие схемы по управлению скоростью нарастания сигнала при: $V_{IN} = 48\text{ В}$; $V_{OUT} = 12\text{ В}$; $I_{OUT} = 6\text{ А}$. Кан. 1 = V_{IN} связан. по перем. току, кан. 2 — коммут. узел, кан. 3 = V_{OUT} AC

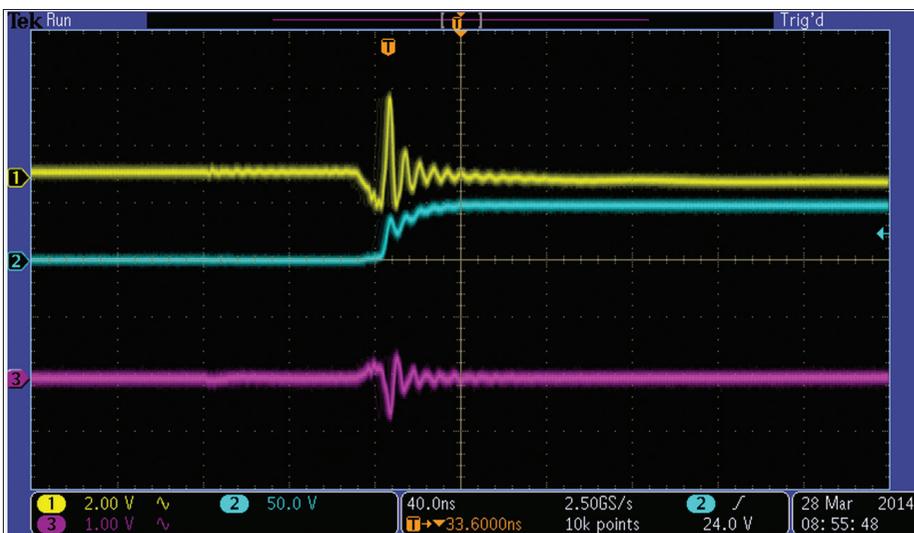


Рис. 7. Звон схемы демо-платы DC501A при использовании толстопленочного резистора R2 величиной 16,2 Ом: $V_{IN} = 48\text{ В}$; $V_{OUT} = 12\text{ В}$; $I_{OUT} = 6\text{ А}$. Кан. 1 = V_{IN} связан. по перем. току; кан. 2 — коммут. узел; кан. 3 = V_{OUT} AC

понижающим контроллером LTC3703 Linear Technology. Упрощенная схема его использования показана на рисунке 3а, а на рисунке 3б — полная схема.

Измерение частоты звона

Рассмотрим схему преобразователя, в которой отсутствуют элементы, ограничивающие скорость нарастания фронта. Как видно из рисунка 3а, типовое значение входного напряжения этого преобразователя составляет 48 В, выходное — 12 В, а максимальный выходной ток — 6 А. Для захвата восходящего фронта сигнала коммутационного узла следует выбрать полную полосу пропускания осциллографа. Воспользуемся пробником с пружинными наконечниками, который ставляется вместе с вольтметровыми щупами для осциллографов, чтобы минимизировать поступление излучаемых помех в контуре, образованном наконечником и гибким заземляющим проводом. Для испытаний было выбрано приспособление с секцией из трех выводов, находящихся на расстоянии 2,54 мм друг от друга, с центральным усеченным выводом (рис. 4). Вместо отсутствующего или утерянного пружинного наконечника можно с успехом задействовать кусок неизолированного провода длиной 0,5–0,75 мм, обвитого вокруг корпуса пробника.

На рисунке 5 масштаб отображения сигнала выбран так, чтобы можно было легко измерить частоту звона. В данном случае она равна 150 МГц.

Расчет или измерение среднего бустерного тока

Средний бустерный ток силового MOSFET верхнего плеча рассчитывается следующим образом:

$$I_{GDRIVE} = 0,5Q_{G-MAX} \times f_{SW}$$

В рассматриваемом примере преобразователь работает на частоте 260 кГц, а величина максимального заряда на затворе равна 41 нКл. Исходя из того, что длительность переднего фронта импульса при коммутации составляет 1% периода сигнала, для образования максимального заряда затвора 41 нКл средний ток во включенном состоянии MOSFET равен примерно 5,3 мА:

$$I_{GDRIVE} = 0,5 \times 41 \text{ нКл} \times 260 \text{ кГц} = 5,3 \text{ мА.}$$

В сигнал бустерного тока также входят импульсные помехи, возникающие при переключении тока MOSFET величиной 1 А или больше. Поскольку их продолжительность не превышает 100 нс, а вклад в разогревание феррита минимальный, ими можно пренебречь.

Выбор феррита с максимальным сопротивлением на частоте звона

Ферритовые бусины для поверхностного монтажа серии WE-CBF от компании Würth Elektronik выпускаются с типоразмерами 0402–1812, а благодаря серийному производству у серии 0603 очень привлекательная цена. (Заметим, что в серии WE-TMSB имеются миниатюрные ферритовые бусины.) Несмотря на свои малые размеры, даже компоненты серии 0603 с максимальным сопротивлением при 150 МГц могут работать со средним током 50 мА и тем более с управляющим током 5 мА, как в рассматриваемом примере. На рисунках 6–9 сравнивается работа исходной схемы без элемента управления скоростью нарастания фронта со стандартным резистором 16,2 Ом, с ферритовой бусиной 74279265 (типоразмер: 0603; ном. сопротивление: 600 Ом при 150 МГц), а затем с ферритовой бусиной 742792693 (типоразмер: 0603; ном. сопротивление: 2200 Ом при 100 МГц; на 150 МГц сопротивление равно примерно 1500 Ом).

Это устройство с максимальным сопротивлением на частоте звона позволяет наилучшим образом уменьшить не только амплитуду, но и продолжительность нежелательных колебаний (рис. 10), а его выбор не представляет особого труда и осуществляется с помощью соответствующих технических описаний.

На рисунке 11 показаны типовые частотные характеристики реактивного сопротивления, активного сопротивления и импеданса ферритовых бусин 74279265 (600 Ом) и 742792693 (2200 Ом). На всякий случай напомним, что на количество тепла, образующегося за счет преобразования высокочастотного сигнала, влияет активное (омическое) сопротивление.

Потери мощности и ее рассеивание

При управлении крутизной сигнала достигается некий компромисс между уменьшени-

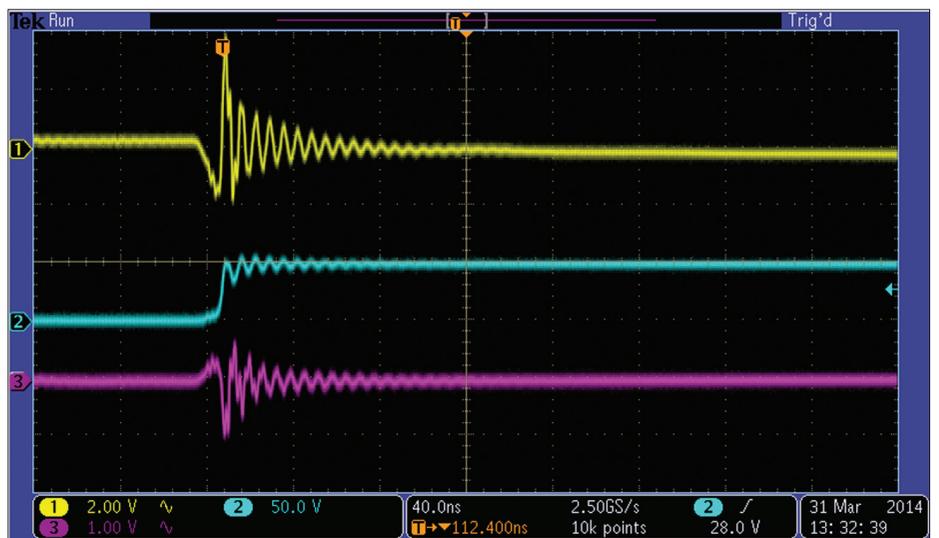


Рис. 8. Звон схемы демо-платы DC501A при использовании 600-Ом феррита 74279265 типоразмера 0603: $V_{IN} = 48 \text{ В}$; $V_{OUT} = 12 \text{ В}$; $I_{OUT} = 6 \text{ А}$. Кан. 1 = V_{IN} связан. по перем. току; кан. 2 — коммут. узел; кан. 3 = V_{OUT} AC

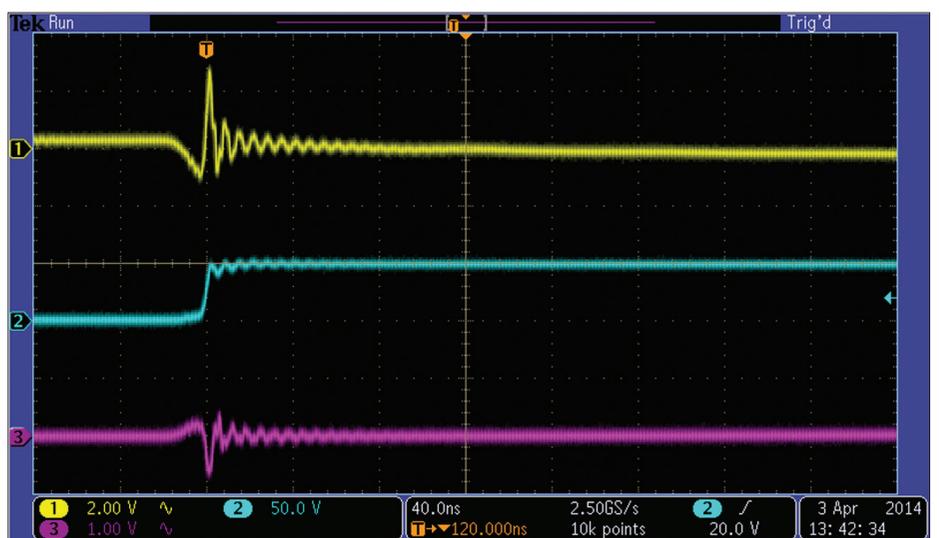


Рис. 9. Звон схемы демо-платы DC501A при использовании 2200-Ом феррита 74279263 типоразмера 0603: $V_{IN} = 48 \text{ В}$; $V_{OUT} = 12 \text{ В}$; $I_{OUT} = 6 \text{ А}$. Кан. 1 = V_{IN} связан. по перем. току; кан. 2 — коммут. узел; кан. 3 = V_{OUT} AC

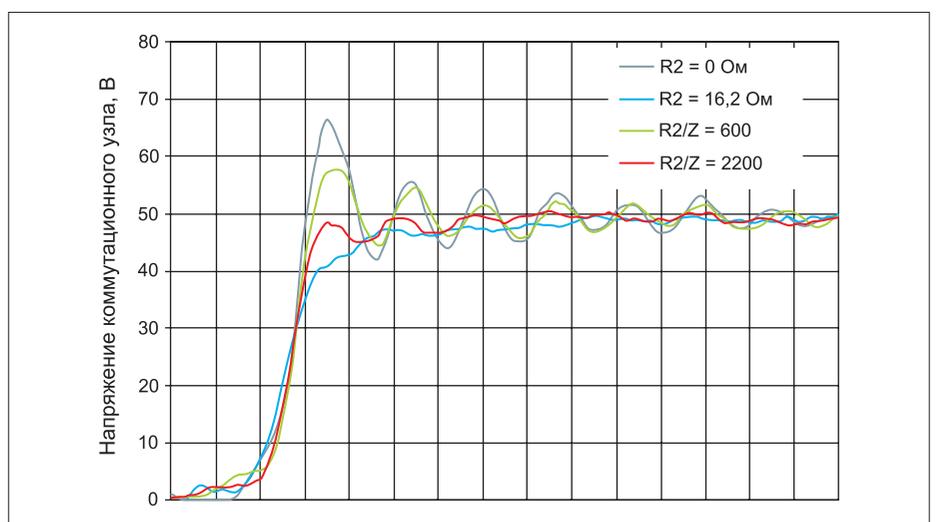


Рис. 10. Сравнение напряжений коммутационного узла

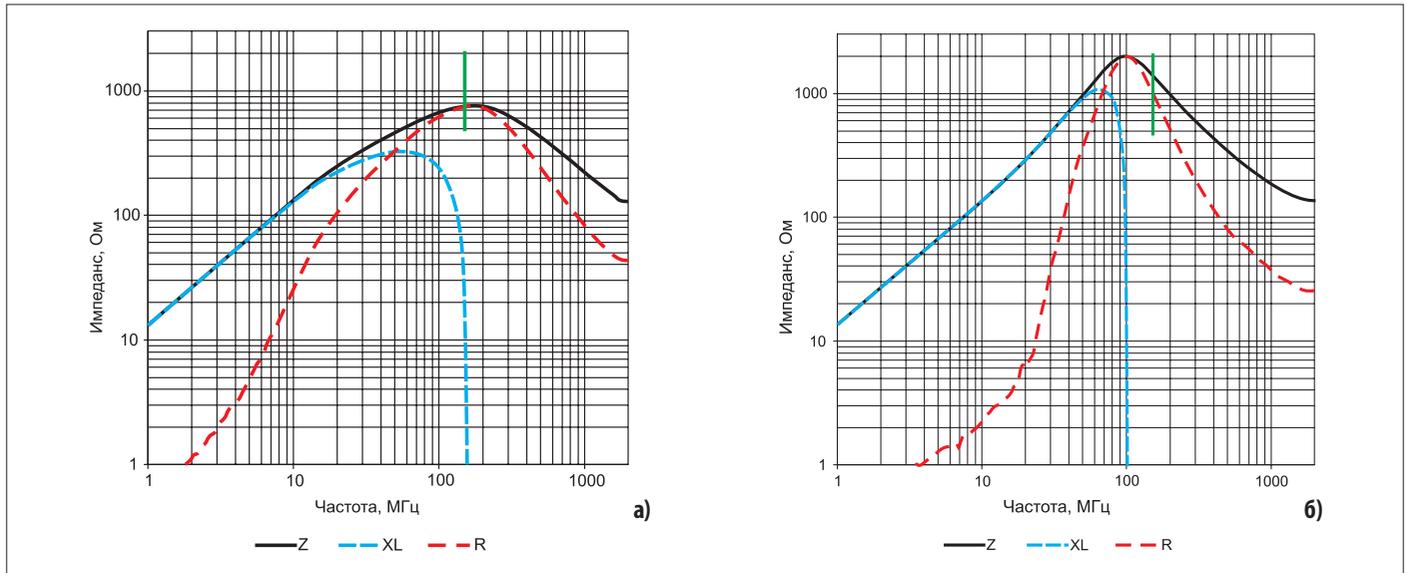


Рис. 11. Типовые частотные характеристики реактивного и активного сопротивлений, а также импеданса ферритовых бусин: а) 74279265 и б) 742792693

ем ЭМП и растущими потерями. Замедление скорости нарастания сигнала при переключении MOSFET может привести к перегреву этого ключа, снижению общей эффективности до неприемлемого уровня. В таблице 1 представлены значения входного тока и КПД рассматриваемой схемы без элемента управления крутизной сигнала, с подобранной величиной $R_2 = 16,2 \text{ Ом}$ и с двумя ферритовыми бусинами.

Несмотря на то, что для повышения электромагнитной совместимости потребовалось немного уменьшить КПД,

применение феррита с номинальным сопротивлением 2200 Ом имеет небольшое преимущество по эффективности ограничения скорости нарастания и уменьшения звона по сравнению с использованием резистора.

Анализ излучаемых помех

В этом разделе рассматривается соответствие излучаемых электромагнитных помех демо-платы DC501A стандарту EN55022 по ЭМС для ИТ-оборудования. На рисунках 12–15 представлены ча-

стотные развертки излучаемых ЭМП демо-платы DC501A для рассматриваемых четырех случаев: без ограничивающего элемента, с ограничивающим элементом R_2 , а также с использованием двух ферритовых бусин с разными сопротивлениями. На рисунке 16 сравниваются все указанные развертки, а в таблице 2 приводятся уровни излучаемых ЭМП в диапазоне 150 МГц в зависимости от используемых ограничивающих элементов.

В своей совокупности, развертки излучаемых ЭМП подтверждают данные, взятые

Таблица 1. Сравнение значений входного тока и КПД в зависимости от использования элементов управления крутизной сигнала

Резистор R_2	Входной ток, мА	Входное напряжение, В	Выходное напряжение, В	Выходной ток, мА	КПД, %
Толстопленочный шунт, 0 Ом	1600	48	12	6000	93,8
Толстопленочный $16,2\text{-Ом}$ резистор 0603	1614	48	12	6000	92,9
0603, 600-Ом феррит 74279265	1609	48	12	6000	93,2
0603, 2200-Ом феррит 742792693	1612	48	12	6000	93,1

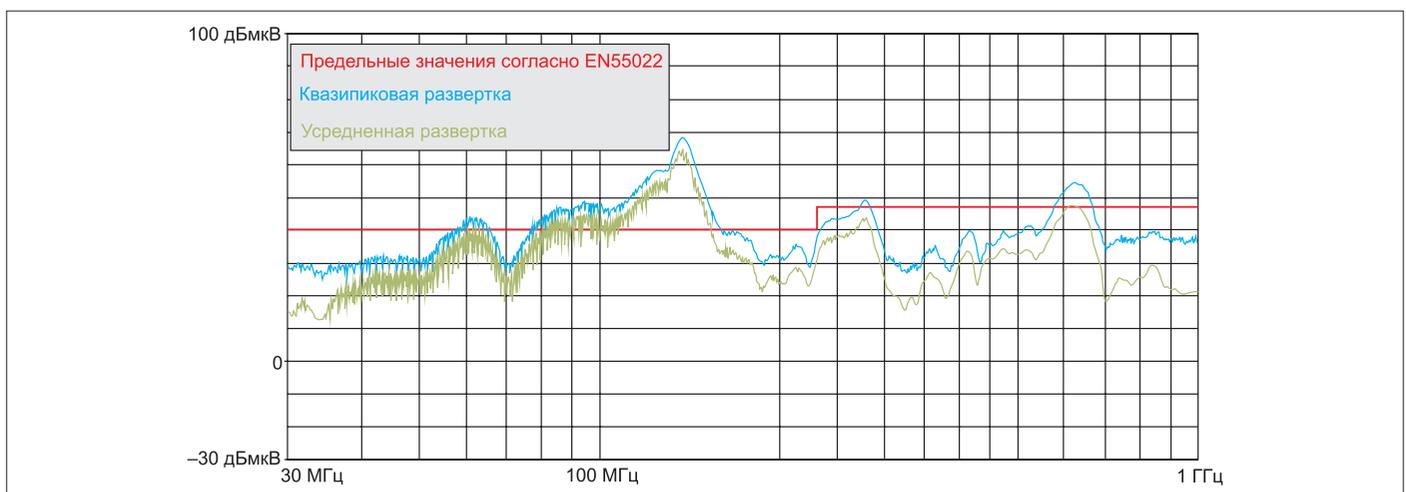


Рис. 12. Осциллограмма излучаемых ЭМП демо-платы DC501A без элемента управления крутизной сигнала: $V_{IN} = 48 \text{ В}$; $V_{OUT} = 12 \text{ В}$; нагрузка = 2 Ом

из частотной области: правильно подобранный резистор, установленный последовательно положительному выводу питания бутстрепной схемы, уменьшает квазипиковые и усредненные уровни излучаемых помех примерно на 10 дБмкВ, а ферритовая бусина с максимальным сопротивлением на основной частоте шума работает не хуже, а часто и лучше этого резистора.

Управление включением и выключением в драйверах затвора в нижнем плече

Управление скоростью нарастания фронтов импульсов осуществляется и с помощью выводов затвора других импульсных преобразователей. При этом необходимо учитывать положение ограни-

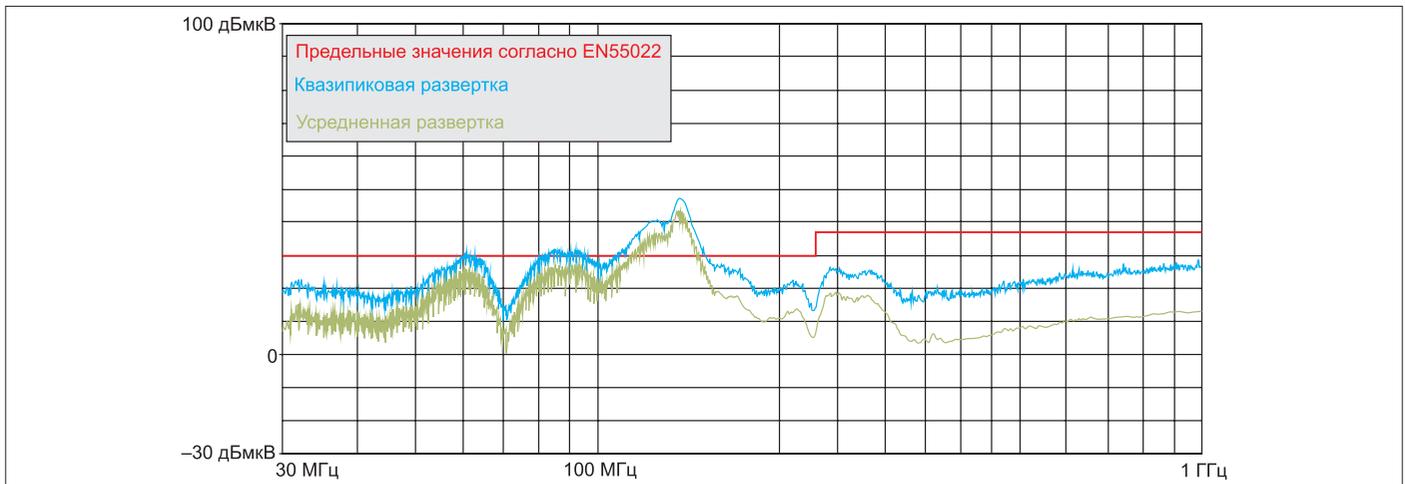


Рис. 13. Частотная развертка излучаемых ЭМП демо-платы DC501A с $R_2 = 16,2 \text{ Ом}$; $V_{IN} = 48 \text{ В}$; $V_{OUT} = 12 \text{ В}$; нагрузка = 2 Ом

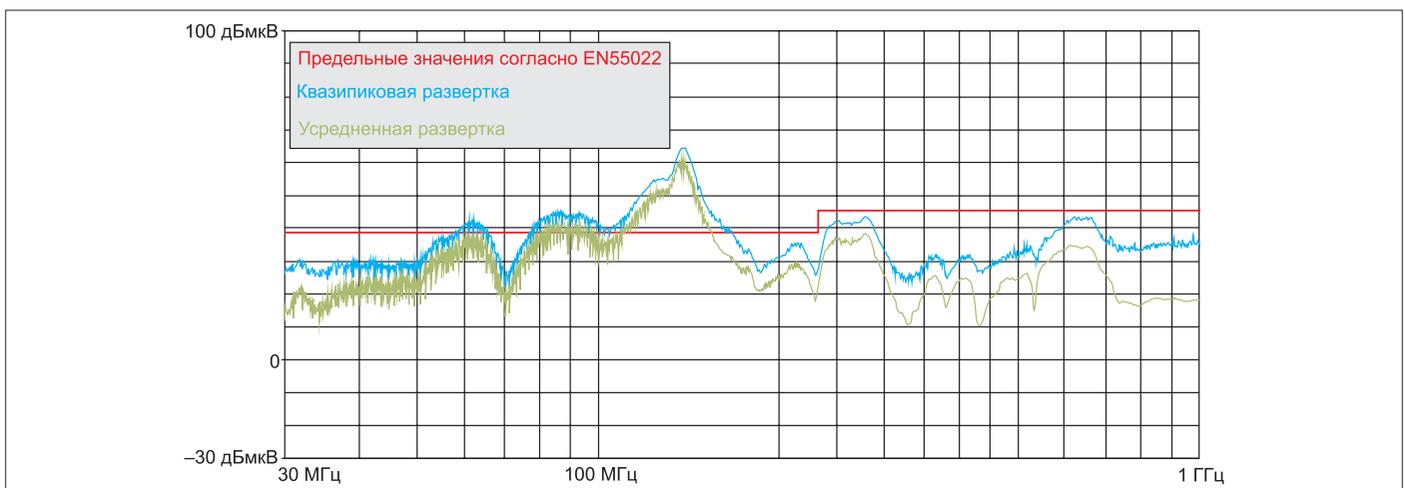


Рис. 14. Частотная развертка излучаемых ЭМП демо-платы DC501A с $R_2 = 600 \text{ Ом}$ и ферритом 0603; $V_{IN} = 48 \text{ В}$; $V_{OUT} = 12 \text{ В}$; нагрузка = 2 Ом

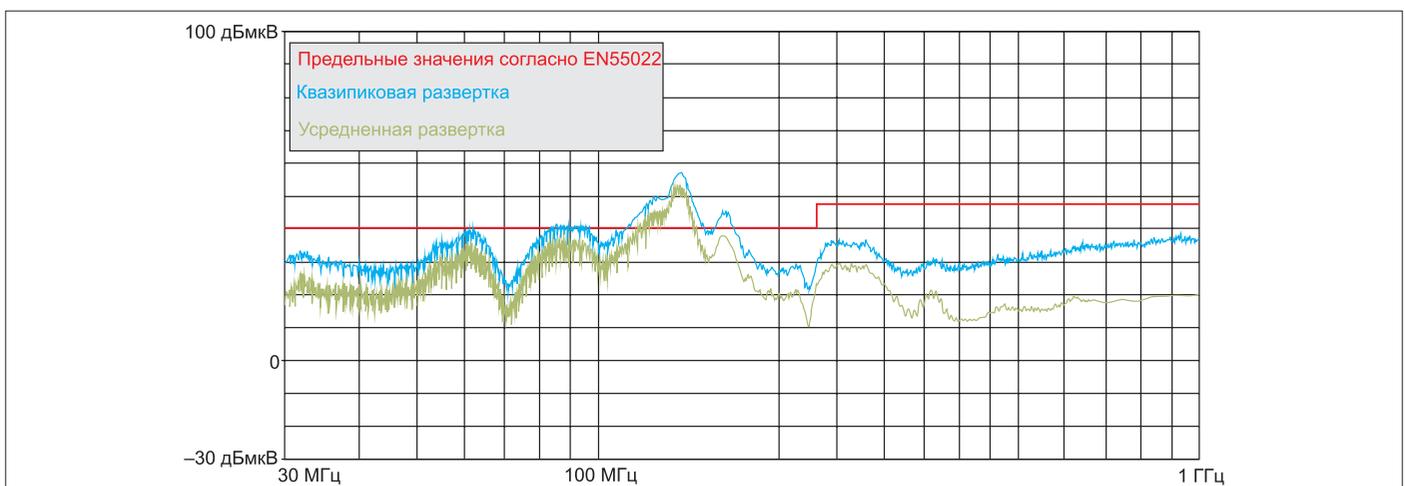


Рис. 15. Частотная развертка излучаемых ЭМП демо-платы DC501A с $R_2 = 2200 \text{ Ом}$ и ферритом 0603; $V_{IN} = 48 \text{ В}$; $V_{OUT} = 12 \text{ В}$; нагрузка = 2 Ом

Таблица 2. Уровни излучаемых ЭМП в диапазоне 150 МГц в зависимости от используемых элементов, ограничивающих скорость нарастания импульсов

Частота, МГц	R2 = 0		R2 = 16,2 Ом		R2 = 600 Ом, феррит 0603		R2 = 2200 Ом, феррит 0603	
	Квазипик., дБмкВ/м	Усредн., дБмкВ/м	Квазипик., дБмкВ/м	Усредн., дБмкВ/м	Квазипик., дБмкВ/м	Усредн., дБмкВ/м	Квазипик., дБмкВ/м	Усредн., дБмкВ/м
149,989	51,01	40,56	41,33	31,11	49,03	40,3	39,16	29,67
150,086	50,42	46,33	40,47	36,82	49,18	44,55	38,9	30,63
150,183	50,62	41,16	40,95	29,65	48,96	38,6	38,01	30,57

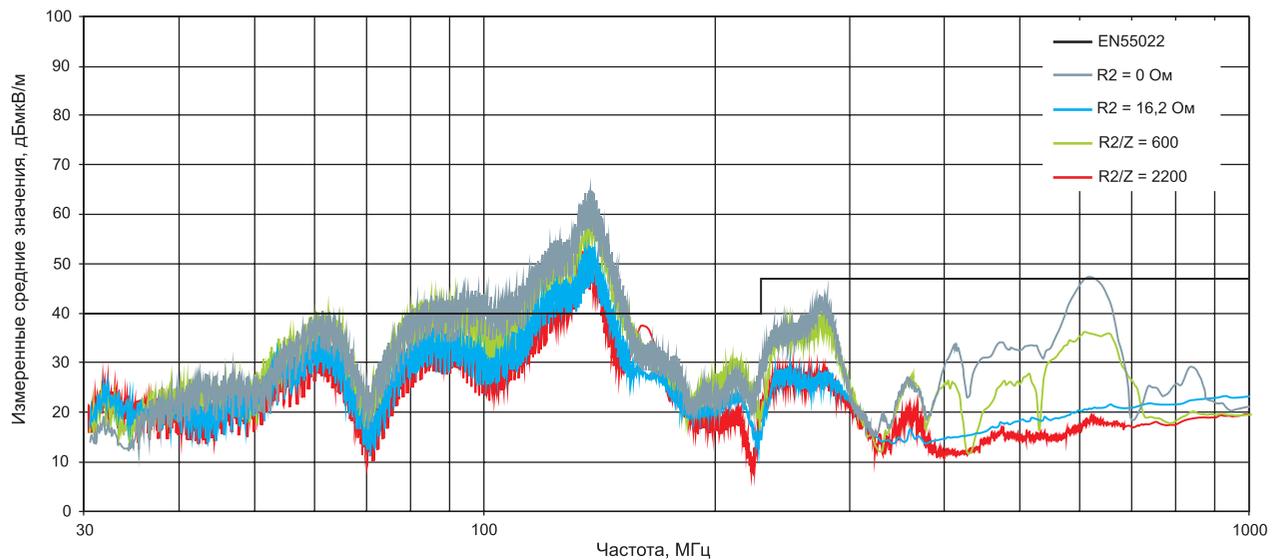


Рис. 16. Сравнение разверток излучаемых ЭМП при использовании платы DC501A

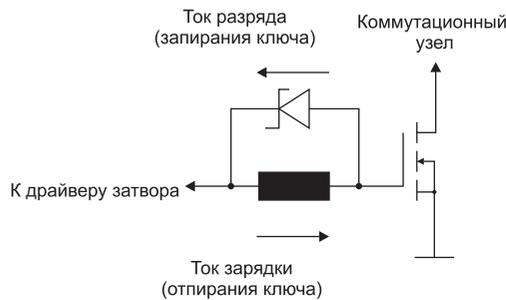


Рис. 17. Антипараллельный диод Шоттки обеспечивает управление включением, не оказывая влияния на выключение в цепях управления затвором ключей в нижнем плече

крутизной импульсов. При этом оба подключаются к затвору, как видно из рисунка 17.

Выводы

Ферритовые бусины, установленные последовательно бутстрепному выводу понижающего преобразователя, представляют собой эффективные компоненты по ограничению звона. Эти бусины ослабляют высокочастотный шум, не занимая большого места на печатных платах и не ухудшая эффективность решения. Их преимущества над резисторами заключаются в простоте выбора и малом времени тестирования. Несколько более высокая стоимость феррита 0603 по сравнению с толстоленочным резистором того же типоразмера компенсируется использованием более компактных, легких и недорогих фильтров на входах и выходах импульсных преобразователей. Снабберным схемам, установленным последовательно или параллельно коммутационным элементам, не приходится рассеивать достаточно большую мощность, что позволяет повысить эффективность, уменьшить рабочую температуру, стоимость решения и место, занимаемое на печатной плате. ■

чивающего элемента относительно затворов MOSFET и IGBT. К другим топологиям с ключами в верхнем плече относятся однотактный прямоходовый полумостовой и мостовой преобразователи. При их использовании необходимо устанавливать элемент управления затвором последовательно выводу положительного питания драйвера затвора с плавающей землей. Однако в каждой из этих топологий применяется также, по крайней мере, один ключ нижнего плеча, а в повышающих, обратнотходовых, прямоходовых и пушпульных

преобразователях используются только ключи нижнего плеча. Как правило, нарастающий фронт сигналов требует управления, а продолжительность спадающего фронта должна быть как можно меньше. Относительно малое количество управляющих ИС оснащено специализированным выводом для управления положительным выводом источника питания их драйверов ключей нижнего уровня, тогда как в большинстве случаев наилучшим решением является установка небольшого диода Шоттки параллельно элементу управления

Многослойные ферритовые элементы компании TDK EPCOS — эффективное и удобное решение проблемы ЭМС

ВЛАДИМИР РЕНТЮК
Rvk.modul@gmail.com

В целом ряде приложений катушки индуктивности являются незаменимыми элементами: они предназначены для накопления энергии в DC/DC-преобразователях и инверторах, в качестве элемента фильтров, в схемах развязки по питанию. И если в некоторых областях их уникальные свойства используются в полной мере, то в других, таких как фильтры подавления электромагнитных помех (ЭМП) и элементы развязки в цепях питания, их применение затруднено, а зачастую просто нецелесообразно. В первую очередь это связано с габаритами катушек, сложностью изготовления (в первую очередь из-за намотки микропроводами на замкнутом магнитопроводе) и, как следствие, с ценой. Тогда достойной заменой традиционным катушкам индуктивностей становятся специальные многослойные ферритовые элементы. В одних случаях они могут полностью заменить катушку, в других — служить ей эффективным дополнением.

Основа многослойных ферритовых элементов — это магнитомягкие материалы, которые отличаются низкой коэрцитивной силой, то есть намагничиваются до насыщения и перемагничиваются в относительно слабых магнитных полях. После перемагничивания они не проявляют магнитных свойств, так как состоят из хаотически ориентированных намагниченных до насыщения областей — доменов. Магнитомягкие материалы, названные ферритами и ставшие основой рассматриваемых многослойных ферритовых элементов, были разработаны в 1930 году (запатентованы в 1933-м) двумя японскими учеными — доктором Йогоро Като (Dr. Yogoro Kato) и доктором Такеши Такеи (Dr. Takeshi Takei) из токийского Технологического института (рис. 1) [1]. Эти революционные материалы, благодаря которым был достигнут существенный прорыв сначала в радиотехнике, электротехнике, а затем и в электронике, представляют собой смесь оксида железа Fe_2O_3 с оксидами других металлов, например Mn, Zn, Ni, Mg, Co, Cu. В 2009 году открытие и применение феррита было признано IEEE ключевым историческим достижением в электротехнической и электронной технике, которое оказало устойчивое и значительное влияние на промышленность и общество.

Первой в мире эти материалы начала использовать специально основанная Кензо Сайто (Kenzo Saito) в 1935 году компания Tokyo Denkikagaku Kogyo KK (TDK Electronics Company, Ltd), ныне известная как TDK Corporation. С тех пор компания TDK остается одним из ведущих производителей, успешно работающих в этой области. Ее позиции по выпуску элементов из ферритовых материалов значительно усилились в 2008 году после приобретений 90% акций еще одной известной компании EPCOS AG (Electronic Parts and Components).

В общем случае ферритовые чип-элементы, заменяющие в ряде приложений традиционные катушки индуктивности, изготавливаются путем спекания листов ферритового материала с нанесенными на них проводниками, образующими своеобразную обмотку (рис. 2).

Считать данные элементы катушками индуктивности некорректно — по своей природе они больше соответствуют таким хорошо известным элементам, используемым для подавления ЭМП, как фер-



Рис. 1. Изобретатели ферритов Йогоро Като и Такеши Такеи

ритовые бусинки (в англ. терминологии их часто называют bead — «бусинка»), но отличаются от них наличием ярко выраженной индуктивной составляющей импеданса, проявляющейся на низких частотах. Кроме того, их применение на печатных платах значительно удобнее, особенно когда дело касается автоматического монтажа, поскольку рассматриваемые многослойные ферритовые элементы по-

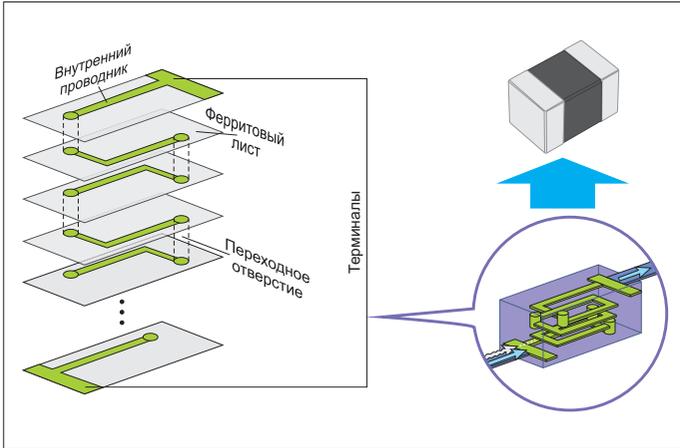


Рис. 2. Пример традиционного исполнения многослойной ферритовой структуры в виде чип-элемента поверхностного монтажа

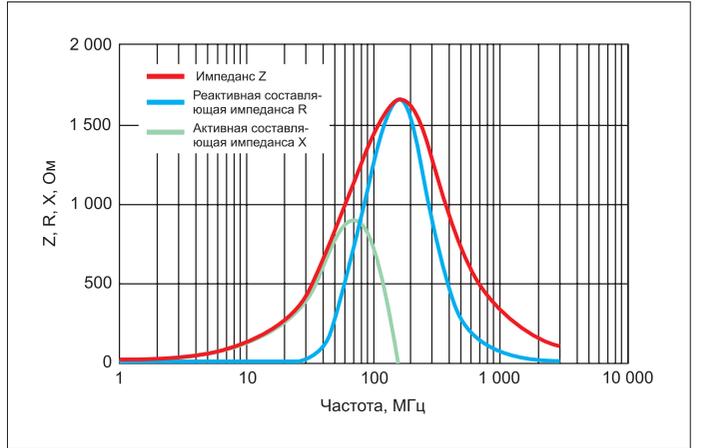
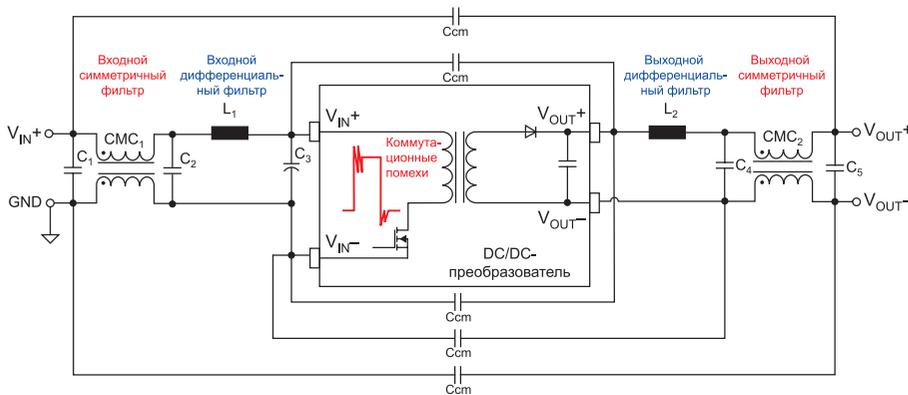
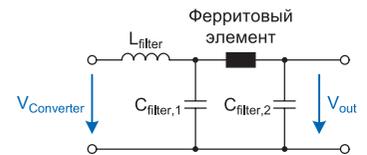


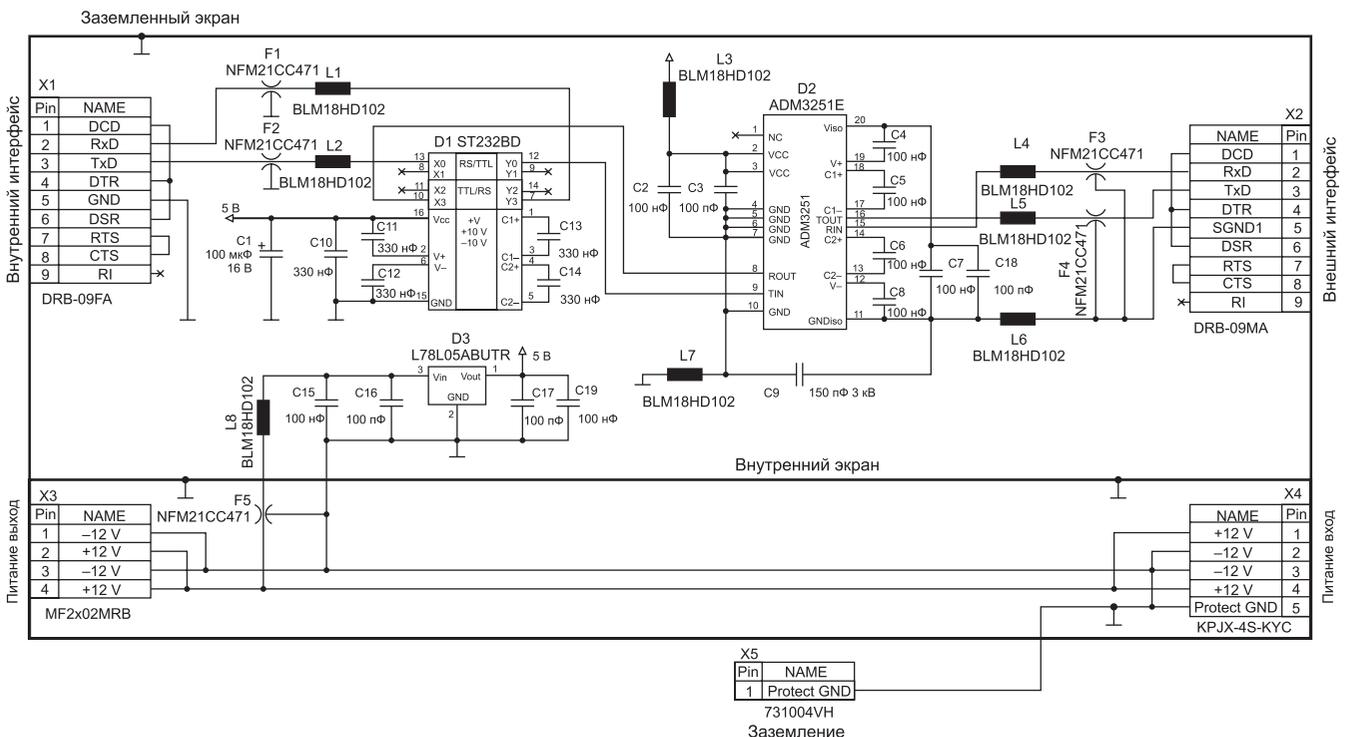
Рис. 3. Частотные характеристики типичного многослойного ферритового элемента



а) Полное решение по подавлению ЭМП DC/DC-преобразователя, используемого для питания чувствительных к ЭМП каскадов (многослойные ферритовые элементы — L1, L2)



б) Двухкаскадный выходной фильтр для подавления пульсаций и помех DC/DC-преобразователя с добавочным ферритовым элементом



в) Практическая схема блока изолированного интерфейса RS-232 с минимизированным уровнем излучаемых и кондуктивных ЭМП (многослойные ферритовые элементы — L1–L8)

Рис. 4. Практические примеры применения многослойных ферритовых элементов

ставляются и монтируются аналогично чип-конденсаторам с тем же температурным профилем и мерами предосторожности.

Отличительная черта и высокая эффективность использования многослойных ферритовых элементов связана с поведением их импеданса. Импеданс (Z), который является основной характеристикой этих элементов, представляет собой комбинированное реактивное сопротивление (X) и активное сопротивление (R). Компоненты реактивности доминируют в низкочастотном диапазоне и функционируют как катушки индуктивности, отражая ЭМП. На более высоких частотах из-за роста потерь на перемагничивание сопротивление возрастает, и элементы действуют как активное сопротивление, которое преобразует ЭМП в тепло, поглощая ее. Именно такой характер рассматриваемых элементов не позволяет приравнивать их к традиционной индуктивности, а параметры элемента задаются не в единицах индуктивности, а как зависимость его сопротивления от частоты. На рис. 3 показаны частотные характеристики импеданса типового многослойного ферритового элемента.

Основная область применения описанных элементов — подавление дифференциальных электромагнитных помех, которые по своей природе являются наиболее критическими с точки зрения обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) технических средств. Причем этот аспект не только и не столько внешних воздействий, а именно устранения дифференциальных ЭМП помех внутри радиоэлектронной аппаратуры. Для этого многослойные ферритовые элементы устанавливаются на цепи питания, блокируя помехи, присутствующие DC/DC-преобразователям, причем как по входу, так и по выходу (в данном случае они могут дополнять катушки индуктивности), что зависит от топологии конкретного преобразователя. Иногда эти элементы используются на выходе усилителей класса D, на шинах тактовой частоты и на линиях связи высокоскоростных интерфейсов (в этом случае они, как правило, используются вместе с синфазными дросселями). Что касается интерфейсов в целом, то наиболее часто они применяются на линиях передачи питания, например USB. В последнее время, благодаря расширению эффективной полосы частот и расширению рабочего температурного диапазона, многослойные ферритовые элементы находят применение в смартфонах, планшетах, ноутбуках, ресиверах цифрового телевидения, а также в интеллектуальных сенсорных сетях и промышленном оборудовании. Кроме того, они распространены в оборудовании для закрытых каналов связи, чувствительном к использующим высокоскоростные сигналы устройствам LTE и Wi-Fi большого радиуса действия. Такие элементы находят применение в выходных каскадах передатчиков и в специальном исполнении, как ограничители бросков тока. Примеры основных решений, в которых установлены рассматриваемые элементы можно найти в [2–4], часть из типовых применений приведена на рис. 4.

В последнее время разработчики радиоэлектронной аппаратуры столкнулись с новыми проблемами. Дело в том, что в современных смартфонах и планшетах стало крайне сложно решать задачи ЭМС. Эти устройства не только содержат антенны и приемопередатчики для предоставления услуг 3G и 4G в компактной геометрии, но и предлагают все большее количество дополнительных функций, в частности WLAN, Bluetooth и GPS, а кроме того, имеют в своем составе видеокамеры и дисплеи с высоким разрешением. С точки зрения ЭМС это означает, что все они используют сигналы, которые лежат в диапазоне гигагерцевых частот и создают соответствующие им еще более высокочастотные гармоники. Результатом является более сложная электромагнитная обстановка с более высокими уровнями наведенных и излучаемых ЭМП (рис. 5) [5]. Таким образом, насущной и важной проблемой стало подавление ЭМП в области 1 ГГц и выше.

Поскольку приемные и передающие антенны оказываются расположенными очень близко друг к другу, ЭМП от генерируемых внутренних сигналов в устройстве мобильной связи может серьезно повлиять на производительность других составных частей смартфона. Даже низкий наведенный уровень на входе передатчика способен вызвать значительное увеличение входной мощности в антенне, что снижает чувствительность приема. Это может стать

проблемой в местах, где сигнал базовой станции ослаблен, и даже сделать его прием невозможным. Аналогичные проблемы касаются не только смартфонов, которые приведены здесь исключительно в качестве наглядного примера, но и медицинского беспроводного оборудования, сенсоров беспроводных сетей, промышленного оборудования, устройств «Интернета вещей» — то есть всех сфер, которые используют несколько высокочастотных протоколов беспроводной связи.

Количество диапазонов частот, поддерживаемых в таких устройствах, тоже создает дополнительные проблемы. Поскольку для каждой полосы частот необходимо подавление ЭМП, количество компонентов, обеспечивающих выполнение требований в части ЭМС, соответственно увеличивается, что затрудняет удовлетворение спроса на все более миниатюрные и легкие устройства. Чтобы уменьшить количество нужных компонентов и занимаемое ими пространство, для решения проблемы ЭМС разработчики такой аппаратуры ищут очень компактные компоненты, которые при сохранении эффективности могут охватывать заданный широкий диапазон частот.

Для того чтобы соответствовать требованиям ЭМС в беспроводных и проводных устройствах следующего поколения, компания TDK расширила свою линейку многослойных ферритовых элементов тремя новыми типами [6]:

1. MMZ-1005V — предлагает самый высокий импеданс в мире в диапазоне 1 ГГц.
2. MPZ-1005E — отличается низким сопротивлением по постоянному току, высоким рабочим током и высоким импедансом.
3. MMZ-0603E — представляет собой миниатюрный вариант элемента MMZ-1005E с несколько меньшим рабочим током.

Предлагаемые компанией ферритовые элементы, выпускаемые под торговой маркой Gigaspira®, благодаря широкому диапазону частот могут обеспечить эффективное подавление ЭМП в нескольких частотных диапазонах всего одним таким чипом. Ферритовые элементы Gigaspira достигли более высокого импеданса в более широкой области частот вследствие применения запатентованной компанией TDK инновационной многослойной структуры и собственных разработок в области ферритовых материалов и технологий.

На рис. 6 показана внутренняя конфигурация традиционных многослойных ферритовых элементов и ее отличие от чипов, выполненных по технологии Gigaspira. В стандартном чипе компоненты проводника, представляющего своеобразную катушку индуктивности (L) и паразитную емкость (C) между внутренними проводниками и внешними электродами, образуют

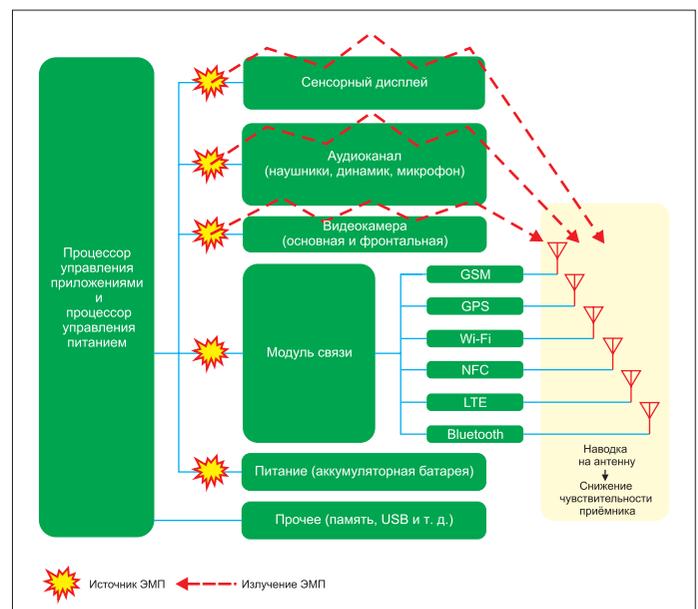


Рис. 5. Типичные проблемы ЭМС на примере смартфона

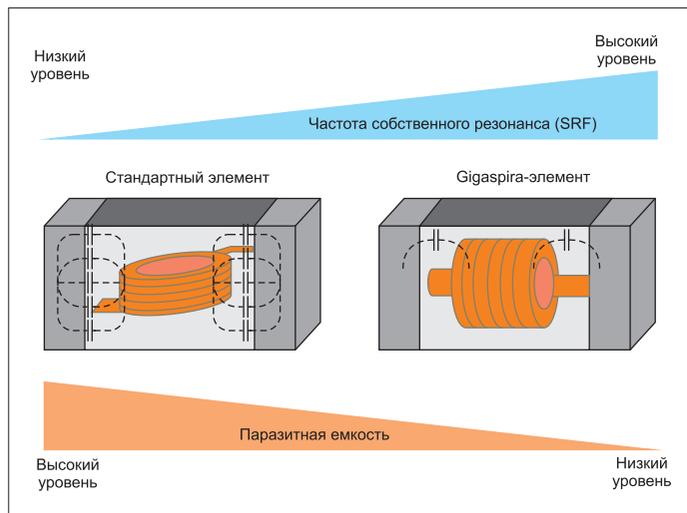


Рис. 6. Отличие технологии Gigaspira от традиционного исполнения многослойных ферритовых элементов

колебательный контур с частотой собственного резонанса, определяемой как:

$$f_{SRF} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Импеданс параллельного колебательного контура в диапазоне частот выше частоты собственного резонанса (Self-resonant frequency, SRF), как известно, резко уменьшается, следовательно, и помехоподавляющие свойства элемента падают. Собственная емкость традиционных ферритовых элементов связана с ориентацией их внутренних проводников, которые выполняются параллельно плоскости элемента, что приводит к паразитной емкости между выводами (терминалами) и каждым слоем (витком) внутреннего проводника. Поскольку паразитная емкость такого конструктивного исполнения многослойного ферритового элемента достаточно велика, то его собственная частота резонанса оказывается сдвинутой в область относительно низких частот. В отличие от традиционного исполнения внутренних проводников, в технологии Gigaspira от компании TDK они реализованы перпендикулярно плоскости основания и экранированы от терминалов магнитным материалом, что позволяет значительно уменьшить суммарную паразитную емкость и тем самым сдвинуть частоту собственного резонанса в область относительно более высоких частот (рис. 7) [6].

Дополнительным преимуществом продольной ориентации обмотки является то, что она предоставляет возможность увеличивать количество витков катушки и, следовательно, по сравнению с традици-

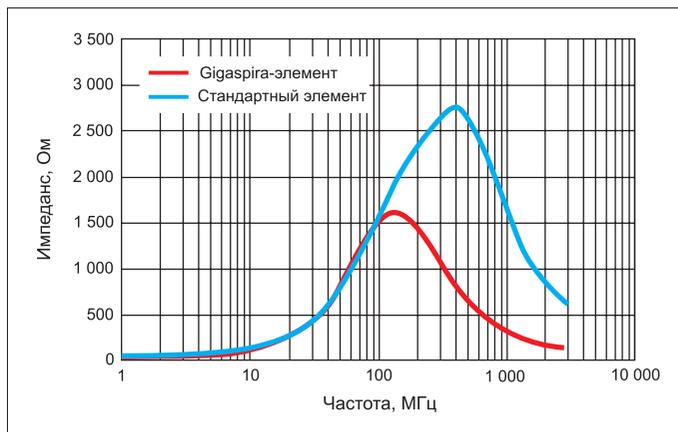


Рис. 7. Связь внутренней конфигурации с резонансной частотой (SRF)

онной технологией, достичь более высокого импеданса. Повышение импеданса в высокочастотном диапазоне и позволяет подавлять ЭМП там, где стандартные элементы были бы неэффективны. В итоге многослойные ферритовые элементы Gigaspira представляют собой высокоэффективные компоненты для решения проблем ЭМС в смартфонах и других мобильных устройствах, которые используют различные полосы частот связи. Результаты измерения уровня подавления ЭМП подтверждают превосходный эффект от применения компонентов технологии Gigaspira (рис. 8).

Благодаря специальной конструкции катушек ферритовые элементы технологии Gigaspira компании TDK имеют более высокие значения импеданса, причем в очень широком частотном диапазоне по сравнению с традиционными компонентами, а потому обеспечивают гораздо лучшее подавление ЭМП. В таблице приведена подборка семейств MMZ и MPZ многослойных ферритовых элементов компании TDK, которая поможет разработчику сориентироваться в их многообразии и упростит выбор. Полная информация по коммерчески доступной номенклатуре и характеристикам описанных в настоящей статье компонентам доступна на сайте компании по ссылке [7] и у ее авторизованных дилеров.

В 1935 году компания TDK со своим первым инновационным продуктом — ферритовым материалом под названием «оксидные кольца» для использования при изготовлении трансформаторов и катушек индуктивности стала первой компанией в мире, начавшей работать в области практического применения ферритов. С самого начала деятельности приоритетом компании стали инновационные разработки в области улучшения потребительских свойств ферритовых материалов и поиск новых областей их практического применения в электронной технике. В настоящее время компания является одним из крупнейших в мире производителей электронных компонентов,

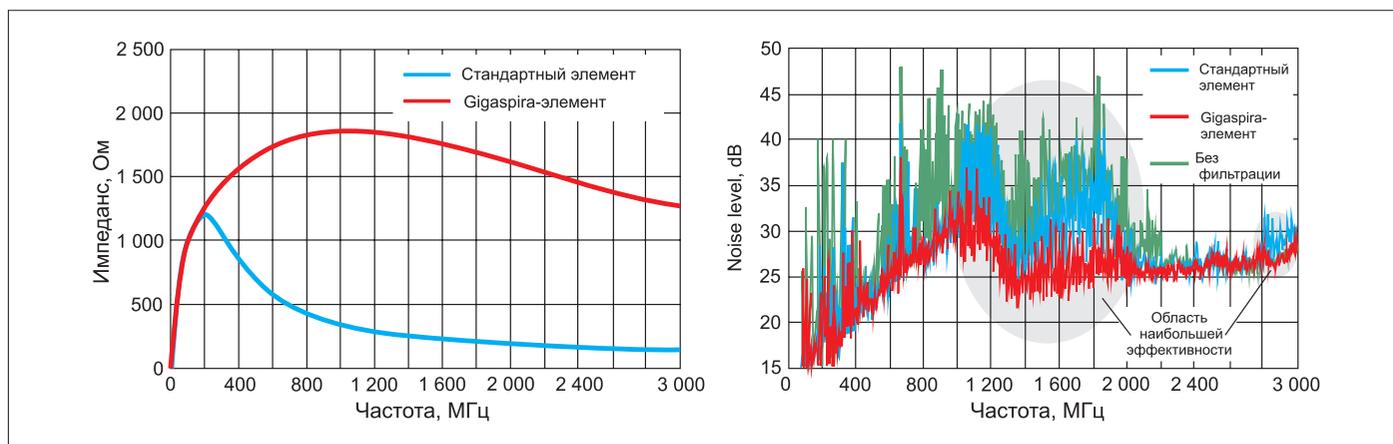


Рис. 8. Подавление ЭМП ферритовыми элементами Gigaspira компании TDK по сравнению с традиционными

Таблица. Основные характеристики многослойных ферритовых элементов семейства MMZ и MPZ компании TDK

Категория		EIA 01005	EIA 0201	EIA 0402	EIA 0603	EIA 0805
Сигнальные линии	Стандартные	MMZ0402 10–240 Ом (100 МГц) 200–750 мА	MMZ0603 10–600 Ом (100 МГц) 100–1000 мА	MMZ1005 10–1800 Ом (100 МГц) 100–550 мА	MMZ1608 3–2500 Ом (100 МГц) 200–1500 мА	MMZ2012 15–2000 Ом (100 МГц) 400–1500 мА
	Малое DC-сопротивление	–	MMZ0603-H 80–1000 Ом (100 МГц) 200–520 мА	MMZ1005-H 80–1000 Ом (100 МГц) 360–800 мА	–	–
	Подавление ВЧ-помех	–	MMZ0603-E 33–1000 Ом (100 МГц) 200–2300 Ом (1 ГГц) 125–250 мА	MMZ1005-E 47–2200 Ом (100 МГц) 800–5000 Ом (1 ГГц) 150–300 мА	–	–
	Высокое подавление ВЧ-помех	–	MMZ0603-V 56 Ом (100 МГц) 500 Ом (1 ГГц) 125 мА	MMZ1005-V 75–180 Ом (100 МГц) 500–1200 Ом (1 ГГц) 150–250 мА	–	–
Шины питания	Стандартные	MPZ0402 10–33 Ом (100 МГц) 550–1100 мА	MPZ0603 22–47 Ом (100 МГц) 500–1000 мА	MPZ1005 10–120 Ом (100 МГц) 1200–3000 мА	MPZ1608 26–1000 Ом (100 МГц) 800–6000 мА	MPZ2012 30–1000 Ом (100 МГц) 1500–6000 мА
	Малое DC-сопротивление	–	–	MPZ1005-H 33–120 Ом (100 МГц) 2000–3000 мА	–	–
	Подавление ВЧ-помех	–	–	MPZ1005-E 33–330 Ом (100 МГц) 200–800 Ом (1 ГГц) 450–1500 мА	–	–
	Высокое подавление ВЧ-помех	–	–	MPZ1005-V/N 10–30 Ом (100 МГц) 60–170 Ом (1 ГГц) 600–1200 мА	–	–

Примечание: EIA — типоразмер в дюймах; в обозначении MMZ указан их метрический размер (пример расшифровки: 0402 = 0,4×0,2 мм)

который имеет свыше 130 офисов и заводов более чем в 30 странах по всему миру.

Описанные компоненты доступны от авторизованного дилера TDK Corporation, компании «Промэлектроника» — одного из крупнейших складов электронных компонентов в Российской Федерации. Оптовые и розничные поставки указанных в настоящей статье компонентов осуществляются со склада и под заказ [8, 9].

Литература

1. www.global.tdk.com/ir/ir_library/annual/2016/html/abouttdk/1/index.html
2. Робертс С. Решения проблемы пульсаций и помех DC/DC-преобразователей: входная и выходная фильтрация // Компоненты и технологии. 2015. № 8.
3. Рентюк В. Проблемы влияния выходного фильтра на контур управления, или Как фильтровать выходное напряжение без потерь // Компоненты и технологии. 2018. № 7.
4. Рентюк В. Организация питания промышленных компьютеров от шин напряжения постоянного тока // Компоненты и технологии. 2015. № 2.
5. Gigaspira Beads MMZ-E, MMZ-V & MPZ-E series. www.product.tdk.com/info/en/techlibrary/archives/techjournal/vol21_mmz/index.html
6. Effective EMC solution with a single component. www.en.tdk.eu/tdk-en/373562/tech-library/articles/applications--cases/applications--cases/effective-emc-solution-with-a-single-component/993434
7. www.product.tdk.com/info/en/products/emc/emc/beads/index.html
8. www.promelec.ru/search/?search=MPZ&st=2
9. www.promelec.ru/search/?search=MMZ&st=2

Компания IC-Contact представляет широкую линейку компонентов для защиты от перенапряжений



- Газонаполненные разрядники различных типов;
- Metalloksidnye varistors monolitnye i mnogosloynnye;
- КераДиоды (CeraDiode®) — полупроводниковые компоненты для защиты от электростатических разрядов (ESD-защита). Экономически и технически более эффективная альтернатива для супрессоров и стабилитронов.



www.ic-contract.ru
info@ic-contract.ru
тел.: (343) 372-92-30



ГРУППА КОМПАНИЙ
ПРОМЭЛЕКТРОНИКА

Керамические помехоподавляющие конденсаторы и фильтры нижних частот АО «НИИ «Гириконд»

Владимир СМИРНОВ
к.т.н., с.н.с., vladfs2014@yandex.ru,
Алевтина ШАЛАЕВА
352@giricond.ru,
Антон ХАРИТОНОВ
kharitonovbonch@gmail.com

В статье рассматриваются особенности конструкций, параметры керамических помехоподавляющих конденсаторов и фильтров нижних частот производства АО «НИИ «Гириконд», применяемых для обеспечения электромагнитной совместимости электронного и электротехнического оборудования. Особое внимание уделяется новым опорным конденсаторам К10-85, малогабаритным фильтрам Б27 и Б30 и фильтрам для поверхностного монтажа Б33.

АО «НИИ «Гириконд» является разработчиком и поставщиком помехоподавляющих изделий, используемых в качестве элементной базы для обеспечения требуемой электромагнитной совместимости (ЭМС) радиоэлектронной аппаратуры.

Наиболее опасными среди помех разного рода являются кондуктивные помехи, распространяющиеся в проводящих цепях питания, управления, коммутации, а также в цепях полезных сигналов. Для фильтрации таких помех служат помехоподавляющие фильтры нижних частот (ФНЧ), которые включаются между источником помехи и аппаратурой или участками схемы, которые необходимо защитить от этих помех. Критерием эффективности помехоподавления фильтров служит их основной параметр — вносимое затухание (А) и амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) этого параметра. Крутизна АЧХ, как правило, определяется скоростью увеличения А на декаду частоты — дБ/декаду.

ФНЧ состоят из емкостных (конденсаторы) и индуктивных элементов, соединенных между собой в определенной последовательности (рис. 1).

Приведенные далее АЧХ фильтров были получены с использованием измерителей комплексных коэффициентов передачи типа «Обзор». Эти приборы предназначены для измерения комплексных S-параметров. Вносимому затуханию соответствует комплексный коэффициент передачи S_{21} , определяемый как отношение напряжения выходного сигнала к напряжению входного сигнала.

АО «НИИ «Гириконд» выпускает керамические помехоподавляющие конденсаторы К10-81 и ФНЧ Б24, Б25, Б26 категорий качества ОТК и ВП; конденсаторы К10-85 и ФНЧ Б27 и Б30 на данный момент выпускаются пока только с приемкой ОТК. В конце 2017 г. планируется завершить разработку фильтров Б33 для поверхностного монтажа.

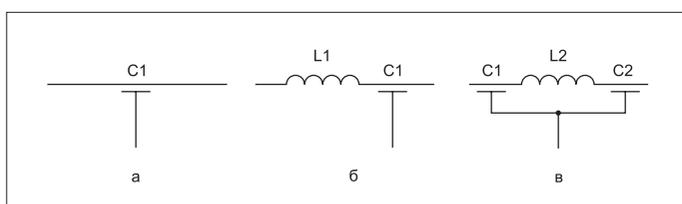


Рис. 1. Электрические схемы ФНЧ: а) С-тип; б) LC-тип; в) л-тип

Конденсаторы К10-81

Конструкция конденсаторов приведена на рисунке 2. Чередующиеся слои керамического диэлектрика и электродов, отдельные слои которых соединены параллельно, образуют емкость между внутренней и внешней контактными поверхностями. Коаксиальная конструкция и параллельное соединение электродов обеспечивают значения собственной индуктивности ниже, чем у конденсаторов других типов, и большую частоту собственного резонанса. У конденсаторов — высокое вносимое затухание на частотах до 10 ГГц и выше. Конденсаторы монтируются пайкой наружной контактной поверхности к заземленной плоской металлической или металлизированной плате или в ее соответствующие углубления. Сквозь внутреннее отверстие конденсатора пропускается проходной вывод, припаяваемый к внутренней контактной поверхности. Таким образом, конденсатор с припаянным проходным выводом является фильтром С-типа (рис. 1а) с тремя выводами. В таблице 1 приведены размеры конденсаторов.

Конденсаторы представлены широким рядом емкостей в диапазоне 4,7 пФ...10 мкФ, разными группами температурной стабильности (МПО, Н20, Н50 и Н90), а также имеют широкую линейку напряжений: 50, 100, 160, 250, 350, 500, 750 и 1000 В. Максимальные значения проходных токов: 15 А для внутреннего отверстия 1,3 мм, диаметр вывода

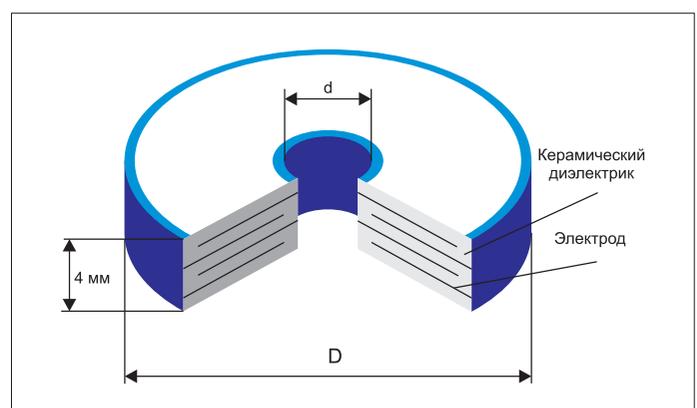


Рис. 2. Конструкция конденсаторов К10-81

Таблица 1. Габаритные размеры К10-81

Типоразмер	Диаметр, мм	
	Внешний (D)	Внутренний (d)
1	4 ±0,5	1,3 ±0,3
2	5 ±0,5	1,3 ±0,3
3	6,3 ±0,5	1,3 ±0,3
4	8 ±0,6	1,3 ±0,3
5	8 ±0,6	2,5 ±0,3
6	10 ±0,6	1,3 ±0,3
7	10 ±0,6	2,5 ±0,3
8	12 ±0,6	1,3 ±0,3
9	12 ±0,6	2,5 ±0,3

1 мм; и 25 А для внутреннего отверстия 2,5 мм, диаметр вывода 2 мм. Конденсаторы К10-81 используются в качестве емкостных элементов опорных конденсаторов К10-85 и ФНЧ Б25, Б26.

Опорные конденсаторы К10-85

Для подавления помех, распространяющихся в цепях питания, управления и коммутации, применяются блокировочные конденсаторы, назначение которых состоит в блокировании помехи путем ее замыкания на корпус аппаратуры — «землю». Опорные конденсаторы — это помехоподавляющие конденсаторы, которые конструктивно имеют опорный вывод, обеспечивающий малую индуктивность соединения одного из электродов конденсатора с корпусом аппаратуры.

В 1950-е гг. НИИ «Гириконд» разработал дисковые керамические опорные конденсаторы КДО и трубчатые опорные конденсаторы КО, которые до последнего времени выпускались заводом «Номинал» на Украине. В связи с прекращением поставок встал вопрос об их замещении. Максимальная номинальная емкость КДО составляет 2200 пФ. Максимальная номинальная емкость конденсаторов КО тоже небольшая — 4700 пФ. Эти конденсаторы не обеспечивают эффективное помехоподавление в области низких частот. С использованием преимуществ конденсаторов К10-81 для замены КДО и КО были разработаны опорные конденсаторы К10-85 [3–4]. Внешний вид конденсаторов показан на рисунке 3.

К полюсу корпусу, выполненному из латуни с серебряным гальваническим покрытием, припаян шайбовый конденсатор (рис. 2). К внутренней контактной поверхности конденсатора припаян проволочный вывод диаметром 1 мм. Корпус с резьбой является вторым (опорным) выводом. Таким образом, шайбовые конденсаторы используются не как проходные, а как стандартные конденсаторы с двумя выводами. При этом они сохраняют свои преимущества: имеют большую емкость, малую собственную индуктивность и максимальную частоту собственного резонанса. В отличие от конденсаторов в проходном режиме, АЧХ вносимого затухания конденсаторов К10-85 имеет явно выраженный резонанс (рис. 4).

Конденсаторы представлены следующими группами температурной стабильности: МП0, Н20 и Н50. Материалы группы Н90 для конденсаторов не использовались из-за большой их нестабильности при воздействии температуры и рабочего напряжения. Номинальные емкости находятся в диапазоне 4,7 пФ...0,33 мкФ. Линейка номинальных напряжений представлена следующими значениями: 250, 500, 750 и 1000 В. Конденсаторы с номинальным напряжением 250 В имеют малогабаритный корпус с резьбой М4 и массой не более 1,5 г.

Значения резонансной частоты и вносимого затухания в зависимости от номинальной емкости приведены в таблице 2. Минимальное значение резонансной частоты составляет 4,4 МГц, максимальное — 1100 МГц при вносимом затухании 30–60 дБ, что значительно расширяет диапазон частот помехоподавления по сравнению с опорными конденсаторами КДО и КО.

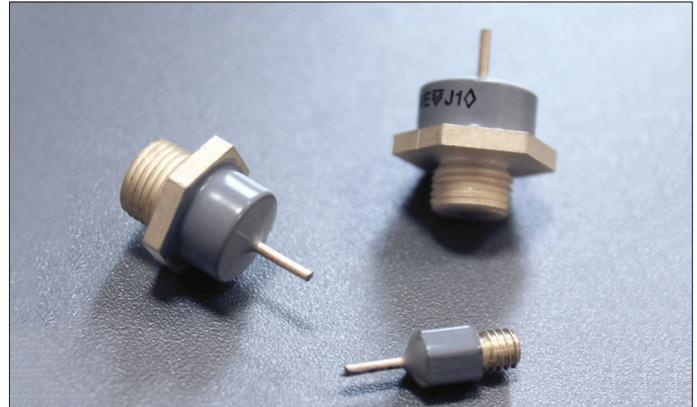


Рис. 3. Внешний вид конденсаторов К10-85

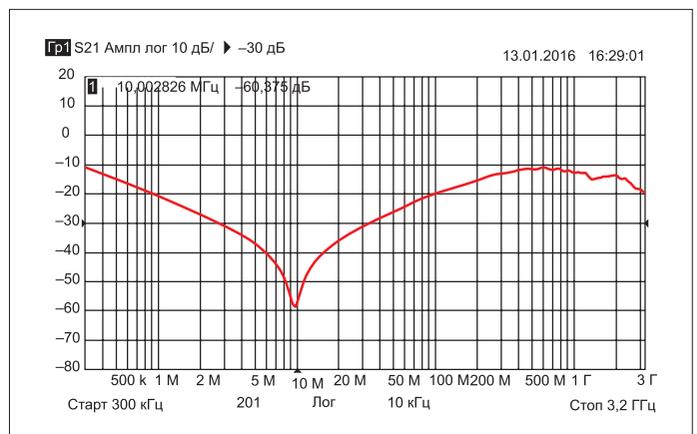


Рис. 4. АЧХ вносимого затухания конденсаторов К10-85 Н20, 0,1 мкФ, 250 В

Фильтры Б24

Емкостным элементом фильтров Б24 и Б24-1 является трубчатый проходной керамический конденсатор. У фильтров Б24-1 (С-тип) внутренний электрод сплошной. У фильтров Б24 (π-типа) электрод выполнен из двух отдельных изолированных друг от друга поверхностей, образующих два емкостных элемента, емкость каждого из которых равна половине номинальной емкости фильтра. На проходящий через фильтр Б24 внутренний вывод надет ферромагнитный сердечник, создающий вместе с выводом индуктивный элемент. Фильтры выпускаются в трех вариантах исполнения: «а», «б» и «в» (рис. 5). Монтаж фильтров «а» и «б» осуществляется пайкой за корпус, а варианта «в» — при помощи резьбовой втулки М4.



Рис. 5. Внешний вид фильтров Б24

Таблица 2. Резонансная частота и вносимое затухание конденсаторов К10-85

C _{ном}	f _{рез} , МГц	A _{рез} , дБ	Вносимое затухание А, дБ, не менее, на частоте f, МГц							
			0,3	1	5	10	50	100	500	1000
4,7 пФ	1 100	30	—	—	—	—	—	—	3	30
6,8 пФ	850		—	—	—	—	—	—	4	25
10,0 пФ	680		—	—	—	—	3	10	25	15
15,0 пФ	560		—	—	—	—	5	15	28	14
22,0 пФ	460	35	—	—	—	—	7	20	33	12
33,0 пФ	420		—	—	—	—	3	15	30	10
47,0 пФ	370		—	—	—	—	—	3	25	
68,0 пФ	290		—	—	—	—	—	3	20	
100,0 пФ	240	40	—	—	—	—	—	5	20	
150,0 пФ	200		—	—	—	—	3	10	26	
220,0 пФ	155		—	—	—	—	7	16	10	
330,0 пФ	125		—	—	—	—	10	35	15	
470,0 пФ	110	45	—	—	—	3	15	45	12	
680,0 пФ	92		—	—	—	5	20	45		
1 000 пФ	82		—	—	—	10	20	43		
1 500 пФ	69		—	—	—	15	25	35		
2 200 пФ	58		—	—	3	20	45	30	8	
3 300 пФ	44		—	—	5	18	43	28		
4 700 пФ	36		—	—	10	12	35	22		
6 800 пФ	30		—	—	13	15	25	20		10
0,01 мкФ	23	—	3	14	18	28				
0,015 мкФ	19	50	—	3	15	20	25	20	10	
0,022 мкФ	15		0,5	10	30	35	25			
0,033 мкФ	13		2	13	32	48				
0,047 мкФ	10,5		5	18	35	50				
0,068 мкФ	8,4	9	22	35	48	20		10	8	
0,1 мкФ	6,5	55	14,5	25	41		44			
0,15 мкФ	6,2		16	30	48		43			
0,22 мкФ	5,5	60	19	20	55		35			
0,33 мкФ	4,4		22	32	58	—				

Фильтры представлены следующими группами температурной стабильности: М750, М1500, М2200, М3300, Н30, Н20, Н50, Н70 и Н90. Номинальные емкости находятся в пределах 43–10000 пФ. Изделия рассчитаны на номинальные напряжения 100 и 250 В, обеспечивают

вносимое затухание 3–60 дБ (рис. 6). Масса фильтров не превышает 1,5 г, длина корпуса равна 10, 12 мм, диаметр трубки — 2,4 мм, резьба — М4.

Несмотря на хорошие массогабаритные характеристики, фильтры Б24 имеют два недостатка: ограниченный диапазон номинальных емкостей и низкую механическую прочность, т. к. основным элементом конструкции является керамическая трубка.

С 2008 г. в серийном производстве появились фильтры в металлических корпусах Б25-3, Б25-4 (С-типа) с более широкими диапазонами номинальных напряжений и номинальных емкостей, с разными массогабаритными характеристиками, в т. ч. массой 1,5 г. Позднее, в 2009 г., появилась усовершенствованная серия фильтров Б26, включающая в себя номенклатуру фильтров Б25 и расширяющая ее не только за счет увеличения значений емкостей и напряжений, но и благодаря введению новых конструктивных решений — фильтров LC- и π-типов.

Фильтры Б26

Фильтры Б26 имеют металлический корпус типа «болт» (рис. 7), устойчивы к воздействию механических, климатических и биологических факторов в соответствии с требованиями, предъявляемыми к изделиям категории качества ВП. Фильтры выпускаются трех типов:

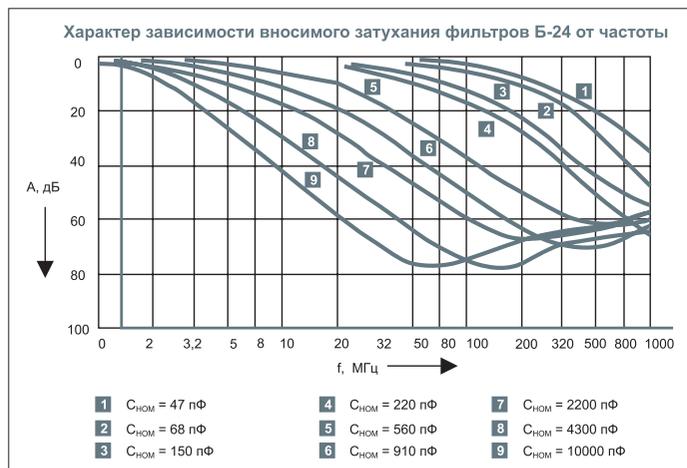


Рис. 6. Пример АЧХ вносимого затухания фильтров Б24 Н90, 100 В, 6800 пФ



Рис. 7. Внешний вид фильтров B26

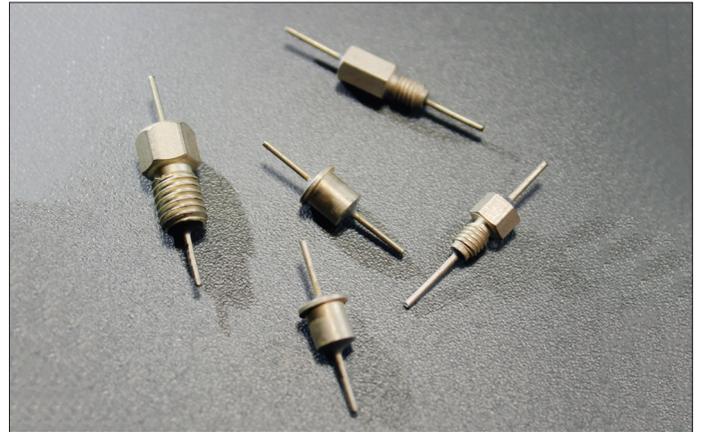


Рис. 9. Внешний вид фильтров B27, B30-1 и B30-2

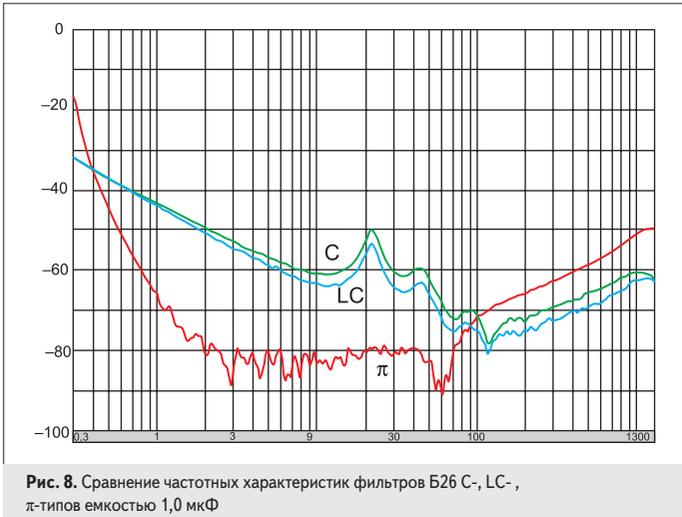


Рис. 8. Сравнение частотных характеристик фильтров B26 C-, LC-, π -типов емкостью 1,0 мкФ

B26-1 — C-типа, B26-2 — LC-типа и B26-3 — π -типа. Емкостными элементами фильтров являются конденсаторы K10-81 (рис. 2). В качестве индуктивных элементов в фильтрах B26-2, B26-3 используются ферритовые трубчатые сердечники, надетые на проходной вывод. Однако они имеют индукцию насыщения около 0,3 Тл, что ограничивает максимальное значение номинальных токов фильтров 10-15 А. Для фильтров B26-3 с номинальным током 25 А применяются низкопрофильные дроссельные магнитопроводы серии MSC [5]. Эти изделия при низкой

магнитной проницаемости, равной 245, имеют максимальную магнитодвижущую силу до 66 А·виток, т.е. при одном витке (проходной вывод фильтров B26) номинальный ток может достигать 66 А без снижения. В конструкции фильтра B26-3 с номинальным током 15 А используются магнитопроводы в сочетании с ферритовыми сердечниками, которые находятся внутри отверстия магнитопровода на проходном выводе. Эта конструкция при малых значениях рабочего тока позволяет полностью использовать преимущество ферритовых сердечников, а при больших значениях — преимущества магнитопроводов.

Фильтры представлены следующими группами температурной стабильности: МП0, Н20, Н50 и Н90. Номинальные емкости находятся в пределах 4,7 пФ...22 мкФ. Линейка номинальных напряжений включает в себя напряжения 32, 50, 100, 160, 250, 350, 500, 750 и 1000 В, а линейка номинальных токов — 10, 15 и 25 А. Вносимое затухание фильтров достигает 85 дБ.

Масса малогабаритных фильтров B26-1,2 с номинальным током 10 А, резьбой М4 и длиной корпуса 11 мм составляет 1,5 г. Масса остальных фильтров с номинальными токами 15 и 25 А меняется в зависимости от типоразмеров.

Следует заметить, что фильтры B26-3 (π -типа) обеспечивают наибольшую крутизну АЧХ и максимальные значения вносимого затухания по сравнению с фильтрами C- и LC-типов (рис. 8). АЧХ фильтров C- и LC-типов довольно близки из-за относительно малых значений индуктивности индуктивных элементов фильтров.

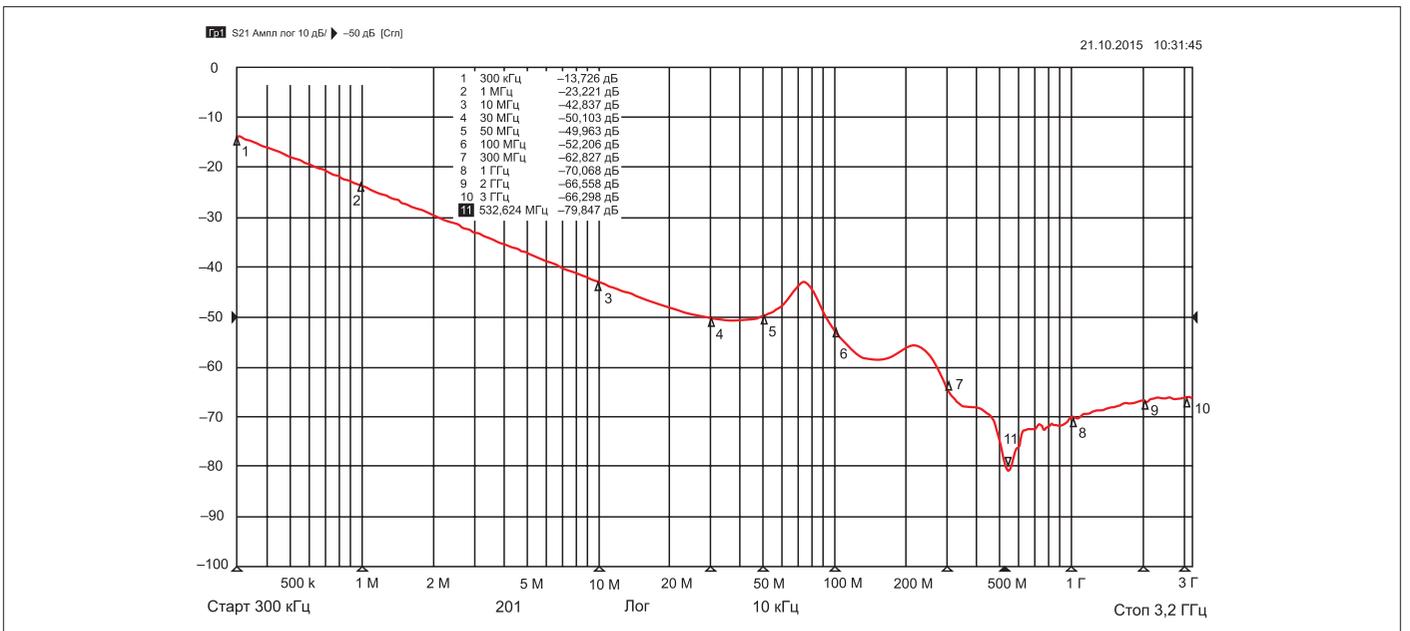


Рис. 10. Пример АЧХ вносимого затухания фильтра B30-1, Н20, 0,1 мкФ, 50 В

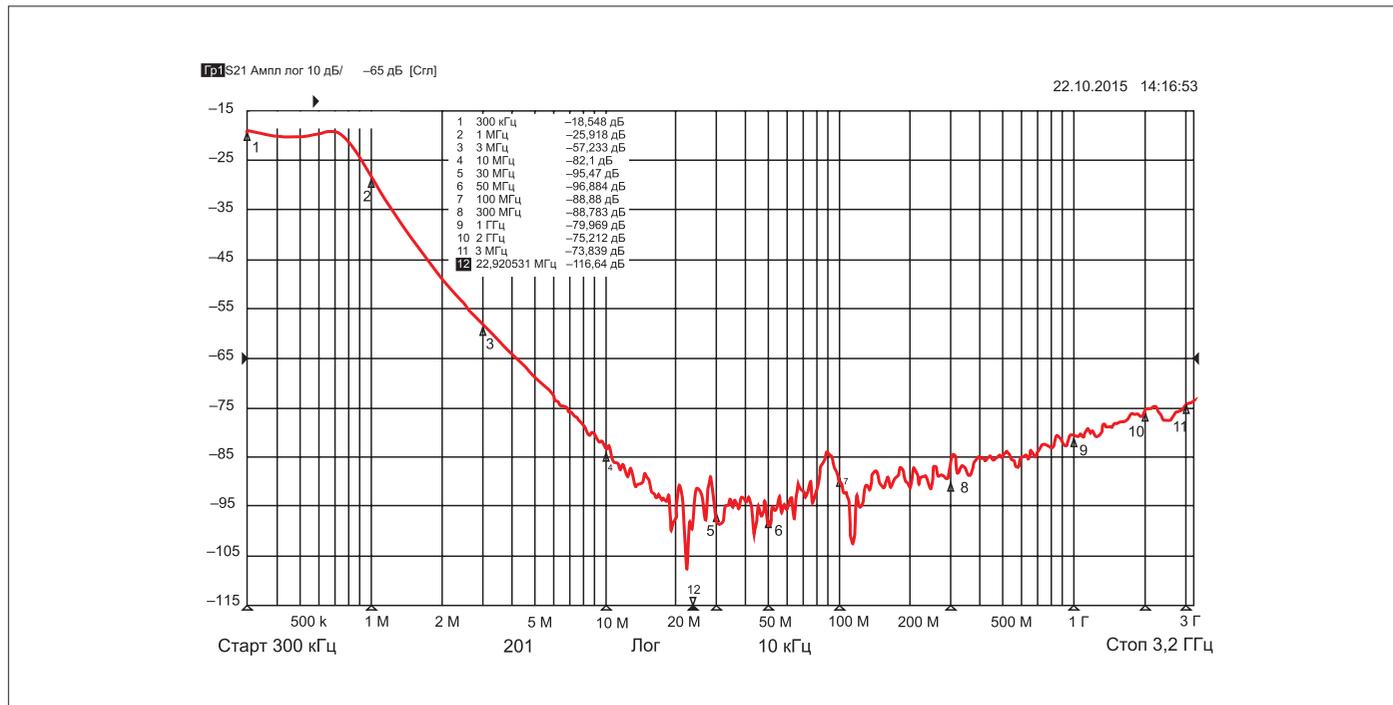


Рис. 11. Пример АЧХ вносимого затухания фильтра Б30-2, Н20, 0,22 мкФ, 50 В

Фильтры Б27 и Б30

Для габаритных размеров корпуса фильтра определяющим является диаметр шайбы конденсатора. У фильтров Б26 минимальный диаметр емкостного элемента равен 4 мм, что ограничивало размеры указанных фильтров. Зарубежные фирмы производят шайбовые конденсаторы с наружным диаметром 1,25 мм (фирма RA&E) и 2,5 мм (фирмы API Technologies (бывшая компания Spectrum Control), Eurofarad). С использованием таких конденсаторов эти компании выпускают малогабаритные фильтры для монтажа пайкой (eyelet) и с резьбовым выводом. Для их импортозамещения были разработаны шайбовые конденсаторы с наружным диаметром 3 мм, а также малогабарит-

ные фильтры Б27 С-типа для монтажа пайкой [6], Б30-1 С-типа и Б30-2 П-типа (рис. 9) для монтажа с помощью резьбового вывода [7]. Размеры фильтров Б30 аналогичны размерам фильтров серий 4400 с метрической резьбой М3 (Metric Bushing Filters) компании Tusonix.

Фильтры представлены следующими группами температурной стабильности: МП0, Н20, Н50. Материалы группы Н90 не применялись из-за большой нестабильности параметров при воздействии температуры и рабочего напряжения. Номинальные емкости находятся в диапазоне 100 пФ...22 мкФ. Линейка напряжений включает в себя значения 50, 100, 160 и 250 В.

Максимальное номинальное напряжение фильтров из-за их небольших размеров составляет 250 В, номинальный ток – 10 А. При этом превышение температуры поверхности фильтра над температурой окружающей среды — не более 5 °С. Крепление фильтров Б27 в аппаратуру осуществляется оплавлением низкотемпературной паяльной пасты. Перед этим фильтры обезжиривают этиловым спиртом. Рекомендуемый состав паяльной пасты: олово (массовая доля — 42%) и висмут (массовая доля — 58%). Температура оплавления паяльной пасты — (180±5) °С, время — не более 10 с. Кроме того, допускается пайка с помощью паяльника.

На рисунках 10–11 приводятся сравнительные АЧХ фильтров Б30-1 и Б30-2. На рисунке 10 наблюдается рост А с крутизной около 20 дБ/декаду до области появления резонансных спадов. Их резонансная частота увеличивается с уменьшением емкости и связана с частотой собственного резонанса конденсатора. Подобные резонансные спады имеются на всех АЧХ не только разработанных «Гирикондом» фильтров, но и исследованных импортных аналогов. Однако для фильтров всех зарубежных фирм в таблицах со значениями вносимого затухания на разных частотах резонансные спады не учитываются.

На АЧХ фильтров Б30-2 П-типа (рис. 11) наблюдаются три следующих характерных участка поведения вносимого затухания:

- крутизна АЧХ вносимого затухания составляет 20 дБ/декаду, как у фильтров С-типа. Этот участок заканчивается на частоте (частоте среза), соответствующей резонансной частоте контура из параллельно включенных индуктивности и конденсаторов фильтра;
- АЧХ вносимого затухания имеет максимальную крутизну (30–40 дБ/декаду), что характерно для фильтров этого типа. Максимальное значение вносимого затухания достигает 105 дБ;

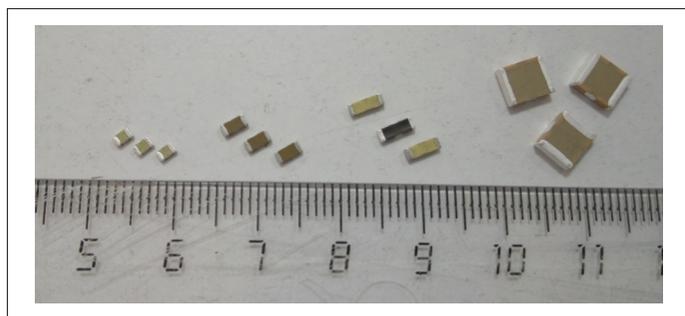


Рис. 12. Внешний вид чип-фильтров Б33

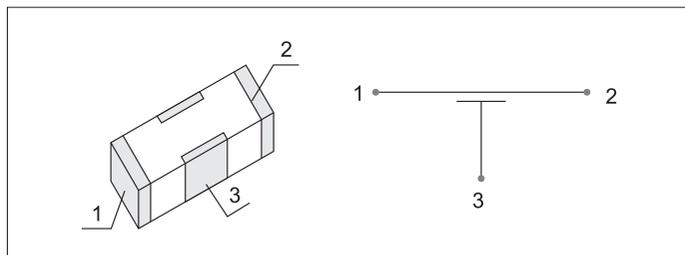


Рис. 13. Конструкция и электрическая схема чип-фильтра

Таблица 3. Вносимое затухание фильтров Б30-2

Номинальная емкость	Вносимое затухание А, дБ, не менее на частоте f, МГц								
	0,3	1	3	10	30	50	100	300	1000
150; 220 пФ	—	—	—	—	3	15	20	35	40
330 пФ	—	—	—	—	4	10	25	40	45
470 пФ	—	—	—	—	4	12	27	42	48
680 пФ	—	—	—	3	8	15	30	45	50
1 000 пФ	—	—	3	4	12	20	32	50	45
1 500 пФ	—	—	3	6	15	25	35	52	55
2 200 пФ	—	—	4	8	20	32	45	55	
3 300 пФ	—	—	4	10	28	38	50	60	
4 700 пФ	—	—	5	23	40	42	60	60	60
6 800 пФ	—	—	8	25	45	50			
0,01 мкФ	—	3	9	32	48	60	65	65	
0,015 мкФ	—	5	12	35	53				
0,022 мкФ	—	6	13	38	58				
0,033 мкФ	3	10	18	45	65	70	70	75	70
0,047 мкФ	3	13	21	55					
0,068 мкФ	5	12	30	65	70				
0,1; 0,15 мкФ	7	15	35	70	75	75	75	75	
0,22 мкФ	15	25	50	75	80	80	80	80	75
0,33 мкФ	16	26	55	80					

Примечание. Знак «—» означает, что вносимое затухание меньше 2 дБ.

— наблюдается некоторое снижение значений вносимого затухания.

В таблице 3 приведены гарантируемые техническими условиями значения вносимого затухания фильтров Б30-2 разных номинальных емкостей.

Чип-фильтры Б33

По завершении разработки фильтров Б33 в 2017 г. электронная компонентная база пополнится первыми отечественными помохоподавляющими чип-фильтрами для поверхностного монтажа

С-типа (рис. 12). Чип-фильтры являются аналогами серии NFM фирмы Murata, а также SMD-чипов таких компаний, как Syfer, API Technologies (бывш. Spectrum Control) и др. Эти фильтры представлены во всех востребованных габаритных размерах: 1,6×0,8 (0603); 2×1,25 (0805); 3,2×1,25 (1205); 3,2×1,6 (1206); 4,5×1,6 (1806); 5,7×5,0 (2220) мм.

За основу конструкции емкостных чип-фильтров принята базовая конструкция многослойного монолитного керамического конденсатора для поверхностного монтажа с чередующимися слоями керамического диэлектрика и металлических электродов. Особенностью конструкции

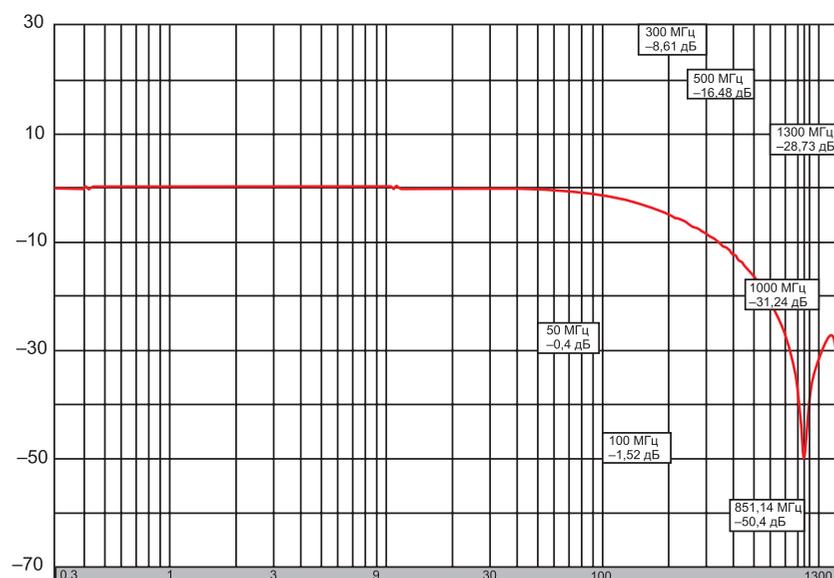


Рис. 14. АЧХ чип-фильтра 3,2×1,6 мм, МПО, 250 В, 0,5 А, 47 пФ

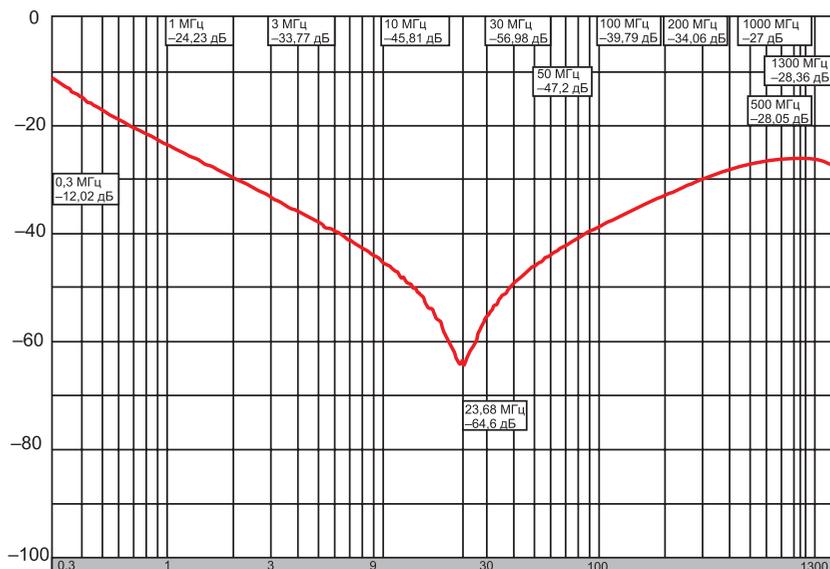


Рис. 15. АЧХ чип-фильтра 2×1,25 мм, Н20, 16 В, 1,5 А, 0,1 мкФ

чип-фильтров (рис. 13) является конфигурация внутренних электродов, обеспечивающая создание проходных электродов, которые выходят на торцевые контактные площадки 1–2, и электродов, выходящих на боковую поверхность конденсатора 3. Эти электроды и образуют емкость с проходным электродом (емкость фильтра).

Фильтры представлены следующими группами температурной стабильности: МП0, Н20, Н50. Материалы группы Н90 не использовались из-за большой нестабильности параметров при воздействии температуры и рабочего напряжения. Номинальные емкости находятся в пределах 22 пФ...2,2 мкФ. Линейка напряжений включает в себя значения 16, 25, 50, 100 и 250 В. В отличие от чип-конденсатора, у чип-фильтра имеется еще один параметр — значение номинального тока. Номинальный ток — наибольший допустимый по условиям нагрева проходных электродов ток, при котором фильтры могут работать в течение предусмотренной ТУ наработки. Номинальный ток разработанных чип-фильтров Б33 находится в пределах 0,3–6,0 А.

Наиболее важной технической характеристикой чип-фильтра, определяющей эффективность его работы, является вносимое затухание.

Разработанные фильтры Б33 обеспечивают величину вносимого затухания до 60 дБ. На рисунках 14–15 показаны АЧХ чип-фильтров малой и большой емкостей разных типонаименований.

Литература

1. Пассивные помехоподавляющие фильтры и элементы. Методы измерения вносимого затухания. ГОСТ 13661-92, Комитет стандартизации и метрологии СССР, Москва.
2. Method of insertion loss measurement, MILL-STD-220B.
3. Патент на полезную модель № 158534. Керамический опорный помехоподавляющий конденсатор. Смирнов В. Ф., Шалаева А. А., Кузьмичев З. В. Приоритет полезной модели. 23 июня 2015.
4. Конденсаторы керамические помехоподавляющие К10-85. Технические условия АДПК.673511.019 ТУ.
5. Аморфные магнитомягкие сплавы — www.mstator.ru.
6. Фильтры нижних частот Б27. Технические условия АДПК.673511.005 ТУ.
7. Фильтры нижних частот Б30. Технические условия АДПК.673511.006 ТУ.

Статья опубликована в журнале «Электронные компоненты» № 7'2017

Разработка и производство конденсаторов

50
лет
на рынке
электроники

оксидно-электролитические алюминиевые конденсаторы

K50-15, K50-17, K50-27, K50-37, K50-68, K50-74,
K50-76, K50-77, K50-80, K50-81, K50-83,
K50-84, K50-85, K50-86, K50-87, K50-88,
K50-89, K50-90, K50-91, K50-92,
K50-93, K50-94, K50-95, K50-96



оксидно-полупроводниковые танталовые конденсаторы

K53-1A, K53-7, K53-65(чип),
K53-66, K53-68(чип), K53-71(чип),
K53-72(чип), K53-74(чип),
K53-77(чип), K53-78(чип)

объемно-пористые танталовые конденсаторы

K52-1, K52-1M, K52-1БМ,
K52-1Б, K52-9, K52-11, 52-17,
K52-18, 52-19, K52-20, K52-21, K52-24

конденсаторы с двойным электрическим слоем (ионисторы, суперконденсаторы)

K58-20, K58-21, K58-26

Накопители электрической энергии на основе модульной сборки суперконденсаторов

Накопитель	Отличительные особенности	$U_{ном}, В$	$C_{ном}, Ф$	Диапазон температур среды при эксплуатации, $T_{cp}, ^\circ C$	Срок сохраняемости, лет, не менее
 10В x 3,75Ф	без корпуса	10	3,75	-40...+50	17
 10В x 3,75Ф	в корпусе	10	3,75	-50...+65	25
 20В x 1,875Ф	в корпусе	20	1,875	-50...+65	25

Защитные TVS-устройства компании Semtech: разнообразие выбора

Константин ВЕРХУЛЕВСКИЙ
info@icquest.ru

Один из самых распространенных способов защиты сигнальных и логических линий от перенапряжений, вызванных воздействием электростатических разрядов и ударов молний, — применение TVS-диодов и диодных сборок на их базе. В статье рассматриваются основные характеристики и конструктивные особенности TVS-устройств компании Semtech, даны примеры применения компонентов отдельных серий. Обладающие высоким быстродействием и богатым разнообразием корпусного исполнения, данные приборы способны обеспечить надежное функционирование защищаемого оборудования в соответствии с требованиями международных стандартов.

Введение

Любое высоконадежное электронное оборудование промышленного назначения, разработанное с применением полупроводниковых приборов (микропроцессоров, цифровых и аналоговых ИС), требует наличия схем защиты от электрических перегрузок. Перегрузки имеют различную природу и отличаются по уровню мощности, наиболее опасными среди них являются перепады напряжения, представляющие собой случайные пульсации с амплитудами большими, чем рабочие напряжения в цепи. Они возникают в результате воздействия кратковременных электромагнитных импульсов естественного (мощные грозовые разряды) или искусственного (излучение радиопередающих устройств, высоковольтных линий передачи) происхождения, а также за счет внутренних переходных процессов, вызванных коммутацией емкостных или индуктивных нагрузок (электродвигатели, генераторы) и электростатическими разрядами (ESD). Влияние электромагнитных импульсов любого происхождения приводит к изменению параметров электронных компонентов как за счет непосредственного поглощения энергии, так и вследствие воздействия на них индуцированных в электрических цепях оборудования импульсов напряжения и тока.

Самые распространенные причины перенапряжений — грозовые и статические разряды.

Для испытания электротехнической аппаратуры на устойчивость к воздействию данных факторов применяют IEC 61000 — наиболее признаваемый в настоящее время международный стандарт, определяющий уточненные параметры тестовых сигналов. Их характеристики были получены в результате многочисленных измерений с использованием общепринятых методов мониторинга. На рис. 1 приведены типовые формы импульсов, соответствующие грозовым (стандарт IEC 61000-4-5) и электростатическим (IEC 61000-4-2) разрядам.

Разряды молний характеризуются высокоэнергетическими импульсами с длительностью от нескольких десятков до тысяч микросекунд и очень большими токами (десятки килоампер). Прямое попадание молнии — разрушительное, но достаточно редкое явление. Гораздо чаще вред приносит создаваемое при разряде магнитное поле, генерирующее импульсы помехи в близлежащих электротехнических объектах (электрических кабелях линий передачи и т. п.). Так, молния «облако-облако» может стать причиной возникновения паразитного напряжения амплитудой до 70 В в электрическом кабеле, удаленном на расстояние 1,6 км от источника [1].

Человеческое тело — отличный аккумулятор статического напряжения. По мере активной деятельности статический заряд накапливается на теле человека, разряд происходит при контакте с токопроводящим

объектом. Также сетевые провода способны накапливать потенциал при работе, электростатический разряд в этом случае происходит в момент присоединения кабеля к разъему. Амплитуда электростатических разрядов может достигать 35 кВ, возбуждаемый сигнал имеет длительность фронта около 1 нс. Хотя энергия, выделяемая при возбуждении такого импульса, невелика, чрезвычайно малое время нарастания и большое пиковое значение выброса напряжения могут вызвать катастрофическое разрушение устройств, выполненных на дискретных по-

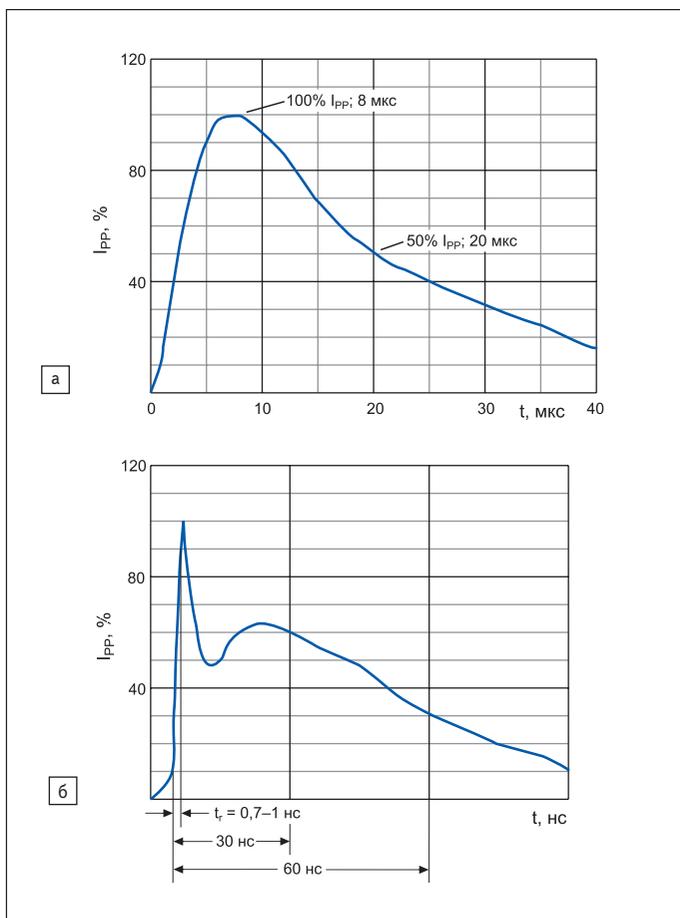


Рис. 1. Характеристики импульсов тока, вызванных:
а) грозовым разрядом; б) электростатическим разрядом

лупроводниковых приборах и интегральных схемах. К примеру, в МОП-структурах точечный пробой оксидного слоя и, соответственно, ухудшение его диэлектрической прочности приводит к перегреву и разрушению затвора даже при незначительной рассеиваемой мощности. Это, в свою очередь, сокращает срок службы электронного оборудования или вовсе выводит его из строя.

Современные цифровые и аналоговые микросхемы сами по себе, как правило, имеют специальные защитные цепи, обеспечивающие проводящие пути для устранения помехи. Однако они не в состоянии справиться с большими токами. Кроме того, учитывая современную тенденцию к миниатюризации, сложно реализовать достаточный уровень защиты только с помощью встроенных цепей, так как их параметрами приходится жертвовать в угоду улучшения ключевых рабочих характеристик и снижения энергопотребления. Согласно прогнозам EOS/ESD-ассоциации, в дальнейшем ИС не будут содержать схемы, ограничивающие ESD-импульсы с амплитудой выше 2 кВ [2]. Поэтому для соответствия требованиям IEC 61000 и вывода на рынок конкурентоспособной продукции в дополнение к интегрированной необходимо проектировать и внедрять внешнюю защиту.

На рынке предлагается множество приборов, обеспечивающих хорошую защиту от перенапряжения, но, чтобы выбрать наиболее эффективные для конкретного применения, нужно тщательно сопоставить их параметры с учетом рабочих условий системы. Помимо традиционных плавких предохранителей, простейших LC- и RC-фильтров, широко используются специализированные приборы — газовые разрядники, металлооксидные варисторы и TVS-диоды (Transient Voltage Suppression), в разных источниках также называемые супрессорами, защитными диодами и полупроводниковыми ограничителями напряжения. Каждый из перечисленных защитных элементов имеет достоинства и недостатки (табл. 1).

Газовые разрядники служат для защиты оборудования от самых мощных помех, они применяются в качестве первичной защиты телекоммуникационных и силовых цепей. Значение пиковых токов у них достигает тысяч ампер, при этом число срабатываний оказывается достаточно большим. Среди недостатков можно отметить высокое напряжение включения, значительные габариты и низкое быстродействие. Продолжительное время срабатывания (более 0,15 мкс) не решает проблемы защиты многих полупроводниковых приборов и микросхем.

Варисторы, благодаря высокому соотношению пиковых токов и габаритов, оптимальны для создания максимально компактных решений при защите от мощных помех. Обладающие широким диапазоном рабочих токов и напряжений, они успешно служат для защиты электронных компонен-

Таблица 1.
Сравнение параметров специализированных приборов защиты от перенапряжений

Параметр	Газовые разрядники	Варисторы	TVS-диоды
Уровень импульсного тока	Высокий	Высокий	Средний
Точность напряжения включения	Низкая	Низкая	Высокая
Собственная емкость	Малая	Большая	Малая
Срок службы	Малый	Ограниченный	Большой
Быстродействие	Низкое	Низкое	Высокое
Стоимость	Высокая	Средняя	Низкая

тов на печатной плате, одной из основных областей применения является автомобильная электроника. К недостаткам относятся ограниченный срок службы и большая собственная емкость (тысячи пикофарад), не допускающая их включение в высокоскоростные линии передачи данных.

TVS-диоды, имеющие наименьшие значения напряжений ограничения и самое быстрое время срабатывания среди всех перечисленных компонентов, могут применяться в низковольтных цепях. Они хорошо подходят для защиты полупроводниковых приборов или для организации окончательной ступени в комбинированных защитных устройствах. Среди других очевидных достоинств — высокая долговечность и надежность, широкий диапазон рабочих напряжений, а также возможность получения компактных многоканальных решений в корпусах для планарного монтажа. Низкая собственная емкость, не влияющая на сигнальные и логические линии, позволяет устанавливать их в различных коммуникационных интерфейсах.

Принцип работы TVS-диодов

TVS-диоды — полупроводниковые приборы с резко выраженной нелинейной вольт-амперной характеристикой, обычно подключаемые параллельно защищаемой нагрузке. Принцип их работы основан на применении обратимого пробоя. В обычных условиях TVS-диод представляет собой разомкнутую цепь с некоторым током утечки, его электрические характеристики практически не оказывают никакого влияния на нормальное функционирование схемы. При возникновении высоковольтного импульса перенапряжения, превышающего пороговое напряжение, происходит пробой диода с лавинообразным увеличением носителей, ток переходного процесса протекает через диод на общий провод, образуя шунтирующий путь с низким сопротивлением и минуя защищаемую цепь. Благодаря этому входное напряжение ограничивается на безопасном уровне, совместимом с характеристиками подсоединенных устройств. Величина рассеиваемой мощности определяется максимально возможной температурой кристалла, рост температуры приводит к уменьшению допустимых значений пиковых токов. Когда линейное напряжение достигает нормально-

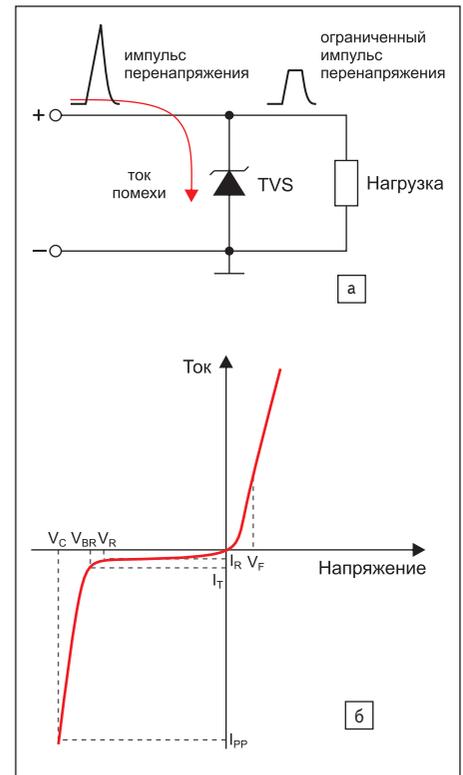


Рис. 2. Несимметричный TVS-диод:
а) принцип работы; б) вольт-амперная характеристика

го уровня, ограничитель автоматически возвращается в высокоимпедансное состояние.

Основные параметры TVS-диода — максимальный пиковый ток I_{PP} , который супрессор может пропустить без повреждения, напряжение пробоя, определяемое по достижении номинального тока пробоя I_T (обычно 1 или 10 мА), и напряжение ограничения V_C , характеризующее падение напряжения на диоде при протекании I_{PP} и заданной температуре окружающей среды. Принцип работы TVS-диода показан на рис. 2а, а ВАХ несимметричного компонента с указанием основных параметров — на рис. 2б.

TVS-диоды могут быть несимметричными или симметричными. Первые используются в сетях постоянного тока, так как в рабочем состоянии пропускают ток только в одном направлении. Симметричные супрессоры пропускают ток в обе стороны, поэтому способны работать в сетях переменного тока. TVS-диоды в значительной степени являются стандартной продукцией, то есть выпускаются многими изготовителями, имеют часто одни и те же наименования компонентов и, соответственно, близкие технические характеристики. Одним из лидеров в производстве защитных TVS-устройств является компания Semtech.

TVS-продукция Semtech Corporation

Защитная продукция Semtech включает как дискретные диоды, так и специализированные сборки, ориентированные на работу с определенными интерфейсами [3]. Данный

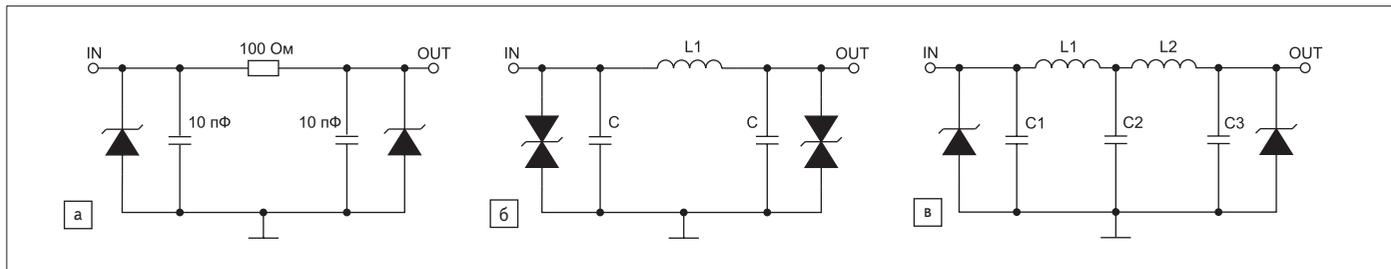


Рис. 3. Внутренняя структура защитных устройств серии EMIClamp: а) EClamp237xK; б) EClamp2422N; в) EClamp239xP

класс устройств был разработан для защиты чувствительных компонентов от воздействия электростатических разрядов (ESD), от быстрых электрических переходных процессов (EFT) и от перенапряжений в линиях связи (CDE). Выпускаемые в настоящее время приборы доступны в разнообразном корпусном исполнении, определяемом условиями эксплуатации и областями применения, вся продукция проходит сертификацию на соответствие требованиям стандартов и правил безопасности IEC, ETSI, Bellcore 1089 и FCC часть 68. Среди типовых применений можно отметить портативную носимую электронику, оборудование Ethernet- и других сетей передачи данных, HD-телевизоры и мониторы, ноутбуки, персональные и планшетные компьютеры.

Номенклатура TVS-устройств, предлагаемых компанией, содержит сотни наименований, объединенных в отдельные семейства, привести их параметры в рамках одной статьи не представляется возможным. Поэтому далее будут рассмотрены наиболее интересные серии с точки зрения конкурентных преимуществ, к которым относятся:

- малое напряжение ограничения (от 2,5 В);
- высокая перегрузочная способность;
- низкая собственная емкость (менее 0,5 пФ);
- возможность защиты от периодически повторяющихся ESD-импульсов;
- минимальные габариты;
- низкие токи утечки.

Серия защитных устройств, объединяющая в единых корпусах TVS-диоды и LC/RC-фильтры, выпускается компанией Semtech под торговой маркой EMIClamp. Помимо ограничения паразитных ESD-импульсов, она обеспечивает подавление нежелательных электромагнитных (EMI) и радиочастотных (RFI) излучений в диапазоне частот, определяемых параметрами встроенных фильтров низких частот. Компоненты данной серии осуществляют защиту распространенных интерфейсов и успешно применяются в портативной электронике: сотовых телефонах, цифровых фото- и видеокамерах, планшетах и ноутбуках, периферийных устройствах ПК (принтерах, сканерах и т. д.) и ЖК-дисплеях. В настоящее время доступны 2-, 4-, 6- и 8-канальные решения (несколько десятков наименований), внутренние конфигурации которых адаптированы под конкретные применения. Для примера на рис. 3 представлены типовые электрические схемы некоторых популярных моделей (показан один канал), а в таблице 2 — их основные параметры.

Шестиканальная ИС EClamp2357NQ (рис. 4), предназначенная для защиты логических линий SD (Secure Digital) карт памяти и сенсорных дисплеев, работает с 5-В шинами данных [4].

Интегрированные фильтры П-типа, каждый из которых состоит из 100-Ом резистора и двух конденсаторов с емкостью 10 пФ, гарантируют ослабление сигнала на 20 дБ в диапазоне частот 1–3 ГГц. TVS-диоды обеспечивают подавление электростатических разрядов в соответствии с нормами IEC 61000-4-2, уровень 4, также данные компоненты сертифицированы на соответствие требованиям АЕС-Q100 и могут применяться в автомобильных устройствах. Конструктивно приборы выполнены в 16-контактных низкопрофильных корпусах форм-фактора QFN с размерами 3×3×1 мм и шагом выводов 0,5 мм.

Малогабаритные многоканальные приборы защиты EClamp237xP и EClamp238xP позволяют сэкономить пространство на печатной пла-

те. Новые семейства, содержащие 4-, 6- и 8-канальные устройства, спроектированы для защиты и фильтрации сигналов высокоскоростных параллельных интерфейсов, работающих на скоростях более 60 Мбит/с. Защитные ИС выпускаются в планарных корпусах SLP, имеющих минимальный форм-фактор, повышенную надежность и объединяющих до 32 дискретных компонентов. Характерными особенностями всех приборов в пределах семейств являются унифицированные значения ширины (1,3 мм) и высоты (0,5 мм), длина в зависимости от количества каналов варьируется в пределах 1,7–3,3 мм.

Семейства EClamp239xP и EClamp255xP со встроенными LC-фильтрами применяются для защиты интерфейсов высококачественных цветных ЖКИ в 3G-телефонах стандартов GSM и CDMA. Они отличаются резким спадом частотной характеристики, обеспечивая минимум 30 дБ ослабления в диапазоне 800 МГц – 2,7 ГГц. Корпусное исполнение и количество каналов — аналогично семействам EClamp237xP и EClamp238xP. Проходная конструкция защитных устройств облегчает задачу трассировки сигналов для более быстрой и удобной разводки печатной платы. Большие размеры

Таблица 2. Основные характеристики популярных устройств серии EMIClamp

Наименование	Кол-во каналов	V_{DR} , В (max)	V_{BR} , В (min)	C , пФ	R , Ом	L , нГн	I_{LP} , мкА (max)	Габариты корпуса, мм
EClamp2357NQ	6	5	6	10	100	—	0,5	3×3×1 (QFN-16)
EClamp237xK*	4; 6; 8	5	6	10	100	—	0,5	1,7×1,3×0,5 (SLP-8)
EClamp238xK*				12	200			2,5×1,3×0,5 (SLP-12)
EClamp239xP*	4; 6; 8	5	6	12	—	19	0,1	2,1×1,6×0,5 (SLP-8)
EClamp255xP*						28		3×1,6×0,5 (SLP-12)
EClamp2374KQ	4	5	6	20	100	—	0,5	4×1,6×0,5 (SLP-16)
EClamp2422N	2	5	6	100	—	2	0,1	1,7×1,3×0,5 (SLP-8)
EClamp2455K	4	5	6	20	100	—	0,5	1,7×1,3×0,5 (SLP-8)
EClamp2465T					47			2,1×1,6×0,5 (SLP-12)
EClamp2522P	2	5,5	6	20	22	—	1	1,7×1,3×0,5 (SLP-8)

Примечание. х — соответствует числу каналов.

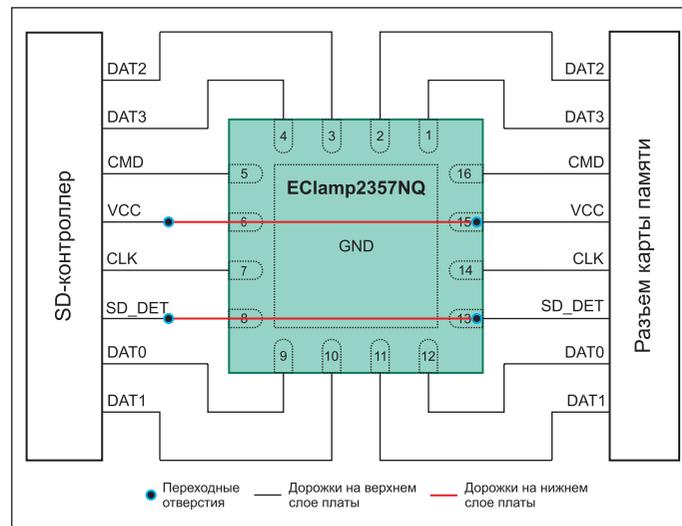


Рис. 4. Типовая схема включения ИС EClamp2357NQ

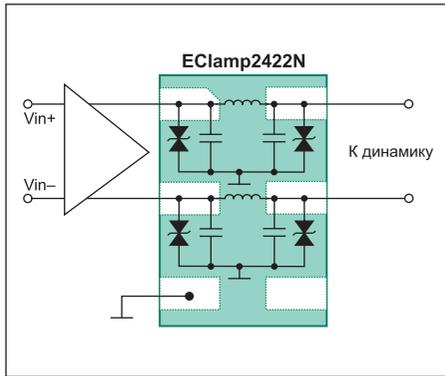


Рис. 5. Защита динамиков при помощи EClamp2422N

площадки для подключения «земли» мини-мизируют паразитную индуктивность для улучшения характеристик фильтра.

Двухканальный ограничитель напряжения EClamp2422N позиционируется для защиты аудиоинтерфейсов [5]. Помимо симметричных TVS-диодов, содержит цепочки CLC-фильтров из катушек индуктивности 2 нГн и конденсаторов 100 пФ. Доступен в 6-выводном корпусе SLP размерами 1,5×1×0,5 мм и шагом выводов 0,5 мм. Пример его применения показан на рис. 5.

Супрессоры серий TransClamp и LC (табл. 3) предназначены для защиты схем от воздействий повышенной мощности. Малогабаритные устройства, выпускаемые в корпусах для планарного монтажа и способные поглотить выбросы мощностью до 2500 Вт, выгодно отличаются минимальной разницей рабочего напряжения и напряжения ограничения и обладают низким собственным током утечки (от 0,1 мкА). Приборы, рассчитанные на функционирование в цепях с рабочими напряжениями 2,5 и 3,3 В, выполнены с применением собственной технологии EPD (Enhanced Punch-Through).

Таблица 3. Основные характеристики популярных устройств серий TransClamp и LC

Наименование	Кол-во каналов	V_{R7} В (max)	V_{BR7} В (min)	C, пФ	P_f Вт (8/20 мкс)	I_{PP7} А (max)	I_{R7} мкА (max)	Габариты корпуса, мм	
TClamp0602N	2	6	6,8	12	2500	95	5	2,6×2,6×0,6 (SLP-10)	
TClamp2502N		2,5	—				0,5		
TClamp3302N		3,3	—				1		
TClamp1202P		12	13,3	12	300	100	0,1		2×2×0,6 (SLP-5)
TClamp1272S		12	13,5	5	600	20	0,1		2,9×1,6×1,2 (SOT-23-6L)
TClamp2512N		2,5	2,7	8	2300	120	0,1		2,6×2,6×0,6 (SLP-10)
TClamp3312N		3,3	3,5						
TClamp2482S	24	27	2	150	20	0,1	2,9×1,6×1,2 (SOT-23-6L)		
LC01-6	2	6	8	50	1500	100	25	10,2×7,5×2,3 (SO-16W)	
LC03-3.3		3,3	—	12	1800	100	1	4,9×3,9×1,5 (SO-8)	
LC03-6		—	—	12	2000	100	25	4,9×3,9×1,5 (SO-8)	
LC04-6	4	6	6,8	15	1000	200	15	9,9×3,9×1,5 (SO-16)	
LC05-6					2000	100			
LC04-12					600	100			2

Двухканальные устройства TransClamp служат для защиты от перенапряжений высокоскоростных интерфейсов передачи данных, к основным областям применения относятся: оборудование сетей T1/E1, T3/E3, 10/100 Ethernet, ISDN, WAN и xDSL. Изготавливаются они преимущественно на основе мостовой конфигурации, позволяющей оптимальным образом обеспечить нормальное функционирование дифференциальных линий связи. На рис. 6 изображен пример подключения ИС TClamp3302N [6].

Принцип работы прост. Корректирующий всплески диодный мост, составленный из комбинированных диодов, направляет входящий ток через TVS-диод. Использование данного подхода позволяет защитить схему как от помех общего вида, так и от помех при дифференциальном включении. Встроенные супрессоры выдерживают импульсы с током 20–120 А и соотношением длительностей фронта/спада, равным 8/20 мкс, обеспечивая тем самым соответствие требованиям стандартов ИЕС.

Для аналогичных целей и применений позиционируются защитные микросхемы серии LC. Помимо мостовой конфигура-

ции, при их изготовлении применяется вариант, представленный на рис. 7. Доступные устройства имеют высокую перегрузочную способность по току и включают 2–4 пары элементов TVS + выпрямитель, соединенные последовательно. Две пары, объединенные встречно-параллельно, гарантируют, что в условиях переходного процесса компенсационный диод не перейдет в обратное смещение.

В высокоскоростных применениях необходимо учитывать паразитную емкость, вносимую диодами и оказывающую влияние на передаваемый сигнал, вызывая его затухание, задержку, отражение или закругление фронтов, затрудняющее прием данных. Для сохранения качества сигналов в подобных системах необходимо использовать защитные устройства с чрезвычайно низкой емкостью и малыми токами утечки. Компания Semtech предлагает для данных целей устройства серии RailClamp — самой обширной по количеству компонентов и предназначенной практически для любых телекоммуникационных приложений. Ее главное отличие — высокая степень защиты от электростатических разрядов при чрезвычайно низком уровне собственной емкости, не превышающем у ряда устройств 0,15 пФ. Это позволяет включать приборы RailClamp в цепи с рабочими частотами до 3 ГГц и успешно защищать USB (версий 2.0, 3.0 и 3.1), MHL/MDDI, LVDS, HDMI 1.3/1.4, DVI, 1000BASE-T, 100BASE-T, xDSL и другие распространенные технологии, а также мультимедийные порты дисплеев,

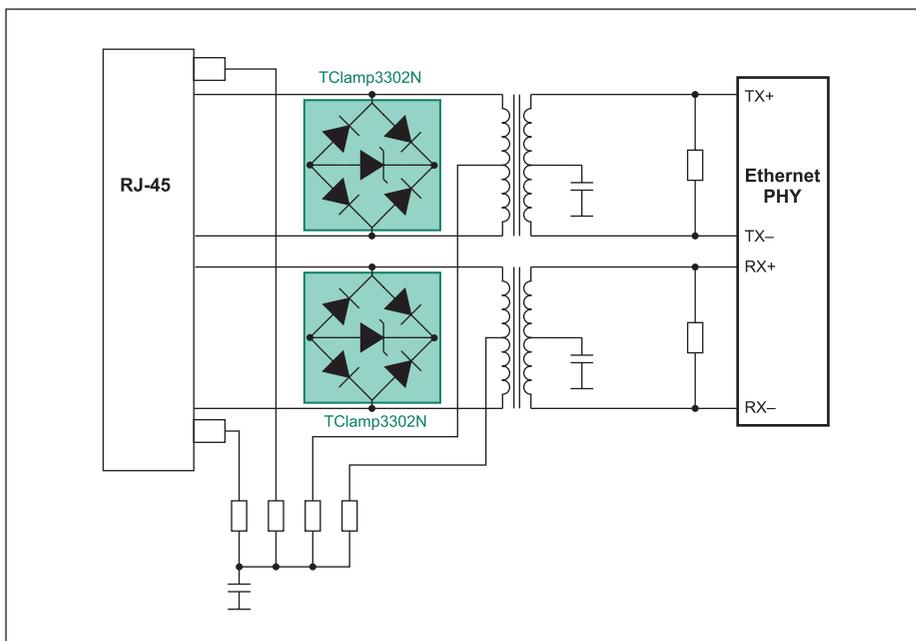


Рис. 6. Вариант защиты логических линий интерфейса Ethernet при помощи ИС TClamp3302N

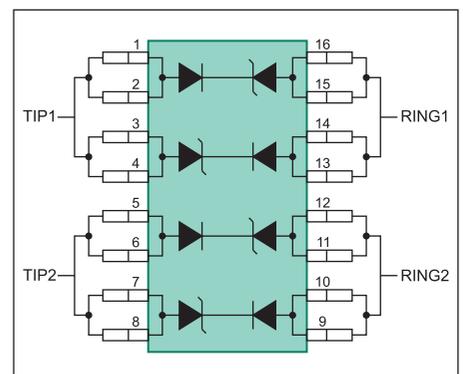


Рис. 7. Внутренняя структура и вариант схемы включения защитной ИС LC04-6

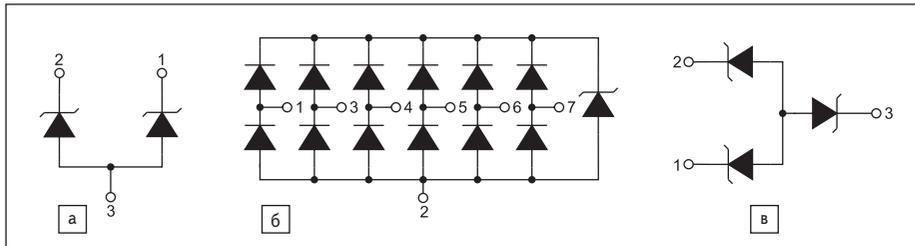


Рис. 8. Внутренняя структура отдельных защитных устройств серии RailClamp: а) RClamp0502BA; б) RClamp3346P; в) RClamp0552T

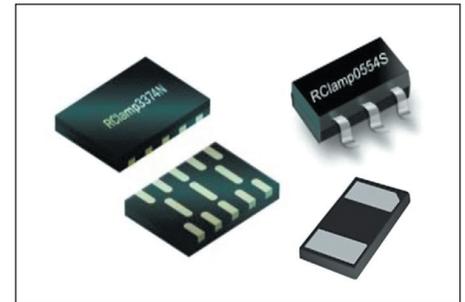


Рис. 9. Внешний вид типовых корпусов, используемых при производстве устройств серии RailClamp

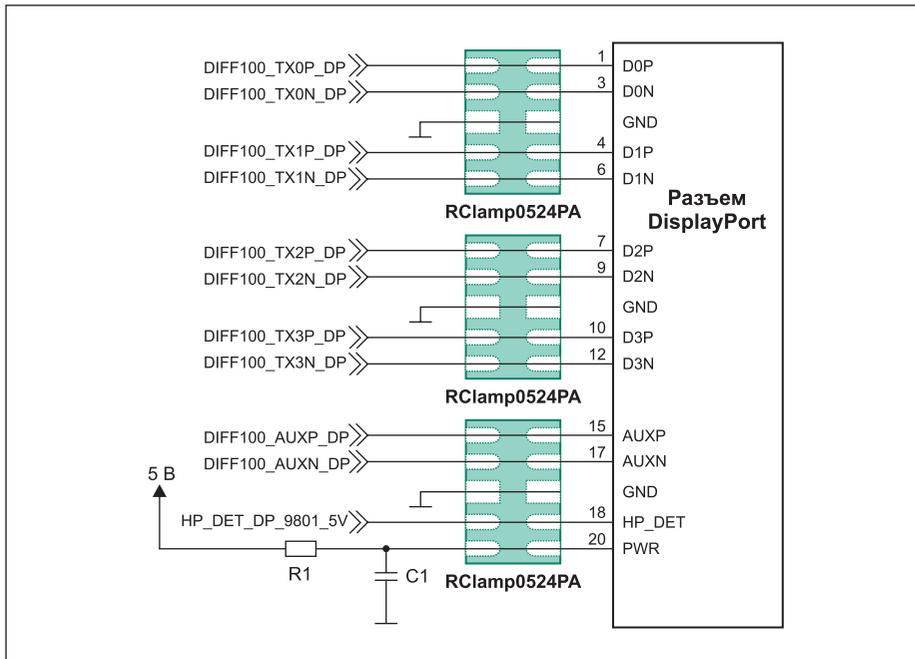


Рис. 10. Применение ИС RClamp0524PA для ESD-защиты интерфейса DisplayPort

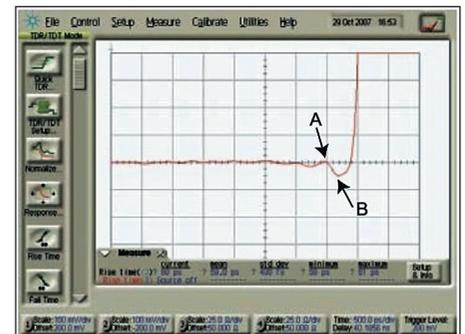


Рис. 11. Результаты измерения динамического рефлектометра

На рис. 10 представлена типовая схема подключения устройств RClamp0524PA [7].

Для сертификации любого разрабатываемого устройства, содержащего данный интерфейс, необходимо протестировать как источник, так и приемник цифрового сигнала согласно методам, изложенным в DisplayPort

антенны и карты памяти. Серия RailClamp включает как одиночные TVS-диоды (двухнаправленные), так и сборки на их основе. Для наглядности на рис. 8 представлены типовые схемы внутренних соединений некоторых приборов защиты RailClamp.

Рабочее напряжение и количество каналов изделия можно легко узнать из наименования — для этого необходимо обратить внимание на первые две и последнюю цифры соответственно. Например, микросхема RClamp3346P предназначена для применения в цепях 3,3 В и способна обеспечить защиту до шести логических линий связи. Несмотря на все многообразие моделей, доступный ряд рабочих напряжений ограничен значениями: 2,5; 3,3; 3,5; 5; 6,5; 8; 12; 15 и 24 В. Буква Q в конце наименования компонента означает соответствие требованиям стандарта AEC-Q100 и возможность использования в автомобильных устройствах. Корпусное исполнение определяется максимальной поглощаемой мощностью, все приборы выпускаются в корпусах для поверхностного монтажа — как в стандартных SOT-23, SC-70, S0-8 и других, так и в запатентованных безвыводных SLP (рис. 9).

В качестве одного из примеров применения можно рассмотреть использование ИС

RClamp0524PA, рекомендуемой для защиты дифференциальных линий DisplayPort — интерфейса связи с ЖК-дисплеями.

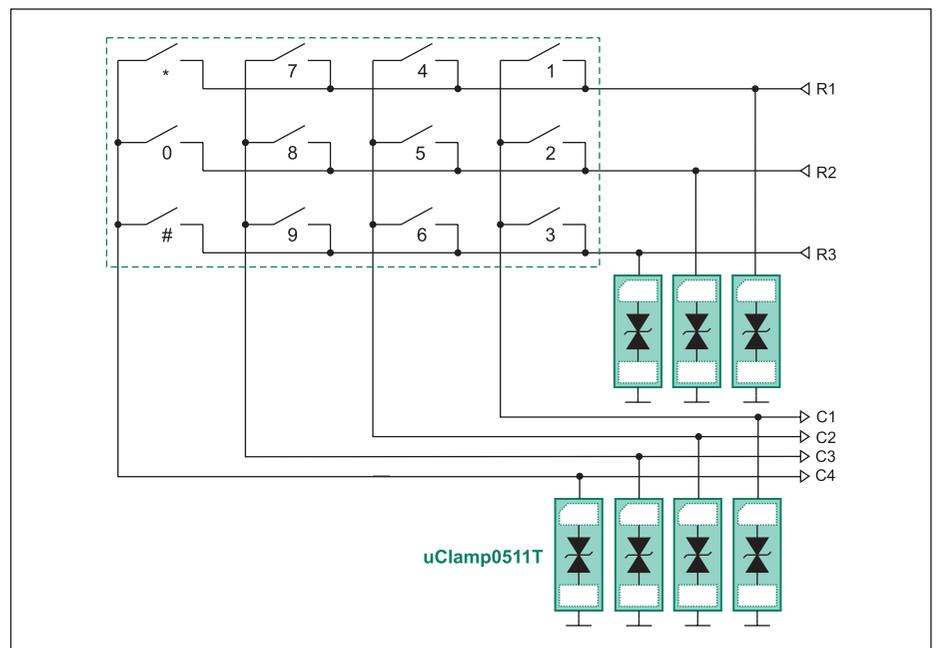


Рис. 12. Применение супрессоров uClamp0511T для ESD-защиты клавиатуры

CTS (Compliance Test Specification). Одним из основных тестов является измерение отраженного сигнала с помощью временного рефлектометра. В соответствии с требованиями к величине отраженного сигнала, номинальное значение дифференциального сопротивления сигнальных линий для устройства-приемника должно быть на уровне $100 \text{ Ом} \pm 15\%$ при времени нарастания тестового сигнала не более 200 пс. Для выполнения таких требований подключаемое устройство электростатической защиты должно иметь как можно меньшее значение емкости (не более 0,5 пФ). Ограничитель напряжения RClamp0524PA удовлетворяет указанным требованиям, его максимальная емкость составляет всего 0,3 пФ, напряжение питания — 5 В, а миниатюрный 10-выводной корпус не вносит дополнительных паразитных индуктивностей. На рис. 11 показаны результаты измерений сигналов дифференциальных линий с подключенным ограничителем переходных процессов RClamp0524PA. Из рисунка видно, что требования по дифференциальному сопротивлению линий ($100 \text{ Ом} \pm 15\%$) для HDMI-устройства приемника в этом случае выполняются.

Следует отметить сквозную топологию выводов, позволяющую добавлять устройства защиты в разрыв линии данных и упрощающую конструирование печатной платы. Все линии данных входят в корпус с одной стороны и проходят насквозь, не требуя изгиба или трассировки проводников, которые

могут вызвать изменение импеданса линии и снизить качество сигнала.

Серия MicroClamp, как следует из названия, содержит миниатюрные устройства защиты, применяемые в портативных устройствах, критичных к габаритам электронных компонентов. Состоит она преимущественно из одиночных симметричных и несимметричных TVS-диодов, а также из наборов супрессоров, включенных по схеме с общим анодом и обеспечивающих защиту до восьми линий. Данные изделия удовлетворяют промышленным стандартам по защите от ESD (IEC 61000-4-2) $\pm 15 \text{ кВ}$ при действии через воздушный зазор и $\pm 8 \text{ кВ}$ при непосредственном контакте. Размеры корпусов минимально возможные, от $1 \times 0,6 \times 0,5 \text{ мм}$, основные сферы применения — защита клавиатур и карт памяти (рис. 12). Среди новинок серии необходимо отметить однонаправленные устройства uClampxx61P, отличающиеся повышенной до 1500 Вт пиковой мощностью, рабочим напряжением в диапазоне 5–40 В и током утечки не более 0,2 мкА.

Заключение

Использование TVS-устройств защиты позволяет избежать негативных последствий скачков напряжения, вызванных грозовыми, электростатическими разрядами и другими причинами. Компания Semtech выпускает широкую номенклатуру защитных устройств для самых разнообразных

применений, многообразие выбора позволяет разработчикам применить оптимальные приборы для каждого конкретного приложения. Минимальные габариты, высокие уровни поглощаемой мощности, низкая собственная емкость, не оказывающая влияния на защищаемые цепи, — очевидные причины обратить внимание на продукцию Semtech. ■

Литература

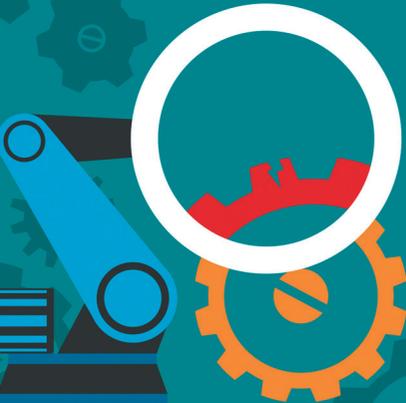
1. Охрименко В. Ограничители напряжения: TVS-диоды Littelfuse // Электронные компоненты. 2016. № 3.
2. Russell B., Puls T. Off-chip ESD Protection Anticipates IC Scaling // EE-Times Asia. August 2007.
3. TVS solutions selector. Guide 2016. www.semtech.com/images/mediacenter/collateral/TVS-SG.pdf
4. EClamp2357NQ: EMI filter and ESD protection for Secure Digital Card interfaces. Datasheet. June 2013. www.semtech.com/apps/filedown/down.php?file=eclamp2357nq.pdf
5. EClamp2422N: ESD/EMI protection for audio interfaces. Datasheet. November 2007. www.semtech.com/apps/filedown/down.php?file=eclamp2422n.pdf
6. Protection design guide for telecom & networking interfaces 2011. www.semtech.com/images/mediacenter/collateral/telecom-tvs-design-guide-us.pdf
7. RClamp0524PA: Ultra low capacitance TVS arrays. Datasheet, 2011. www.semtech.com/apps/filedown/down.php?file=rclamp0522p_0524pa.pdf

Статья опубликована в журнале «Компоненты и технологии» № 3'2017



Защитные TVS-устройства

Защита интерфейсов промышленных устройств





SEMTECH

TVS-диоды
и диодные сборки



A World of Solutions™

Компания КВЕСТ

Тел./факс +7 (812) 640-27-556 (81378) 327-55

E-mail: info@quest.ru

www.icquest.ru

Официальный дистрибьютор
SEMTECH



quest
СОВЕРШЕНСТВО
ТЕХНОЛОГИИ

Применение помехоподавляющих фильтров на выходе преобразователей частоты

Преобразователи частоты порождают электромагнитные помехи и во входных, и в выходных цепях. Для решения проблем электромагнитной совместимости (ЭМС) в системах с такими преобразователями приходится прибегать к нетривиальным решениям. Чтобы надежно устранить на выходе помехи любого вида, компания TDK предлагает широкий ряд фильтров и индуктивностей EPCOS. В статье рассматривается новая технология SineFormer, которая обеспечивает существенные преимущества перед традиционными способами фильтрации.

Карстен ЮРГЕНС (Carsten YURGENS)

Преобразователи частоты применяются для регулировки скорости двигателей переменного тока. В тех приложениях, где преобразователь и двигатель соединены с помощью кабеля достаточно большой длины, между самими проводниками и между проводниками и землей появляются паразитные емкости. Эти емкости наряду с паразитными индуктивностями проводников кабеля и взаимной индуктивностью между этими проводниками образуют колебательный контур.

Синусоидальное напряжение на выходе преобразователя модулируется прямоугольными импульсами разной ширины с крутыми фрон-

тами. Скорость нарастания фронтов достигает 5–10 кВ/мкс, что порождает переходный процесс в колебательном контуре кабеля и вызывает появление в проводниках кабеля высокочастотных токов, а это негативно сказывается на характеристиках системы. Перечислим основные нежелательные последствия от появления высокочастотных токов.

- Уменьшается эффективный ток двигателя. Чтобы компенсировать этот эффект, у преобразователя должна быть достаточно высокая номинальная мощность.
- Величина токов переходного процесса достигает порога срабатывания токовой защиты, и преобразователь отключается.

- Высокочастотные токи наряду с высокочастотными составляющими напряжения вызывают потери в кабеле и двигателе.
- Поскольку часть высокочастотных токов направляется через паразитную емкость в землю, возникают асимметричные помехи. При использовании неэкранированных кабелей это может привести к появлению недопустимо больших полей помех. Во избежание такого эффекта двигателям требуются дорогостоящие экранированные кабели.
- Перенапряжения в кабеле во время переходного процесса могут намного превысить номинальное напряжение двигателя (рис. 1), приведя к его отказу.

Из-за длинных кабелей двигателей, имеющих сравнительно высокую индуктивность, происходят выбросы напряжения при крутых нарастающих фронтах сигналов. В результате возникают следующие проблемы на выходе преобразователя:

- Высокочастотные токи и напряжения в переходном процессе порождают проблемы ЭМС.
- Возрастают акустические шумы двигателя. Выходные конденсаторы частично позволяют подавить помехи. При выборе средств помехоподавления необходимо учитывать такие факторы, как длина кабеля, частотный спектр помех, тип используемого двигателя и его номинальная мощность, которые играют определяющую роль.

Для подавления шума, вызванного переходными процессами в длинных кабелях электродвигателя, применяются дроссели. Весь ток двигателя протекает через эти последовательно установленные дроссели. Скачки тока и напряжения на выходе преобразователя частоты сглаживаются индуктивностью, благодаря которой уменьшается величина напряжения, до которой заряжаются паразитные емкости кабеля. Дроссели в цепи двигателя, главным образом, защи-

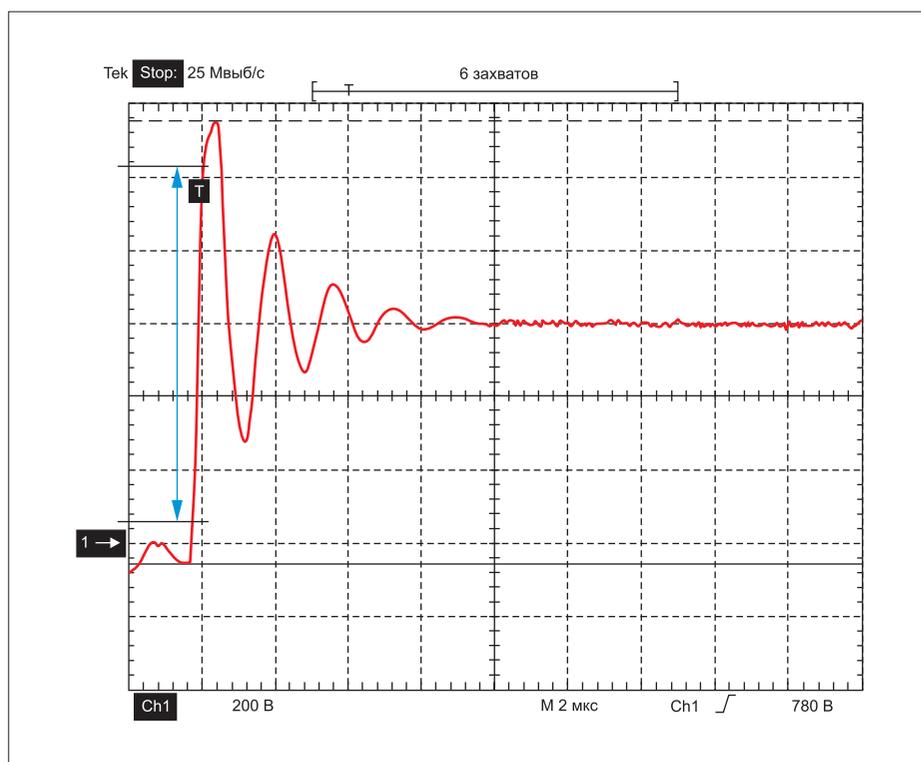


Рис. 1. Выброс напряжения в кабеле двигателя

щают его обмотки от резкого повышения напряжения.

Компоненты серии B86301U* (рис. 2) рассчитаны на работу при номинальном напряжении 520 В АС, а их допустимая нагрузка по току в зависимости от типа составляет 8–1500 А. Эти устройства применяются в цепи кабеля длиной до 100 м при частоте двигателя в диапазоне 0–400 Гц. Компоненты меньшего размера предназначены для работы при максимальной тактовой частоте 16 кГц, допустимой нагрузке по току выше 500 А и частоте всего 2,5 кГц. Все типы дросселей, отвечающих требованиям стандарта IEC 60076–6, производятся с электрической изоляцией, которая соответствует системе UL T-EIS-CF1.

Благодаря тому что допустимая нагрузка по току дросселей для электродвигателей составляет 8–1500 А, они предотвращают всплески напряжения в обмотках и, таким образом, способствуют увеличению срока службы двигателей.

Синусоидальные фильтры

При более жестких требованиях к подавлению помех применяются синусоидальные фильтры. Их принцип действия тот же, что и у LC-фильтров, но, в отличие от дросселей, устанавливаемых в цепи двигателей, их полоса пропускания находится в диапазоне между выходной частотой модулированного напряжения и частотой коммутации преобразователя.

Как известно, синусоидальный фильтр, главным образом, подавляет симметричные помехи между линиями, но практически не уменьшает шумы, влияющие на фазное напряжение. Следовательно, кабели электродвигателей должны быть экранированы. Синусоидальные фильтры уменьшают шумы двигателей и потери, обусловленные вихревыми токами, позволяя использовать кабели, длина которых намного превышает 100 м.

К типовым синусоидальным фильтрам относятся компоненты EPCOS серий B84143V*R227, R229 и R230. Они предназначены для работы с непрерывными тока-

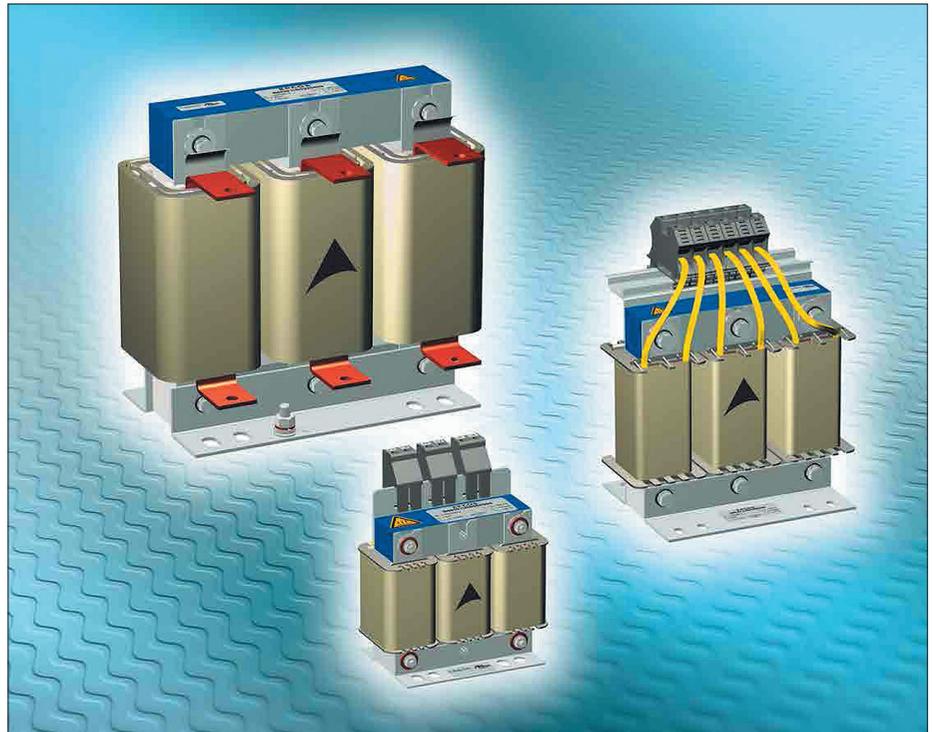


Рис. 2. Дроссели для электродвигателей подавляют выбросы напряжения

ми 4–320 А при номинальном напряжении 520–690 В. В зависимости от типа допустимая тактовая частота преобразователей составляет 1,8–16 кГц.

Технология SineFormer

Дроссели в цепях электродвигателей и синусоидальные фильтры, подавляющие броски напряжения в кабелях, не справляются с помехами, оказывающими воздействие на фазное напряжение. С учетом этого обстоятельства необходимо использовать экранированные кабели. Более того, токи через подшипники электродвигателя трудно уменьшить, принимая только описанные выше меры.

Чтобы ослабить асимметричные помехи в кабеле электродвигателя до такой степени,

чтобы исключить необходимость в экранировании кабеля, применяется синусоидальный фильтр наряду с тококомпенсированным дросселем и заземленными конденсаторами. На рисунке 3 представлена такая схема, основанная на использовании технологии EPCOS SineFormer.

Фильтры SineFormer подавляют не только симметричные, но и несимметричные помехи, исключая необходимость в дорогостоящих экранированных кабелях и защищая электродвигатели.

Преимущества

К техническим преимуществам использования помехоподавляющих фильтров SineFormer относятся следующие:

- ослабление dv/dt до <500 В/мкс;
- ослабление шума от электродвигателя;
- существенное уменьшение потерь, обусловленных вихревыми токами;
- существенное ослабление токов в подшипниках;
- устранение наводок от кабеля двигателя на другие кабели;
- более высокая помехозащищенность по сравнению с экранированными кабелями;
- уровень излучаемых радиопомех соответствует требованиям стандартов;
- наилучшее подавление кондуктивных и излучаемых помех по сравнению с другими фильтрующими схемами;
- отсутствие (при необходимости) обратной связи по шине постоянного тока преобразователя.

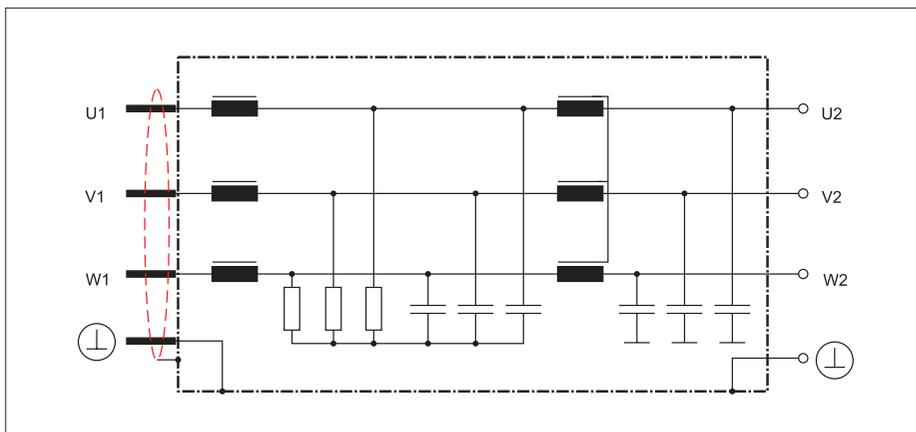


Рис. 3. Электрическая схема с использованием технологии EPCOS SineFormer

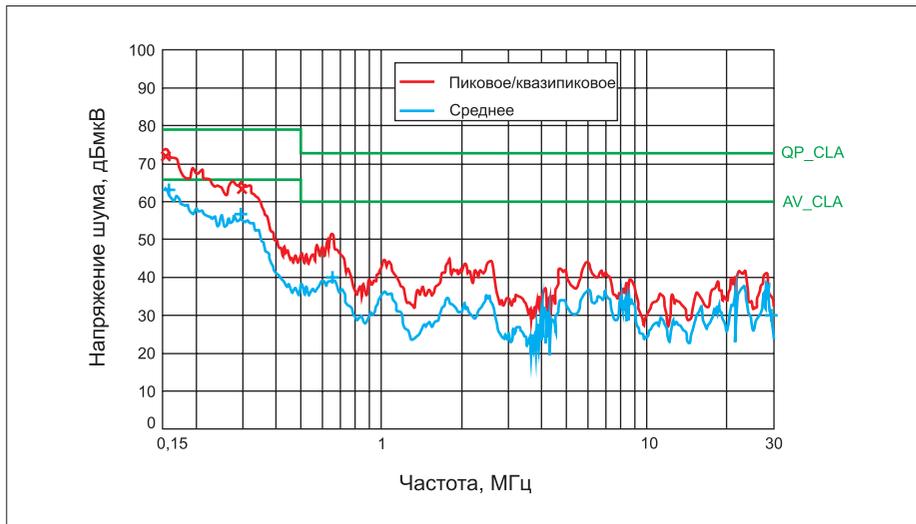


Рис. 4. Измеренный шум в схеме с фильтром SineFormer

У фильтров SineFormer имеются следующие экономические преимущества:

- возможность использовать неэкранированные кабели двигателя, что позволяет сократить расходы на монтаж, значительно увеличить срок службы двигателя и минимизировать расходы на кабели;
- возможность сократить размеры электродвигателя;
- возможность использовать неэкранированные кабели большей длины (до 1000 м);
- отсутствие эксплуатационных расходов, т.к. эти фильтры не требуют принудительной вентиляции;
- бесперебойная работа системы;

- сравнительно малый размер и вес фильтров;
- более мягкие требования к сетевым фильтрам;
- возможность замены.

Решение на основе фильтров SineFormer наряду с неэкранированными кабелями (с разными диаметрами и длиной), как правило, является более экономичным по сравнению с использованием экранированных кабелей. В оборудовании, в котором длина кабелей превышает 100 м, экономия средств за счет использования неэкранированных кабелей вместо экранированных превышает сравнительно высокую стоимость фильтров

SineFormer. Длина кабеля, при которой решение с использованием фильтра SineFormer становится более экономичным, чем с синусоидальным фильтром и экранированным кабелем, составляет около 50 м. При этом даже не учитываются расходы на монтаж экранированных кабелей.

На рисунке 4 показано, насколько хорошо работает технология SineFormer: даже если силовые кабели и неэкранированные кабели электродвигателя проложены рядом, предельная величина шума не превышает безопасного уровня (в данном случае соответствует требованиям EN 61800-3 Category C2). Тот факт, что в кабелях не возникают наводки, является доказательством высокой эффективности рассматриваемой технологии фильтрации.

В целом, эта технология позволяет сократить расходы и повысить техническую готовность оборудования. Несмотря на то, что кабели не экранированы, функционирование осуществляется в допустимых пределах.

Если помехи в кабеле невелики и не сказываются на управляющем сигнале, синусоидальные фильтры B84143V*R127 SineFormer можно заменять сетевыми фильтрами. При этом необходимо в каждом конкретном случае подбирать соответствующую схему сетевого помехоподавляющего фильтра. Например, с этой целью можно задействовать фильтры серии B84243A*. Предельные значения допустимых помех при совместном использовании фильтров SineFormer и неэкранированных кабелей длиной до 300 м определяются требованиями стандарта EN 61800-3 Class C2.

Статья опубликована в журнале «Электронные компоненты» № 3'2017

Испытание технических средств на ЭМС

Электромагнитной совместимостью (ЭМС) называют способность технических средств функционировать согласно назначению в условиях электромагнитных воздействий окружающей электромагнитной обстановки и не оказывать электромагнитного влияния на нее.

Расширение базы радиоэлектронного и электрического оборудования, сокращение расстояний между источниками и приемниками помех, увеличение плотности компоновки узлов в сложных технических средствах, применение базы электронных компонентов, расширение энергетического и спектрального



диапазона применяемых частот, появление преднамеренных помех — все эти факторы определяют актуальность и практическую значимость требований по обеспечению ЭМС.

Сейчас признанным наиболее достоверным способом подтверждения соответствия требованиям норм по ЭМС являются испытания в специализированной лаборатории. Перечень испытаний на ЭМС регламентируется государственными и отраслевыми стандартами, нормативной технической документацией (НТД), включающими нормы и методики проведения испытаний, требования к аттестации испытательного оборудования.

Аккредитованная испытательная лаборатория ЭМС АО «ТЕСТПРИБОР» проводит испытания на электромагнитную совместимость технических средств, согласно государственным и отраслевым стандартам, и НТД, а также техническим заданиям, программам и методикам Заказчиков.

Основные направления испытаний:

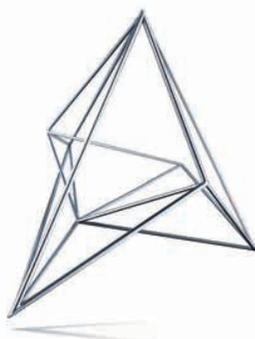
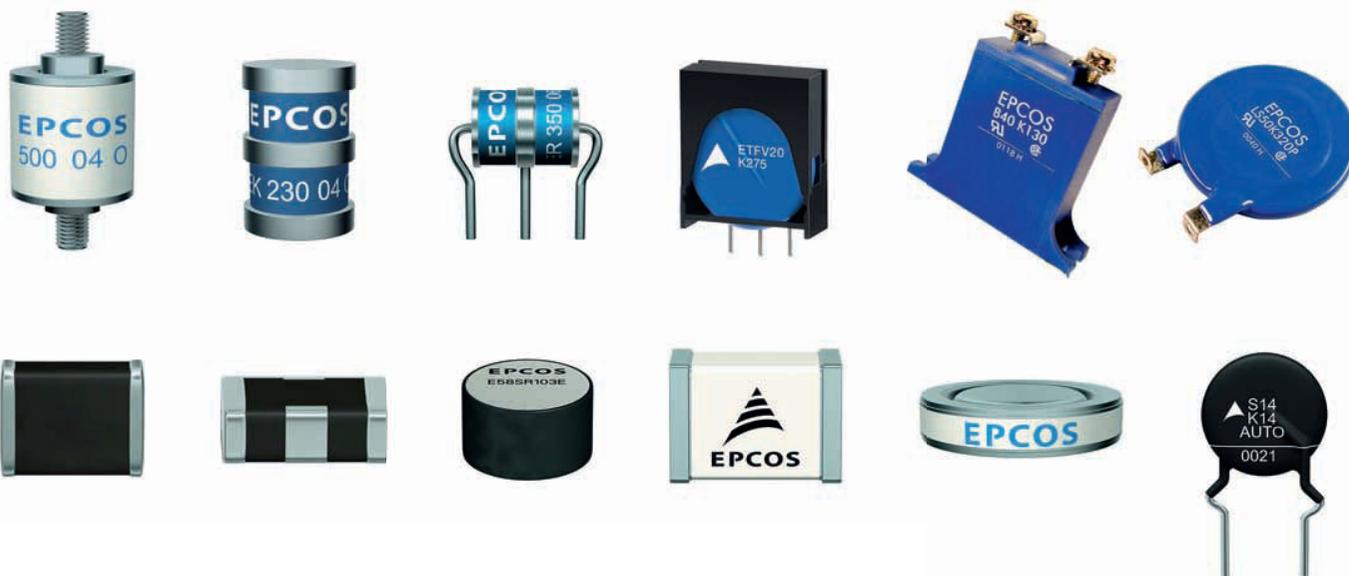
- требования качеству электропитания;
- устойчивость к кондуктивным электромагнитным помехам;
- устойчивость к излучаемым электромагнитным помехам;
- устойчивость к электростатическим разрядам;
- устойчивость к воздействию магнитного поля;
- молниестойкость
- измерение уровня кондуктивных электромагнитных помех;
- измерение уровня излучаемых электромагнитных помех;
- измерение уровня излучаемого магнитного поля;
- измерение эффективности экранирования.



Надёжные поставки исключительно надёжных компонентов



Широкая линейка электронных компонентов
для защиты аппаратуры по току и напряжению.



Symmetron

МОСКВА
Ленинградское шоссе, д. 69, к. 1
Тел.: +7 495 961-20-20
moscow@symmetron.ru

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
ул. Таллинская, д. 7
Тел.: +7 812 449-40-00
spb@symmetron.ru

НОВОСИБИРСК
ул. Блюхера, д. 716
Тел. +7 383 361-34-24
sibir@symmetron.ru

МИНСК
ул. В. Хоружей, д. 1а, оф. 507
Тел. +375 17 336-06-06
minsk@symmetron.ru

www.symmetron.ru

Применение помехоподавляющих входных фильтров

Игорь КУРАЕВ

В статье рассматривается проектирование входных фильтров для оптимизированных силовых модулей и методы измерения, позволяющие установить, как выполняются требования к ЭМС. Кроме того, обсуждаются разные виды сетевых фильтров, приводятся рекомендации по использованию и результаты натурального эксперимента. Статья во многом опирается на [1].

Введение

Как и прежде, входные фильтры являются необходимым средством для успешной сертификации конечных изделий на соответствие требованиям к электромагнитной совместимости (ЭМС). Эта сертификация, в первую очередь, касается устройств на базе импульсных источников питания, причем независимо от мощности компонента, используемого для преобразования напряжения переменного тока. Импульсные преобразователи генерируют промышленные и электромагнитные помехи при наводке напряжения переменного тока на линии подключения и излучение независимо от индивидуальной топологии и области применения. Некоторые изготовители компонентов, предназначенных для импульсного преобразования напряжения, оптимизируют силовые модули, чтобы уменьшить помехи в линиях подключения и излучаемые помехи.

Поскольку остаточные пульсации по выходным цепям этих модулей обычно имеют крайне малые значения, в большинстве приложений выходной фильтр может быть рассредоточен. Однако поскольку входной ток понижающего преобразователя тоже является импульсным, в конечном приложении могут возникать кондуктивные и радиочастотные помехи.

Для уменьшения пульсаций входного тока силовоточных приложений используются многофазные преобразователи, в которых фазы рабочей частоты сдвинуты на $360^\circ/N$ (N — число фаз). Такая мера помогает уменьшить пульсации, но не избавляет от коммутационных помех, которые проникают в провода питающей сети. Разработчик оборудования

с использованием импульсных преобразователей должен принять взвешенное решение, куда установить входной фильтр — непосредственно перед силовым модулем или вблизи точек ввода напряжения.

В первую очередь, мы обсудим, как возникают шумы и помехи в дифференциальном режиме — в системе с симметричным прямым и обратным током между источником и нагрузкой в линиях подключения импульсного преобразователя (рис. 1).

Частота пульсаций напряжения во входной цепи совпадает с рабочей частотой преобразователя, а форма входного тока — с током через накопительную индуктивность (дроссель) силового модуля. Входной ток протекает через конденсатор C_{IN} . Реальные конденсаторы, как известно, обладают резистивным (ESR) и индуктивным компонентами (ESL) (рис. 2). Из-за ESR входного конденсатора и конечного импеданса линий подключения силового модуля наличие компонента переменного тока приводит к возмущению на них нежелательного падения напряжения.

В этой модели напряжение шума проявляется как дифференциальный сигнал. Амплитуда напряжения помех, возникающая на входном конденсаторе, существен-

но зависит от значения ESR используемого конденсатора. Электролитические конденсаторы имеют относительно высокий уровень ESR , величина которого может варьироваться от нескольких мОм до нескольких Ом. Как следствие, напряжение помех находится в диапазоне между несколькими мВт и несколькими Вт. С другой стороны, у керамических конденсаторов ESR очень мал — всего несколько мОм и, следовательно, шумовое напряжение не превышает нескольких мВт. Кроме того, большое влияние на напряжение помех оказывает расчет печатной платы силового модуля.

Для уменьшения дифференциального шума на входе преобразователя устанавливается, по крайней мере, один простейший LC-фильтр, который минимизирует составляющую переменного тока в линии. В высокоимпедансных системах, т. е. в случае, когда входной импеданс каскада не влияет на выходной импеданс предыдущего каскада, такой входной фильтр теоретически обеспечивает ослабление напряжения в полосе затухания 40 дБ/декаду. Но на практике достигаются меньшие уровни подавления. Так происходит, во-первых, потому, что нагрузка фильтра имеет малый импеданс и влияет на передаточную характеристику фильтра. Во-вторых, компо-

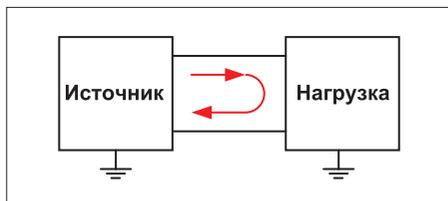


Рис. 1. Симметричная система

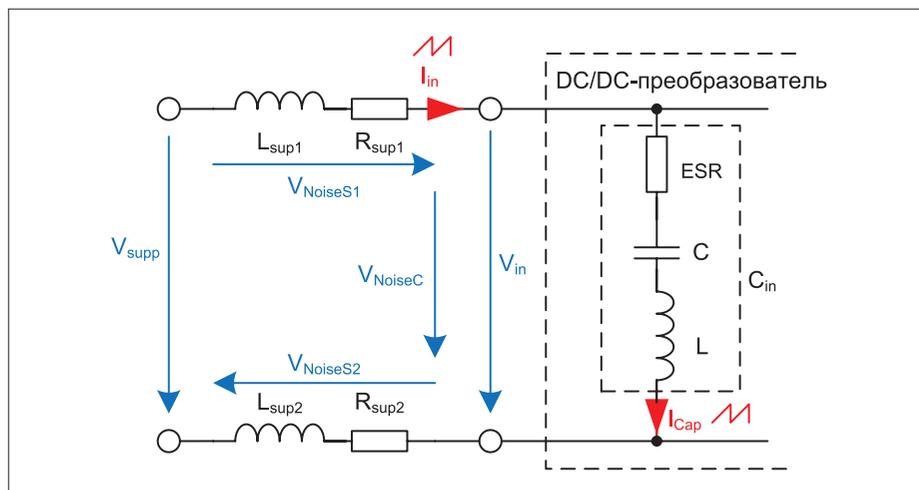


Рис. 2. Эквивалентная полная схема для определения напряжения помех

ненты такого фильтра неидеальны и имеют собственные неизбежные потери.

При определении параметров LC-фильтра частота среза f_C выбирается так, чтобы она была ниже коммутационной частоты f_{SW} силового модуля. Если отношение этих частот составляет 1/10, теоретически на частоте переключения, амплитуда которой является основной в общем спектре помех, уровень вносимых потерь достигает 40 дБ. Таким образом, будем исходить из следующего условия:

$$f_C = \frac{f_{SW}}{10}. \quad (1)$$

Частота среза LC-фильтра определяется так:

$$f_C = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L_f \cdot C_f}}. \quad (2)$$

В качестве примера для расчета фильтра примем индуктивность равной 10 мкГн. В этом случае:

$$C_f = \frac{1}{(2\pi \cdot 0,1 f_{SW})^2 \cdot L_f}. \quad (3)$$

При принятии решения о размещении элементов фильтра, который показан на рисунке 3, конденсатор фильтра устанавливается со стороны источника напряжения или силового модуля. При этом, если используется несколько включенных параллельно конденсаторов, конденсатор с лучшими частотными свойствами следует установить ближе к источнику помех. Решающим фактором для ослабления тока импульсного источника напряжения является индуктивность катушки индуктивности фильтра.

Если добротность фильтра слишком велика, в случае резкого изменения входного напряжения могут появиться паразитные колебания, подлежащие подавлению. Примем, что для обеспечения стабильности выходной импеданс входного фильтра $Z_{OUT, FILTER}$ в широком частотном спектре должен быть ниже полного входного сопротивления силового модуля $Z_{IN, CONVERTER}$:

$$|Z_{OUT, FILTER}| < |Z_{IN, CONVERTER}|. \quad (4)$$

Кроме того, частота среза f_C входного фильтра должна быть намного ниже частоты f_{CO} среза силового модуля:

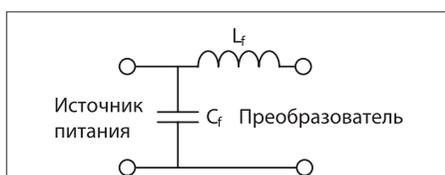


Рис. 3. Размещение элементов фильтра

$$f_{C, FILTER} \ll f_{CO, CONVERTER}. \quad (5)$$

Из рисунка 4 видно, что это достигается путем установки шунтирующего звена — керамического многослойного конденсатора, параллельного входу силового модуля.

Шунтирующий элемент уменьшает добротность входного фильтра и, следовательно, его выходное сопротивление на резонансной частоте. Формула (6) применяется для расчета сопротивления затуханию R_D при добротности фильтра $Q_F = 1$:

$$R_D = \sqrt{\frac{L_f}{C_f}}. \quad (6)$$

Величина емкости шунтирующего конденсатора C_D , снижающего добротность фильтра до вполне приемлемого значения, находится в диапазоне между пяти- и десятикратными значениями номинальной емкости конденсатора фильтра C_f :

$$(5C_f) < C_D < (10C_f). \quad (7)$$

В качестве альтернативного варианта ослабления фильтра можно выбрать электролитический конденсатор, установив его параллельно выходу фильтра вместо шунтирующего звена. Как правило, величины ESR электролитного конденсатора достаточно для ослабления добротности фильтра.

Выбор компонентов LC-фильтра

Оба элемента фильтра — и конденсатор, и катушка индуктивности в действительности обладают не только емкостными, но и индуктивными свойствами. Как известно, фильтрующий эффект катушек индуктивности в наибольшей мере проявляется на их собственной резонансной частоте SRF (Self-Resonant Frequency). Значение SRF катушек в большой мере зависит от их индуктивности и конструкции, которая определяет емкостную связь между витками обмотки. Довольно подробно особенности выбора дросселей описаны в [2–3].

Конденсаторы тоже имеют собственную резонансную частоту SRF . Она, в свою очередь, в значительной мере зависит от емкости, технологии, конструктивного исполнения и, особенно, от длины выводов конденсатора. Следовательно, при выборе

компонентов фильтра желательно удостовериться, что SRF обоих компонентов находится в самой верхней части частотного диапазона, в котором напряжение радиочастотных помех имеет максимальный уровень, или, соответственно, в той полосе частот спектра, в которой фильтр должен быть активным. Некоторые особенности работы конденсаторов в импульсных цепях и выбора этих компонентов рассматриваются, например, в [4].

Определяющим компонентом для уменьшения дифференциального шума является катушка индуктивности, поскольку именно она противодействует быстрому нарастанию и падению тока во входной цепи. На рисунке 5 показаны графики зависимости полного сопротивления от частоты для трех индуктивностей, выполненных на стержневых сердечниках, из семейства WE-SD компании Würth Elektronik.

Поскольку чем выше индуктивность, тем меньше SRF , рекомендуется выбирать катушку, численное значение индуктивности которой меньше емкости конденсатора фильтра. На практике максимальное значение индуктивности фильтра выбирается равным 10 мкГн, т. к. в зависимости от конструкции собственная резонансная частота этой индуктивности достигает 30 МГц. По существующим стандартам это максимальная частота для оценки кондуктивных помех.

Кроме того, необходимо учитывать, что большой рабочий ток, значительно превышающий номинальный ток катушки индуктивности фильтра, может привести к повреждению изоляции провода ее обмотки. Если КПД импульсного преобразователя обозначить как η , эффективный входной ток силового модуля можно вычислить с помощью уравнения (8):

$$I_{IN} = \frac{V_{OUT} \cdot I_{OUT}}{V_{IN} \cdot \eta}. \quad (8)$$

Из соображений безопасности в качестве номинального тока катушки фильтра следует выбрать большее значение тока. В качестве конденсатора фильтра можно задействовать электролитический конденсатор с жидким электролитом, полимерный или даже керамический конденсатор. При этом необходимо, чтобы добротность фильтра на частоте среза была достаточно малой, как уже упоминалось.

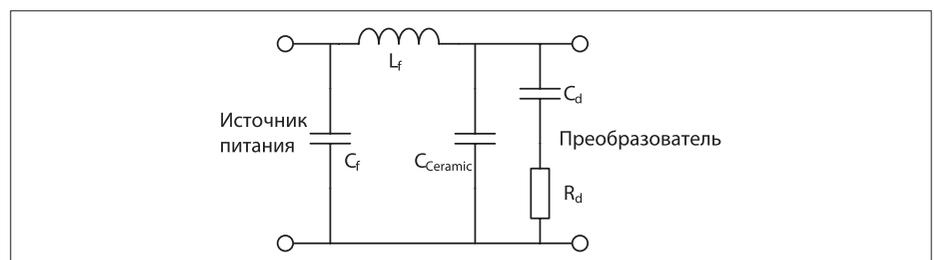


Рис. 4. Увеличение затухания входного фильтра

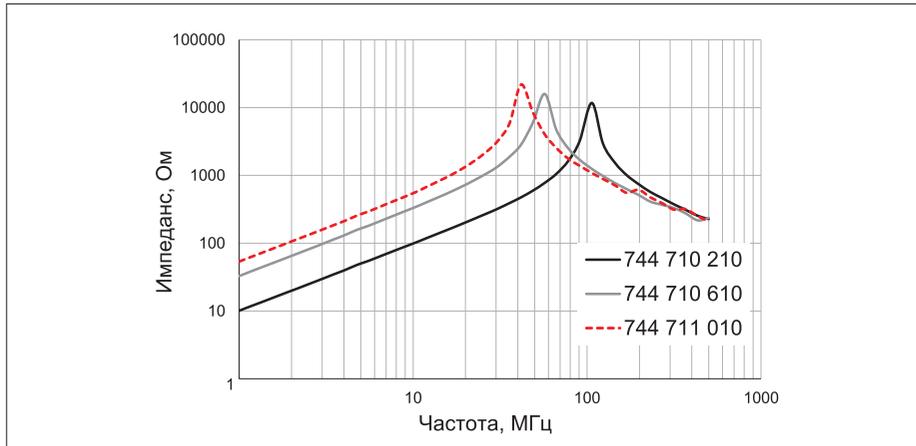


Рис. 5. Пример зависимости импеданса от частоты и конструктивного исполнения трех катушек индуктивности серии WE-SD компании Würth Elektronik

При использовании π -фильтра следует принимать дополнительные меры. В оптимальном случае входной фильтр требуется устанавливать как можно ближе к входу силового модуля. Если этот фильтр расположен дальше, исходя из геометрических и других соображений, на высоких частотах линии подключения могут работать как антенна между входным фильтром и силовым модулем. Однако индуктивность этих линий связи можно также использовать вместе с керамическим конденсатором как дополнительный LC-фильтр с более высокой частотой среза (рис. 6). Из-за его ничтожно малого ESR керамический многослойный конденсатор может закорачивать токи, возникающие от высокочастотных помех, на землю.

Собственная резонансная частота конденсатора должна находиться примерно в области спектра рабочей частоты силового модуля. На рисунке 7 показаны кривые полного со-

противления керамических конденсаторов WCAP-CSGP типоразмера 0805 от компании Würth Elektronik.

Из компонентов, характеристики которых показаны на рисунке 7, на тактовой частоте 2 МГц для рассматриваемой задачи подходит, например, конденсатор емкостью 1 мкФ (кривая красного цвета). Даже керамический конденсатор емкостью 100 нФ (кривая оранжевого цвета), который используется в качестве блокирующего конденсатора во многих

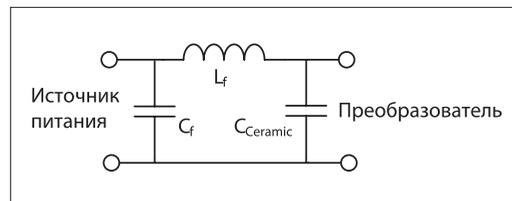


Рис. 6. Входной π -фильтр

электронных схемах, является вполне подходящим кандидатом для указанных целей. Однако заметим, что по сравнению с конденсатором емкостью 1 мкФ, у 100-нФ конденсатора величина ESR в девять раз выше.

Выбор выходного фильтра и его особенности

Поскольку силовые модули MagI³C от компании Würth Elektronik характеризуются ничтожно малыми остаточными пульсациями выходного напряжения, необходимость в выходном фильтре в таких случаях отсутствует. Однако если компоненты с питанием от импульсного преобразователя используют коммутируемые интерфейсы (например, мультиплексоры датчиков, аналоговые коммутационные схемы и т. д.), то для фильтрации выходного напряжения требуется выходной фильтр.

Схема выходного фильтра, представленная на рисунке 6, сопоставима со схемой на рисунке 8. Однако, как правило, невозможно сделать окончательный вывод о необходимости и эффективности такого выходного фильтра, поскольку для каждого конкретного приложения требуется свой расчет. Выходной фильтр позволяет уменьшить остаточные пульсации выходного напряжения силового модуля до минимума или по-

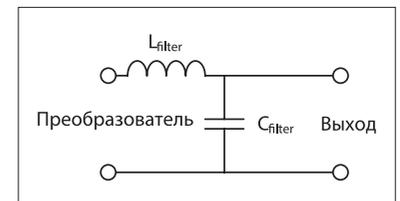


Рис. 8. Выходной фильтр

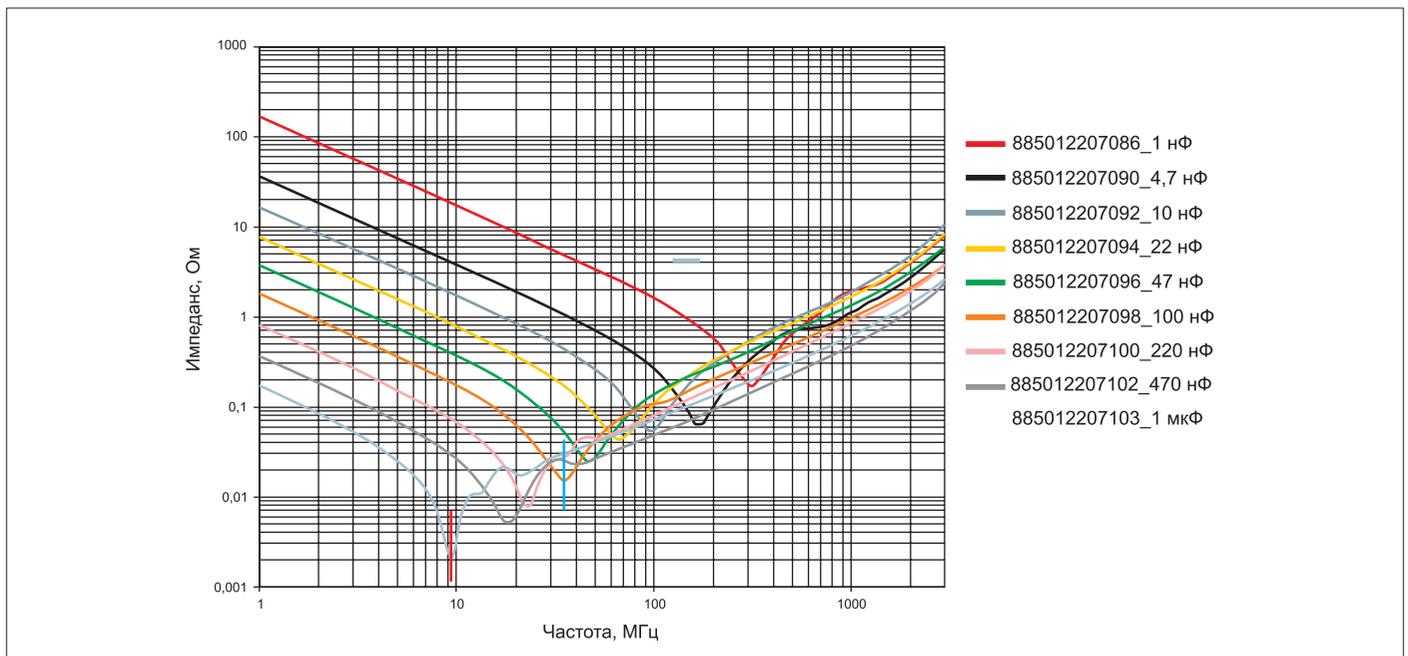


Рис. 7. Пример зависимости импеданса от частоты конденсаторов WCAP-CSGP типоразмера 0805 от компании Würth Elektronik

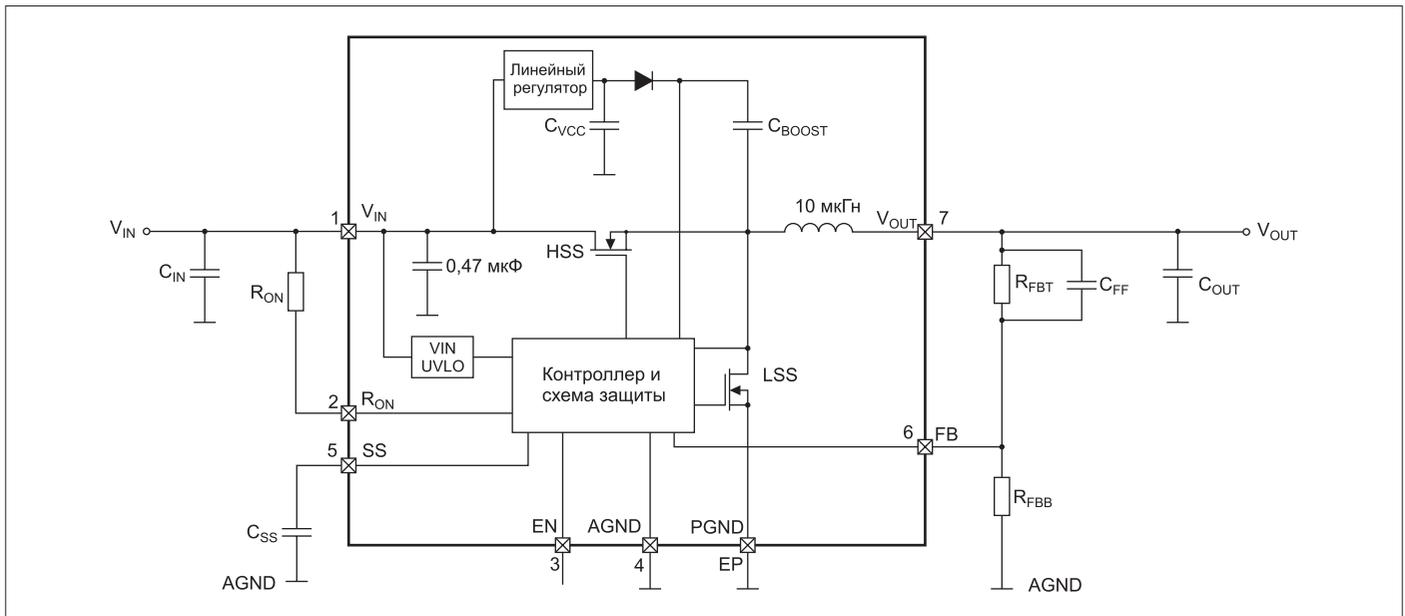


Рис. 9. Структурная схема оценочной платы WPMDH1200601JEV для модуля питания MagI³C от компании Würth Elektronik

давить нежелательные субгармонические колебания. Фильтр рассчитывается тем же способом, которым мы воспользовались выше, но принимать меры для ухудшения его добротности уже не требуется.

Измерение напряжения шумов и помех в цепях питания и излучаемых радиопомех

Измерение напряжения шумов и помех выполняется в соответствии с основным стандартом IEC CISPR 16-2-1* [5]. В этом стандарте описываются типы измеряемых помех, оборудование, которое должно использоваться для разных измерений, и из-

мерительная установка для настольных и напольных устройств. Уровень помех в проводах питающей сети оценивается в диапазоне частот 9 кГц...30 МГц. К измерительным приборам помимо приемника электромагнитных помех относятся схемы стабилизации полного сопротивления линии LISN (Line Impedance Stabilizing Network), пробники напряжения, токовые клещи и емкостные пробники напряжения. Длина кабеля между тестируемым устройством и LISN не должна превышать 80 см. Приемник электромагнитных помех оценивает асимметричное шумовое напряжение, которое разделяется в LISN для отдельных проводов кабеля.

Метод измерения излучаемых радиопомех с частотой выше 30 МГц описан в базовом стандарте IEC CISPR16-2-3** [6]. Измерительная среда представляет собой полностью безэховую комнату с токопроводящим полом или в меньших масштабах — полностью безэховую камеру***.

Анализ результатов измерения шумов и помех

В этом разделе мы опишем измерение напряжения шумов и помех на примере оценочной платы семейств MagI³C модулей питания WPMDH1200601JEV от компании Würth Elektronik (рис. 9). Плата оснащена модулем понижающего DC/DC-преобразователя стабилизатора напряжения WPMDH1200601JT [1] с диапазоном рабочего входного напряжения 6–42 В и током нагрузки до 2 А при регулируемом выходном напряжении в пределах 0,8–6 В.

Уже на предварительном этапе можно измерить с помощью осциллографа составляющую переменного тока на входе силового модуля. Таким образом, выполняя анализ во временной области, спектр помех можно оценить перед расчетом фильтра.

На рисунке 10 показана составляющая — переменное напряжение величиной 80 мВ, измеренное при входном напряжении силового модуля 7,5 В, среднем входном токе 1,2 А и среднем токе нагрузки 2 А. Известно, что импульсные преобразователи представляются по отношению к источнику питания как отрицательное дифференциальное сопротивление, поскольку при постоянной

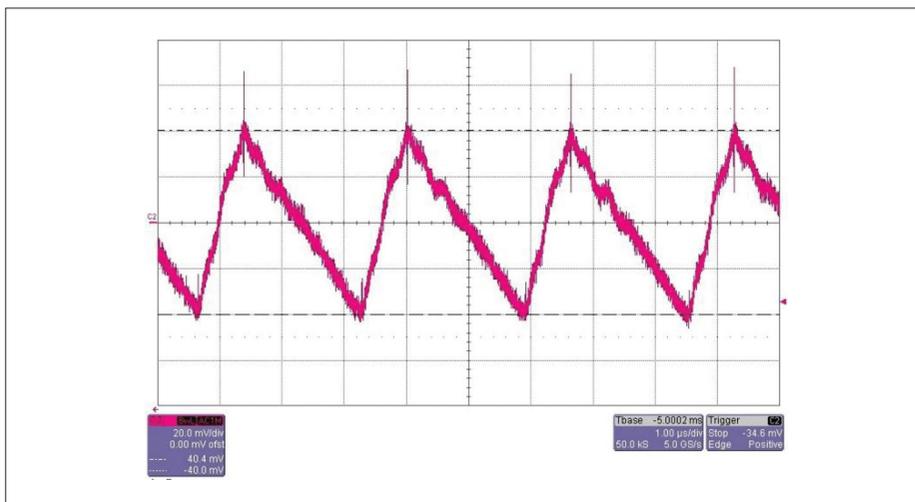


Рис. 10. Сигнал во временной области с широкополосным спектральным наполнением, характерный для понижающего DC/DC-преобразователя WPMDH1200601JT семейства MagI³C от компании Würth Elektronik

* В РФ действует стандарт ГОСТ CISPR 16-2-1-2015 [5], идентичный третьей редакции международного стандарта CISPR 16-2-1:2014. — Прим. пер.

** В РФ действует стандарт ГОСТ CISPR 16-2-3-2016, который идентичен международному стандарту CISPR 16-2-3:2014 и включает в себя третье издание с изм. 1 и 2, 2010 и 2014 гг., соответственно. — Прим. пер.

*** Согласно CISPR 16-2-3, под понятием «полностью безэховая комната (камера)», или FAR (fully-anechoic room), понимается экранированная комната (камера), внутренние поверхности которой облицованы материалом, поглощающим радиочастотную энергию в рассматриваемой полосе частот. — Прим. пер.

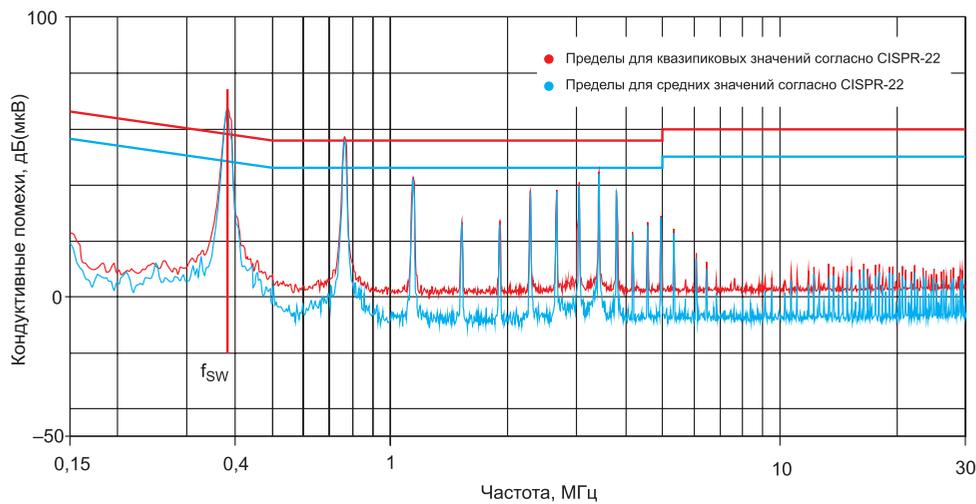


Рис. 11. Уровень кондуктивных помех понижающего DC/DC-преобразователя WPMDH1200601JT семейства Mag³C от компании Würth Elektronik без входного LC-фильтра. Измерения выполнялись согласно EN55022 (CISPR-22)

нагрузке их входной ток возрастает с уменьшением входного напряжения. По этой причине напряжение шума измеряется для «наихудшего случая», т. е. при минимальном входном напряжении и максимальном токе нагрузки.

Однако определяющим фактором при анализе помех остается измерение, которое выполняется только в лаборатории, специализирующейся на проблемах ЭМС. На рисунке 11 показан результат измерения напряжения кондуктивных помех модуля без входного фильтра. Целью измерения было установить соответствие оценочной платы требованиям Class B стандарта EN55022 (CISPR-22) относительно кондуктивных помех, который дает частичную презумпцию соответствия Европейской директиве 2014/30/ЕС (2004/108/ЕС) по электромагнитной совместимости****.

Рассматриваемый в качестве примера силовой модуль работает на тактовой частоте 370 кГц. В общем спектре помех максимальная амплитуда (пик красного цвета: 68 дБ (мкВ)) достигается именно на этой частоте. Амплитуда плотности шумового напряжения падает со скоростью около 40 дБ/декаду, что означает отсутствие значительного уровня помех выше 15-й гармоники от тактовой частоты преобразователя. Однако видно, что только выше 9-й гармоники уровень помех падает более чем на 10 дБ ниже предела при измерении с помощью среднеквадратичного детектора (синяя линия).

Для расчета подходящего входного LC-фильтра воспользуемся уравнением (3). Учитывая относительно низкую рабочую частоту преобразователя, выбираем катушку индуктивности с малым значением SRF ,

индуктивностью 4,7 мкГн и рассчитываем емкость конденсатора нашего фильтра:

$$C_F = \frac{1}{(2\pi \cdot 0,1 f_{sw})^2 \cdot L_F} = \frac{1}{(2\pi \cdot 0,1 \cdot 370 \text{ кГц})^2 \cdot 4,7 \text{ мкГн}} = 3,9 \text{ мкФ} \quad (9)$$

Выбираем емкость конденсатора фильтра равной 10 мкФ, чтобы учесть допустимые отклонения и технологический запас. Максимальный входной ток рассчитывается с помощью уравнения (8). Для этого вычисления требуется учесть КПД оценочной платы, который определяется путем измерения и в этом случае равен 91%. Входной ток с учетом КПД равен:

$$I_{IN} = \frac{V_{OUT} \cdot I_{OUT}}{V_{IN} \cdot \eta} = \frac{5 \text{ В} \cdot 2 \text{ А}}{6 \text{ В} \cdot 0,91} = 1,83 \text{ А} \quad (10)$$

На основе выбранной индуктивности фильтра и входного тока можно определить подходящую катушку индуктивности. С этой целью выбираем неэкранированную катушку индуктивности 744 774 50 47 типоразмера 5820 из серии PD2 от Würth Elektronik. На рисунке 12 показан результат измерения уровня радиопомех с учетом согласованного фильтра.

Величина радиопомех, измеренных на рабочей частоте переключения 370 кГц, составила 30 дБ (мкВ). Уровни всех гармоник находятся ниже 20 дБ (мкВ), так что они достаточно ослаблены. Средний уровень на частоте 370 кГц соответствует пиковому значению и на 18 дБ ниже среднего

предела 47 дБ (мкВ). С точки зрения величины отношения сигнал/шум, это вполне удовлетворительные результаты, чтобы подтвердить соответствие изделия требованиям к ЭМС.

Цель измерения напряжения шума состоит в том, чтобы показать применимость анализа потенциала помех во временной области. Однако анализ в частотной области по-прежнему остается необходимым.

Наконец, требуется определить шунтирующее звено фильтра $R_D - C_D$ (рис. 4). С этой целью для определения R_D используется уравнение (6). Сопротивление R_D , необходимое для уменьшения добротности рассчитанного нами фильтра, определяется следующим образом:

$$R_D = \sqrt{\frac{L_F}{C_F}} = \sqrt{\frac{4,7 \text{ мкГн}}{10 \text{ мкФ}}} = 0,686 \text{ Ом} \quad (11)$$

Как уже упоминалось, чем выше значение шунтирующего резистора, тем выше частота, на которой обеспечивается критическое затухание резонанса фильтра. В данном случае можно выбрать следующее более высокое сопротивление номиналом 1 Ом из ряда E12.

Учитывая уравнение (7), для подавления резонанса воспользуемся конденсатором C_D номиналом 47 мкФ. В качестве этого компонента можно выбрать, например, керамический конденсатор eCap (885 012 108 004) серии WCAP-CSGP от Würth Elektronik.

Особенности измерений на соответствие требованиям IEC CISPR 22

Указанные измерения проводились в соответствии со стандартом IEC CISPR16-2-1. Использование LISN позволило развя-

**** В РФ действует стандарт ГОСТ 30805.22–2013 (CISPR 22:2006) [7], который идентичен международному стандарту CISPR 22:2006 и включает в себя его пятое издание с изм. 1 и 2, 2005 и 2006 гг., соответственно. В настоящее время стандарт CISPR-22 утратил силу, но еще используется в ЕС и РФ. — Прим. пер.

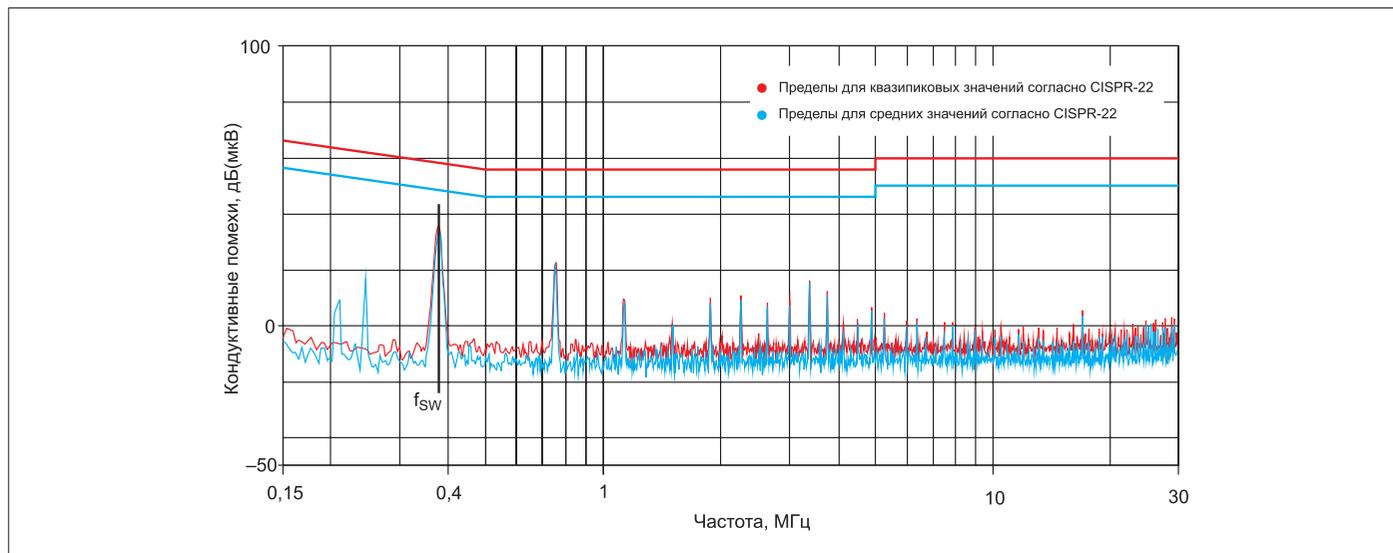


Рис. 12. Уровень кондуктивных помех понижающего DC/DC-преобразователя WPMDH1200601JT семейства Mag1³C от Würth Elektronik с входным фильтром. Измерения согласно EN55022 (CISPR-22) выполнялись с помощью оценочной платы с входным LC-фильтром (4,7 мкГн + 10 мкФ)

зять асимметричное напряжение и приравнять к асимметричному (синфазному) напряжению, которое затем сравнивалось с предельными значениями, установленными стандартом IEC CISPR 22 для устройств частного и коммерческого применения (Class B). Для компонентов электропитания, к которым относятся все типы импульсных преобразователей, нет прямого стандарта, устанавливающего требования к ЭМС. Таким образом, любое приложение, в котором применяется такой преобразователь, должно быть отнесено к определенной категории устройств, а уже затем протестировано в соответствии со стандартом, действующим применительно к конкретному семейству изделий. В рассматриваемом случае мы воспользовались стандартом IEC CISPR 22 для ИТ-устройств с учетом предельных уровней, которые также приведены в общем стандарте IEC 610006-3. Общие стандарты могут применяться в случаях, если не существует конкретного стандарта для типа рассматриваемого устройства.

Выводы

Как и прежде, входные фильтры независимо от уровня переменной составляющей являются необходимым средством для успешной сертификации конечных изделий на соответствие требованиям к электромагнитной совместимости (ЭМС). Для самостоятельного расчета такого входного фильтра можно использовать достаточно простые формулы. Грамотный подход к проектированию фильтра с учетом его импедансов и импульсного преобразователя позволяет избежать возникновения паразитных колебаний, а также обеспечивает стабильность контура управления и самого импульсного преобразователя.

Поскольку целенаправленный выбор компонентов фильтра закладывает основы для его оптимальной конструкции, входной фильтр, созданный с учетом всех требований, гарантирует опре-

деленный успех при тестировании конечного оборудования на соответствие ЭМС. Разработчик конечного оборудования может при необходимости создать собственный импульсный преобразователь и с помощью несложной методики расчета, представленной в этой статье, скорректировать фильтр для решения конкретной задачи. ■

Литература

1. Ranjith Bramanpalli. Input Filters — The Key to Successful EMC Validation // <https://interferencetechnology.com>.
2. Алексей Чистяков. Некоторые особенности обмоток дросселей и трансформаторов для преобразователей // Электронные компоненты. 2016. № 1.
3. Александр Герфер, Ранжит Браманпалли, Джокен Байер. Высокоточный расчет силового дросселя для энергоэффективных приложений // Электронные компоненты. 2016. № 10.
4. Алексей Чистяков. Конденсаторы для источников питания и преобразователей // Электронные компоненты. 2016. № 10.
5. ГОСТ CISPR 16-2-1-2015. Требования к аппаратуре для измерения радиопомех и помехоустойчивости и методы измерения. Часть 2–1. Методы измерения помех и помехоустойчивости. Измерения кондуктивных помех.
6. ГОСТ CISPR 16-2-3-2016. Требования к аппаратуре для измерения радиопомех и помехоустойчивости и методы измерения. Часть 2–3. Методы измерения радиопомех и помехоустойчивости. Измерения излучаемых помех.
7. ГОСТ 30805.22-2013 (CISPR 22:2006). Совместимость технических средств электромагнитная. Оборудование информационных технологий. Радиопомехи промышленные. Нормы и методы измерений.

Статья опубликована в журнале «Электронные компоненты» № 6'2017

Проблемы заземления электронной аппаратуры электроэнергетических объектов

**Заземление может и не быть решением;
скорее оно может быть частью проблемы.**

Joffe E. B., Lock K. S.

Grounds for Grounding. A circuit-to-System Handbook

Заземление электронной аппаратуры в промышленности и в электроэнергетике рассматривается обычно как необходимое условие обеспечения ее работоспособности в условиях воздействия электромагнитных помех. Но так ли это на самом деле? Действительно ли общепринятые сегодня подходы к заземлению электронной аппаратуры позволяют решить проблемы электромагнитной совместимости? Оказывается, ответ на этот вопрос не однозначен, а существующая практика использования заземления противоречива по своей сути. Автором предлагается отличный от применяемого сегодня подход к проблеме заземления электронной аппаратуры, позволяющий избавиться от существующих противоречий.

Владимир ГУРЕВИЧ

Введение

В соответствии с нормативными документами, различают два вида заземления: защитное, выполняемое в целях электробезопасности, и функциональное, выполняемое для обеспечения работоспособности электроустановки (не в целях электробезопасности). Современные электронные устройства управления, защиты и автоматики, применяемые в электроэнергетике, имеют внутренние электронные цепи, полностью изолированные от всех внешних цепей. Например, микропроцессорные устройства релейной защиты (МУРЗ) содержат во входных аналоговых цепях внутренние трансформаторы тока и напряжения, изолирующие внутренние аналого-цифровые преобразователи от внешних цепей тока и напряжения. Логические входы МУРЗ выполнены на оптронах, с высоким уровнем изоляции входа от выхода. Выходные цепи МУРЗ выполнены на основе электромеханических реле, обеспечивающих изоляцию внутренней электронной схемы от внешних цепей. Внутренний импульсный источник питания МУРЗ содержит трансформатор, обеспечивающий гальваническую изоляцию внутренних элементов схемы от внешних цепей питания, да и сама эта цепь питания (постоянного тока) в большинстве случаев полностью изолирована от «земли».

Таким образом, с одной стороны, современные электронные устройства, применяемые в электроэнергетике, не требуют для своей работы наличия функционального

заземления. С другой стороны, заземление электронной аппаратуры часто рассматривается как основная мера ее защиты от электромагнитных помех, то есть как обязательное условие нормального ее функционирования в реальных условиях эксплуатации при воздействии электромагнитных помех. Чего стоит одно лишь название публикации [1], ставящее знак равенства между электромагнитной совместимостью (Electromagnetic Compatibility, EMC) и заземлением для систем автоматики и управления. По свидетельству К. Армстронга [2], «в течение многих десятилетий существует огромное количество мифов вокруг термина «заземление», как при разработке схем, так и в вопросах электромагнитной совместимости». В этой связи проблемы заземления электронной аппаратуры требуют более подробного рассмотрения.

Типы электромагнитных помех

Рассмотрим отдельно четыре основных типа помех:

- кондуктивные;
- индуктивные;
- емкостные;
- электростатические.

Кондуктивные помехи распространяются при наличии непосредственного электрического контакта между электрическими цепями и делятся на два вида:

1. помехи типа «провод–земля», напряжение которых приложено между каждым

из проводников и «землей», которые еще называются несимметричными, синфазными, общего вида;

2. помехи типа «провод–провод», напряжение которых приложено между отдельными электрическими цепями или между элементами одной и той же электрической цепи, которые еще называются симметричными, противофазными, дифференциальными.

Синфазные помехи, в отличие от дифференциальных, как правило, не приводят к сбоям в процессе работы электронного оборудования, но могут полностью вывести из строя такое оборудование из-за электрического пробоя внутренней изоляции (или *p-n*-переходов) в микросхемах и микропроцессорах. С другой стороны, если электронное оборудование полностью изолировано от «земли», то импульсные помехи и перенапряжения относительно «земли» (синфазные несимметричные помехи общего вида) никак не могут повлиять на это оборудование, подобно тому, как высокое напряжение относительно «земли» не мешает птицам спокойно сидеть на высоковольтных проводах. Дифференциальные же помехи вообще не имеют отношения к наличию или отсутствию заземления.

Что касается индуктивных помех, распространяющихся посредством электромагнитных полей, то, как известно, эффективная защита от помех такого типа осуществляется путем размещения чувствительной электронной аппаратуры внутри замкнутых

металлических оболочек («клетка Фарадея»), роль которых призваны выполнять корпуса электронных приборов. Как известно, заземление «клетки Фарадея» никак не влияет на эффективность ослабления ею индуктивных помех.

С емкостными помехами дело обстоит несколько сложнее, поскольку помехи этого типа распространяются через емкостные связи между проходящими рядом проводами, между близко расположенными металлическими корпусами, а также между перечисленными элементами и «землей». Заземление экранов проводов и металлических корпусов (впрочем, так же, как и снижение емкости) позволяет устранить емкостные помехи синфазного типа и практически не влияет на емкостные помехи дифференциального типа.

Статические помехи могут появляться в результате накопления статического заряда на изолированном от «земли» корпусе и возникающих в результате этого периодических пробоев на «землю». Заземление корпуса позволяет предотвратить накопление статического заряда. Однако для устранения электростатических (и даже частично емкостных) помех синфазного типа вовсе не требуется наличие низкоомного заземления, достаточно соединить корпус с системой заземления через высокоомный резистор, сопротивлением около 1 ГОм.

Совершенно очевидно также, что заземление корпуса МУРЗ никак не способно повлиять на помехи всех типов, проникающие на внутренние электронные элементы по кабелям и проводам, подключенным к МУРЗ. Тем не менее внутренняя «земля» электронной схемы во многих типах МУРЗ, выполняющая роль цепи «нулевого (опорного) потенциала», обычно конструктивно соединена с металлическим корпусом, а через него и со внешней системой заземления. Иногда, для чувствительной электроники, используют отдельный контур заземления, соединенный в одной точке с общим контуром заземления (Signal Reference Subsystem), что принципиально не меняет сущности заземления. При этом предполагается, что многочисленные электронные устройства, имеющие электрические и информационные связи между собой, будут обладать общим нулевым (опорным) потенциалом, предотвращающим сбой в работе высокочувствительной электроники из-за электромагнитных помех, создающих дополнительную разность потенциалов между цепями нулевого потенциала, если их не заземлить. Такая практика, по свидетельству [3], «обеспечивает опорный потенциал для релейной защиты и другого оборудования и помогает защитить оборудование и персонал от мощных высокочастотных воздействий». Это общепринятый подход и общая практика обеспечения ЭМС электронной аппаратуры. Однако, как отмечается в [4], «множество проблем с электромагнитными помехами

возникает по той причине, что разработчики считают заземление идеальным и не уделяют достаточно внимания реальным характеристикам систем заземления».

Проблемы конвенциональных систем заземления

Не является секретом, что потенциал системы заземления относительно «земли» может повышаться при разрядах молнии. Вместе с тем считается, что если между всеми электронными устройствами будет сохраняться общий потенциал системы заземления, то есть не будет возникать разность потенциалов между цепями «нулевого потенциала» различных устройств, то это повышение общего потенциала и отличие его от нуля, происходящее одновременно во всех устройствах, не способно вызвать нарушения в работе этих устройств. На этом предположении основана вся теория заземления, предписывающая сохранять минимальными сопротивления элементов системы заземления, применять эквипотенциальные поверхности и тому подобные меры, направленные на то, чтобы предотвратить возможность появления разности потенциалов между цепями «нулевого потенциала» различных устройств, удаленных друг от друга и поэтому заземленных в разных точках, но имеющих электрические и информационные связи между собой. При этом не рассматривается вопрос о том, что происходит в отдельно взятом электронном устройстве при повышении потенциала цепи «нулевого потенциала». Дело в том, что любая электронная схема содержит множество нелинейных элементов и элементов, обладающих емкостью и индуктивностью, соединенных с цепью «нулевого потенциала». Поэтому при импульсном повышении потенциала этой цепи напряжения в различных точках электронной схемы не возрастут полностью синхронно. Это можно наглядно представить как пластину с установленными на ней грузами с разной массой, прикрепленными к пластине посредством пружин с различной жесткостью. При плавном подъеме этой пластины (то есть при плавном увеличении потенциальной энергии) потенциальная энергия всех установленных на ней элементов увеличивается синхронно. Но при резком подъеме пластины произойдет несинхронное изменение положения и потенциальной энергии элементов, а если они были при этом механически соединены между собой, то возможно даже разрушение этих соединений. То есть даже наличие эквипотенциальной поверхности и сохранение нулевой разности между цепями «нулевого потенциала» различных устройств еще не гарантирует отсутствие сбоев в работе высокочувствительной электронной аппаратуры. В реальных же условиях эксплуатации электронной аппаратуры, расположенной на объектах большой

площади, очень сложно, а иногда и вообще невозможно обеспечить условие сохранения нулевой разности потенциалов между цепями «нулевого потенциала» (то есть условие «отсутствия даже малейшего электрического потенциала на корпусе» [5]) при попадании молнии, несмотря на все ухищрения и удорожание системы заземления.

По данным, представленным в [6], в ситуации, когда множество электрических аппаратов и отдельных электронных устройств расположены на значительном удалении друг от друга и заземлены в местах их расположения, неизбежно появление высокой разности потенциалов между точками заземления, которая при разрядах молнии может достигать до 10 кВ и более. Высокое напряжение между удаленными точками заземления возникает в результате падения напряжения на элементах системы заземления при протекании тока молнии через них, а также при протекании токов короткого замыкания. По свидетельству Дж. С. Витакера [7], «чем больше площадь территории защищаемого объекта, тем больший потенциал для проблем». В основополагающем стандарте на системы заземления для электронной аппаратуры [8] отмечается следующее: «При воздействии молнии или при аварийных ситуациях в энергосистеме разность потенциалов между электронным оборудованием и заземленными объектами может быть настолько существенной, что будет представлять угрозу электробезопасности или повреждения электронной аппаратуры».

Из всего вышесказанного следует, что в любом случае низкоомное заземление корпусов большинства типов современной чувствительной электронной аппаратуры управления, автоматики и защиты приводит к возрастанию опасности сбоев в ее работе. И это при протекании тока молнии через систему заземления под действием обычных разрядов молнии. Но разряды молнии — не единственный источник мощных электромагнитных воздействий на электронные устройства.

В последнее время стала актуальной проблема защиты электроэнергетических систем от так называемых преднамеренных дистанционных деструктивных воздействий [9], наиболее мощным из которых является электромагнитный импульс высотного ядерного взрыва (ЭМИ ЯВ). При этом характер воздействия ЭМИ ЯВ на систему заземления существенно отличается от воздействия разряда молнии «по спектральной плотности энергии, переднему фронту импульса, уровню токов, повторяемости импульсов и покрываемой зоне действия» [10].

Во-первых, разряд молнии — это точечное воздействие на систему заземления, в то время как составляющая Е1 ЭМИ ЯВ создает у поверхности земли импульс распределенного электрического поля с напряженностью, достигающей до 50 кВ/м. Это поле имеет

вертикальную и горизонтальную составляющие и охватывает очень большую площадь (сотни и тысячи квадратных километров).

Во-вторых, параметры составляющей E1 ЭМИ ЯВ (2/50 нс) существенно отличаются от параметров грозового импульса (1,2/50 мкс).

В-третьих, если при попадании молнии в молниеотвод и систему заземления ставится задача снизить до минимума сопротивление элементов системы заземления с тем, чтобы снизить падение напряжения на токопроводящих элементах при протекании через них тока молнии, то в случае ЭМИ ЯВ импульс высокого напряжения прикладывается одновременно ко всем элементам системы заземления, выполняющим роль огромной антенны, поглощающей энергию с большой площади. Чем меньше сопротивление элементов этой антенны и чем больше ее размеры, тем выше ее абсорбиционная способность и тем большая часть энергии доставляется напрямую к аппаратуре, подключенной к этой «антенне». Речь идет об импульсном напряжении с амплитудой в сотни киловольт.

О наличии существенных отличий между молнией и ЭМИ ЯВ упоминается также в ряде других источников. Например, в [11] прямо говорится о том, что заземление обычно трактуется как часть цепи, имеющей относительно низкое полное сопротивление по отношению к локальной поверхности земли. Для защиты от ЭМИ ЯВ обычная система заземления, которая соответствует этому определению, может, однако, не быть оптимальной, а может быть намного хуже, чем даже отсутствие заземления». В [12] отмечается, что «технические средства, используемые для защиты оборудования от импульсов молнии с пологим передним фронтом, не являются достаточно эффективными для

защиты от импульсов ЭМИ ЯВ с крутым передним фронтом». В [13] указано, что «в идеале заземление должно поддерживать единый потенциал всех компонентов системы. На практике, однако, ввиду возможных петель индуктивности, емкостных связей, сопротивления элементов присоединения к заземлению, наводок на заземлении, как на антенне, и других явлений, высокие потенциалы могут появиться в системе заземления. Поэтому правильный выбор концепции системы заземления очень важен в философии защиты от ЭМИ ЯВ». К сожалению, далее констатации факта и в этом документе дело не пошло, и никаких специальных систем заземления, способных разрешить противоречие между необходимостью иметь заземление и опасностью, которую представляет собой система заземления при воздействии ЭМИ ЯВ, не предлагается. Еще более категорично звучит утверждение авторов [14], прямо указывающих на отрицательное влияние заземления на работу электронной аппаратуры: «Если не принять специальных мер, оба типа заземлителей — и внутренний, и наружный — могут стать главными источниками наводок, вызванных ЭМИ. Наружные заземлители вообще не могут служить в качестве «отводов» для ЭМИ, поскольку последний широко распределен в пространстве и глубоко проникает в землю. При этом отсутствие замкнутого контура наружного заземления еще не исключает возможности появления наводок от ЭМИ». Аналогичный по своей сущности вывод приводится также и в [10]: «ЭМИ ЯВ может индуцировать очень большие токи и напряжения в «антенну», образованную системой заземления. Эти токи и напряжения системы заземления представляют собой серьезный риск повреждения электронных компонентов...».

Противоречивость ситуации в этом вопросе ярко отражена в фундаментальном труде [15] объемом свыше тысячи страниц. Само за себя говорит уже одно только название раздела 4.1.1: «Заземление может и не быть решением; скорее оно может быть частью проблемы». А на стр. 935 приведены два противоречащих один другому тезиса:

1. «Целью заземления является перенаправление наведенных ЭМИ ЯВ токов в землю».
 2. «Первичным эффектом ЭМИ ЯВ является наведение высоких напряжений или токов во всех протяженных системах и проводниках, таких как линии электропередачи, кабели, антенны, а также системы заземления».
- Из первого тезиса следует, что система заземления является приемной емкостью, поглощающей энергию ЭМИ ЯВ, а из второго — что система заземления является источником высокого напряжения, подводящим энергию ЭМИ ЯВ к заземленной аппаратуре.

Еще одной проблемой, связанной с заземлением, являются фильтры, предназначенные для защиты чувствительных входов и цепей питания электронной аппаратуры (рис. 1). Как видно по этому рисунку, синфазные несимметричные фильтры, которые иногда называют однолинейными (single line), проще дифференциальных симметричных (их иногда называют двухлинейными — two line), содержат меньше элементов, меньше по размерам и дешевле. По этой причине большинство производителей предпочитают выпускать именно синфазные несимметричные фильтры для защиты от ЭМИ ЯВ. Другие типы фильтров вообще даже не рассматриваются в документе [16], посвященном анализу различных типов фильтров, предназначенных для защиты оборудования от ЭМИ ЯВ.

Как следует из рис. 1, фильтры такого типа ослабляют сигнал, поступающий на их вход, за счет внесения потерь последовательно включенными индуктивностями и шунтирования импульсного сигнала на землю конденсаторами. «Земля», подключаемая через расположенную на корпусе клемму, является обязательным условием работоспособности фильтра. Поскольку эта клемма не изолирована от корпуса, то часто сам корпус является общим электродом заземления (рис. 2).

Таким образом, эти фильтры построены так, чтобы отводить энергию, попадающую

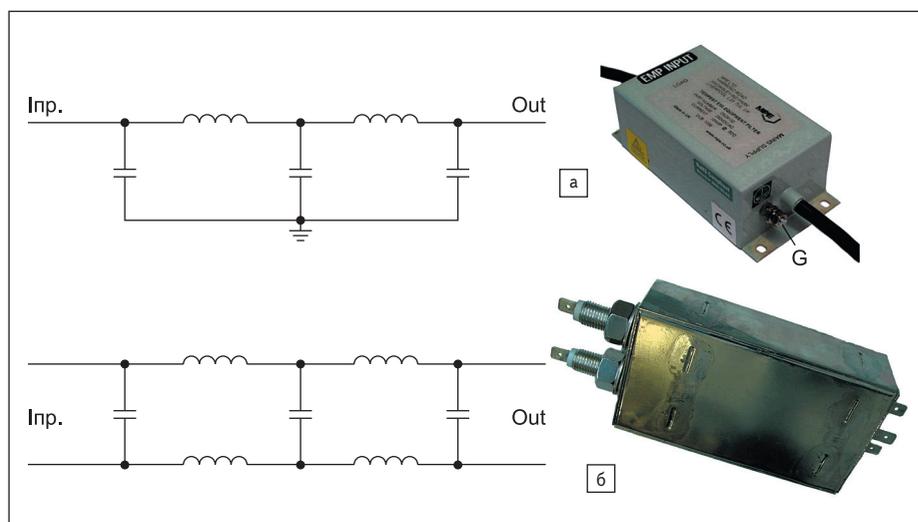


Рис. 1. Упрощенные схемы и внешний вид LC-фильтров, предназначенных для защиты от ЭМИ ЯВ:
а) синфазного несимметричного с общим проводом (asymmetrical common mode filters);
б) симметричного дифференциального (symmetrical differential mode filters)

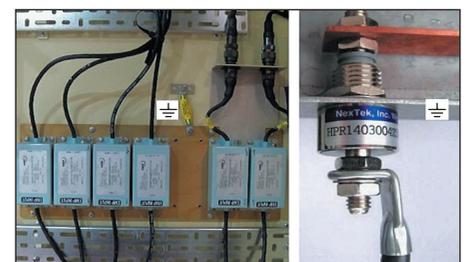


Рис. 2. Фильтры ЭМИ ЯВ с корпусом, выполняющим роль электрода заземления

на их входы, в область нулевого потенциала, в качестве которой автоматически подразумевается система заземления, но которая таковой вовсе не является. Остается только догадываться, как поведет себя такой фильтр при одновременном появлении высокого потенциала и на его входе, и на общем электроде заземления (вместо нулевого потенциала). Во всяком случае, работать корректно в таком режиме он явно не будет. По свидетельству [17], такие фильтры далеко не всегда имеют приемлемые характеристики и не рекомендуются для защиты от ЭМИ ЯВ. Возможно, именно по этой причине некоторые производители фильтров просто не указывают их вид в своих технических проспектах, а некоторые — хотя и указывают, но создают при этом такую путаницу, в которой неспециалисту в области фильтров очень трудно разобраться. Например, в проспекте известной английской компании MPE приведены описания «двухфазных» для переменного тока и «двухлинейных» для постоянного тока фильтров, предназначенных для использования в изолированных от «земли» сетях, но при этом приведены характеристики асимметричных фильтров.

Заземление типа «плавающая земля»

Если заземление создает так много проблем, может быть, электронную аппаратуру вообще лучше не заземлять? Ведь неспроста в отчете специализированной рабочей группы С4.206 СИГРЭ, посвященной защите электронного оборудования энергосистем от преднамеренных электромагнитных воздействий [18], заземление электронной аппаратуры вообще не рассматривается. Такой вариант заземления (вернее, «незаземления») рассматривается в технической литературе под названием «плавающей земли» (floating ground) — например в базовом американском военном стандарте на системы заземления MIL-HDBK-419A [19], откуда он перекочевал и в другие военные стандарты и наставления, например в [13]. Об этом варианте заземления в документах [19] и [13] говорится следующее: «Эффективность плавающей земли зависит от степени ее реальной изоляции от расположенных вблизи электропроводящих частей оборудования, то есть, чтобы быть эффективной, плавающая земля должна реально «парить в воздухе». На объектах большой площади часто бывает трудно создать такую полностью изолированную систему, но даже если такая система и была создана, очень трудно ее сохранить. В дополнение к этому плавающая земля имеет и другие ограничения. Например, статический заряд, часто накапливающийся в изолированных электронных цепях, может при разряде представлять серьезную опасность, особенно если такие цепи расположены вблизи высоко-

вольтных линий электропередачи. Поэтому большинство видов современного электронного оборудования, питающегося от внешних источников питания, имеет нулевой опорный потенциал в виде заземления. Еще одной проблемой плавающей земли является опасность выноса высокого потенциала на электронные цепи при повреждениях в силовых цепях, а также при воздействии разряда молнии. Не будучи соединенными в единое целое, части конструкции могут приобрести высокую разность потенциалов, сопровождающуюся пробоем и электрической дугой».

В противоположность этим утверждениям, специалисты фирмы Associated Power Technologies (APT), одного из лидирующих производителей мощных источников питания, считают [20], что: «Системы заземления являются источником целого набора проблем... Темная сторона систем заземления заключается в том, что они могут прервать функционирование электронной системы... Небольшие контуры заземления инжектируют шум в электронные системы и приводят к прерыванию или нарушениям связи в каналах передачи данных, таких как интерфейсы RS-232 или GPIB. Большие контуры заземления могут повредить электронное оборудование и даже могут представлять опасность с точки зрения техники безопасности при протекании через них больших токов». На основании проведенного в [20] анализа эти специалисты приходят к выводу о предпочтительности «плавающей земли» для электронных систем, подчеркивая, что такой подход является стандартом для продукции, выпускаемой этой компанией.

Так какой же выход из этой противоречивой ситуации?

Решение проблемы: «специальная плавающая земля»

Решением проблемы, по нашему мнению, может быть использование специальной (усовершенствованной) «плавающей земли», то есть локальной области общего потенциала (местной «земли»), образованной, например, специальной медной шиной (3), расположенной на изоляторах в металлическом шкафу (1) с установленной электронной аппаратурой (2) (рис. 3). Изолированные (с минимальной емкостью от шкафа) с помощью изоляторов (4) отдельные корпуса каждого электронного устройства (2) должны быть соединены с этой медной шиной (3). Медные шины различных шкафов, расположенных на небольшом расстоянии друг от друга в одном помещении, должны быть соединены вместе внешней медной шиной, расположенной коаксиально в экранированном кожухе (5) (рис. 4).

Локальная область нулевого потенциала должна быть соединена со внешней системой заземления лишь через высоковольтный высокоомный резистор (8) (рис. 5) сопротивлением 1 ГОм, препятствующий накоплению статического заряда на корпусах электронных устройств.

Передача информации между электронными устройствами, расположенными на удалении друг от друга в различных помещениях, должна осуществляться посредством оптического волокна, а передача дискретных команд и сигналов типа «включить–отключить» между такими удаленными объектами должна осуществляться посредством специальных изолирующих интерфейсов (быстродействующих герконо-

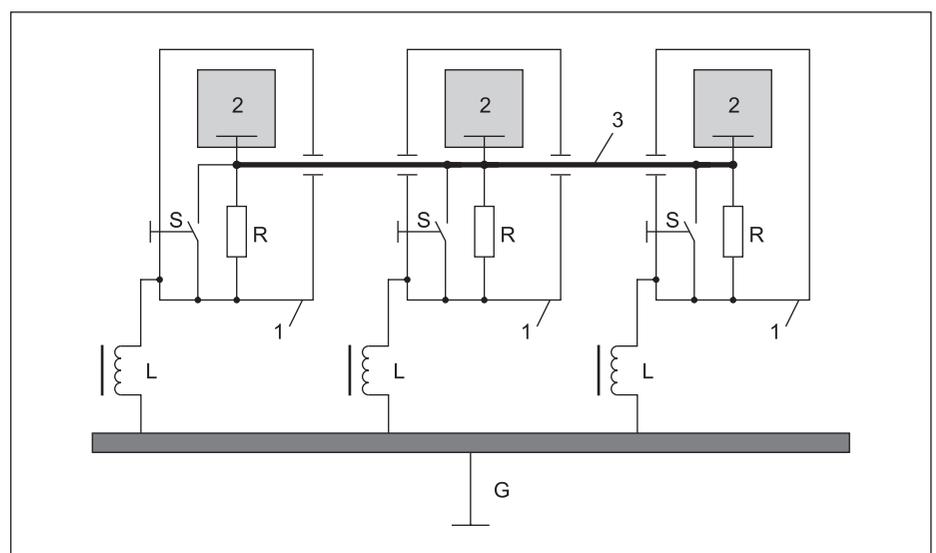


Рис. 3. Предлагаемая система заземления — «специальная плавающая земля»:

- 1 — металлические шкафы с электронной аппаратурой; 2 — электронные приборы;
- 3 — медная шина, образующая изолированную локальную область общего потенциала (местная «земля»);
- R — высокоомные высоковольтные резисторы (1 ГОм); S — рубильник, с электроблокировкой двери шкафа;
- L — дроссель; G — система заземления энергетического объекта

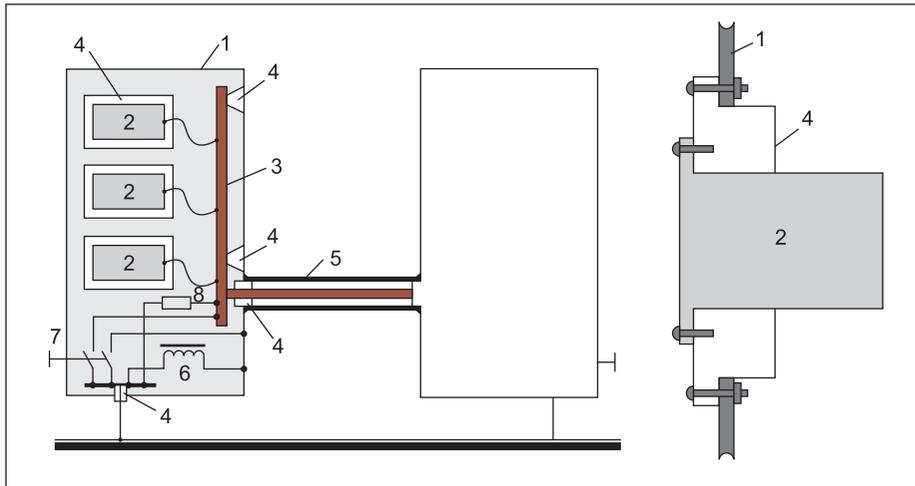


Рис. 4. Пример реализации системы заземления «специальная плавающая земля»:
1 — металлоконструкция шкафа; 2 — электронное устройство, например МВРЗ;
3 — медная шина, образующая локальную область нулевого потенциала; 4 — изоляторы;
5 — кожух-экран; 6 — дроссель; 7 — рубильник; 8 — высоковольтный высокомегаомный резистор

вых реле с высоковольтной изоляцией входа от выхода — гермотронов), рис. 6 [21].

Как было показано выше, большинству современных электронных устройств не требуется наличие функционального заземления, поэтому предложенное выше решение не будет влиять на работоспособность электронной аппаратуры. Что касается защитного заземления, роль которого в данной концеп-

ции сводится к обеспечению безопасности персонала при возникновении внутреннего повреждения аппаратуры или кабелей в шкафу, сопровождающегося повреждением изоляции и выносом опасного потенциала, то эта проблема может быть решена несколькими мерами.

Во-первых, сам металлический шкаф может быть заземлен через мощный высокока-



Рис. 5. Высоковольтные высокомегаомные резисторы



Рис. 6. Высоковольтные изолирующие интерфейсы на рабочие напряжения между входом и выходом 10, 20, 50 и 70 кВ [21]

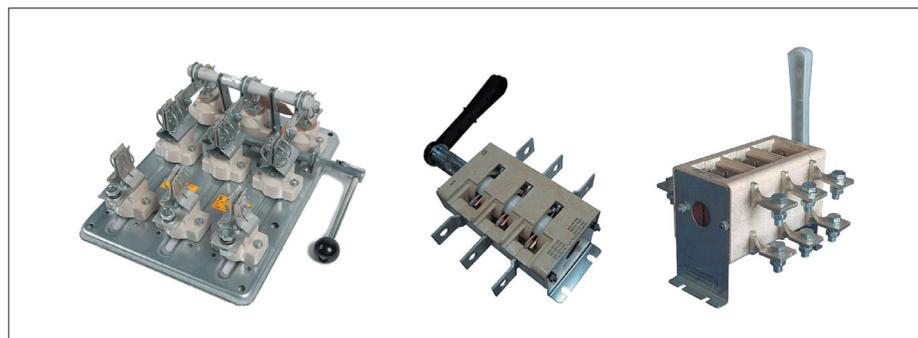


Рис. 8. Мощные трехполюсные рубильники с видимым разрывом цепей



Рис. 9. Двухполюсный рубильник с блок-контактом

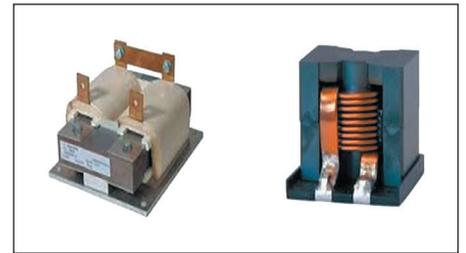


Рис. 7. Мощные высокочастотные дроссели

стотный дроссель, намотанный медной шиной, обладающий очень низким сопротивлением для постоянного тока и тока частотой 50 Гц, но обладающий высоким сопротивлением для грозового импульса и особенно высоким для очень короткого импульса ЭМИ ЯВ (рис. 7).

Во-вторых, шкаф должен быть снабжен трехфазным рубильником с мощными контактами и рукояткой, выведенной из шкафа (рис. 8), который замыкается на время работ, проводимых персоналом с оборудованием, находящимся внутри шкафа.

Один контакт используется для соединения изолированной внутренней медной шины с внешней системой заземления, второй — для прямого соединения шкафа с внешней системой заземления, третий — для отключения блокировки двери шкафа, позволяющей открыть дверь только после

замыкания рубильника. Возможно также использование для этих целей двухполюсного рубильника с дополнительным блок-контактом (рис. 9).

В дополнение ко всему, если есть такая необходимость, может быть использовано переносное заземление, накладываемое на изолированную внутреннюю медную шину при работах внутри шкафа, однако, по нашему мнению, такая мера является уже излишней.

Заключение

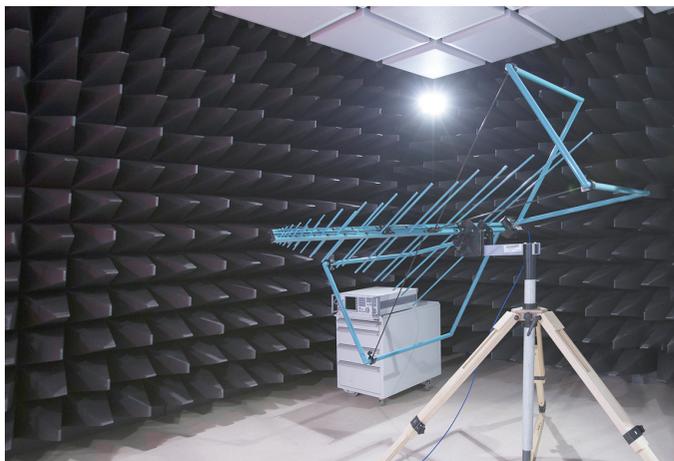
Предложенное техническое решение позволяет освободить от присущих ему недостатков заземление типа «плавающая земля», что открывает возможность его широкого применения в электроэнергетике с целью повышения устойчивости электронной аппаратуры к мощным электромагнитным помехам естественного и искусственного происхождения. ■

Литература

1. Barreto R. M. EMC = Grounding on Automation and Control Systems. Applications to Eliminate Electromagnetic Interference in Industrial Plants // Interference Technology. March 19, 2013.
2. Armstrong K. Planes Need to be Grounded to Something? // Interference Technology. July 1, 2013.
3. Report ORNL/Sub/83-43374/2. Impact of Nominal Nuclear Electromagnetic Pulse on Electric Power Systems. Oak Ridge National Laboratory. 1991.
4. Duff W. G. Designing Electronic Systems for EMC: Grounding for the Control of EMI // Interference Technology. November 6, 2011.
5. IEC 60364-7-707: 1984. Electrical installations of buildings — Requirements for special installations or locations — Earthing requirements for the installation of data processing equipment.
6. Кузнецов М. Б., Матвеев М. В. Защита от вторичных проявлений молнии и обеспечение ЭМС МП аппаратуры на объектах нефтегазовой отрасли // Энергоэксперт. 2007. № 2.
7. Whitaker J. C. Electronic Systems Maintenance Handbook. Second Edition. CRC Press (Taylor & Francis Group), Boca Raton – New York – London. 2001.
8. IEEE Std. 1100-2005. IEEE Recommended Practice for Powering and Grounding Electronic Equipment. 2005.
9. Гуревич В. И. Защита оборудования подстанций от электромагнитного импульса. М.: Инфра-Инженерия, 2016.
10. Pamphlet No. 1110-3-2 Electromagnetic Pulse (EMP) and Tempest Protection for Facilities. Engineering and Design. Department of the Army, U. S. Army Corps of Engineers. 1990.
11. The Effects of Nuclear Weapons. U. S. Department of Defense and Energy Research & Development Administration. 1977.
12. AD-A009 228 Electromagnetic-Pulse Handbook for Electric Power Systems. Stanford Research Institute. 1975.
13. TM 5-690 Grounding and Bonding in Command, Control, Communications, Computer, Intelligence, Surveillance and Reconnaissance (C4ISR) Facilities. Headquarters Department of the Army. Washington, DC, 2002.
14. Ricketts L. W., Bridges J. E., Mileta J. EMP Radiation and Protective Techniques. Wiley, New York – London – Sydney – Toronto. 1976.
15. Joffe E. B., Lock K. S. Grounds for Grounding. A circuit-to-System Handbook. IEEE Press, Wiley. 2010.
16. Report No. HDL-TM-81-9. Application of Filters for High-Altitude Electromagnetic Pulse Protection. U. S. Army Electronics Research and Development Command, Harry Diamond Laboratories. 1981.
17. Longoria S. N. Facility Power Filters: Symmetric vs. Asymmetric Performance // In Compliance. Sept., 2013.
18. Protection of High Voltage Power Network Control Electronics Against Intentional Electromagnetic Interferences (IEMI). Report WG C4.206 CIGRE. 2014.
19. MIL-HDBK-419A Grounding, Bonding and Shielding for Electronic Equipment and Facilities. U. S. Department of Defense. 1987.
20. To Float or Not to Float? Analysis of a Floating vs. Grounded Output. Associated Power Technologies Inc. www.aptsources.com/resources/pdf/Floating%20Output.pdf
21. Gurevich V. Protection Devices and Systems for High-Voltage Applications. Marcel Dekker, New York – Basel. 2003.

Статья опубликована в журнале «Компоненты и технологии» № 4'2017

Измерение уровня электромагнитных помех технических средств



Технические средства (ТС) в процессе функционирования являются источниками электромагнитных помех, которые характеризуются способом передачи (кондуктивные или излучаемые), типом (напряжение, ток, напряженность электрического или магнитного полей), диапазоном частот (от постоянного до десятков и сотен гигагерц). Пути распространения помех от ТС являются как провода, так и излучение. Уровень помех не должен превышать

установленных нормативными документами (ГОСТ, ОСТ, КТ) величин, поскольку при превышении нормативов возможна неустойчивая работа расположенного рядом оборудования. Самым достоверным методом определения уровня излучения помех техническими средствами является непосредственное измерение с помощью набора испытательного оборудования: измерительных антенн, эквивалентов сети, измерительного приемника, датчиков тока. Для исключения влияния внешних помех и неоднородностей окружающего пространства на результаты измерений все работы должны проходить в (полу)безэховой экранированной камере или на открытой аттестованной измерительной площадке. Испытательная лаборатория ЭМС АО «ТЕСТПРИБОР» использует аттестованное испытательное оборудование и поверенные средства измерений, и успешно решает все задачи, связанные с определением уровня электромагнитных помех (в диапазоне частот до 40 ГГц) в соответствии с:

- ГОСТ РВ 6601–002–2008;
- ГОСТ В 25803;
- ГОСТ 30805.22;
- ГОСТ 30805.14.1;
- ГОСТ 30804.3.2;
- ГОСТ 30804.3.3;
- ГОСТ 30805.13;
- ГОСТ 30805.11;
- КТ-160/14G (раздел 21.0).



Концепция эффективного ЕМІ-экранирования

Лоран ФОЛКЕЛЬ (Lorandt FÖLKEL)
Перевод: Евгений КАРТАШЕВ

Несмотря на широкое обсуждение и наличие рекомендаций по проектированию конструкции преобразователей для обеспечения электромагнитной совместимости (EMC) компонентов, взаимодействие между различными функциональными группами в устройствах может привести к нежелательным побочным эффектам, проявляемым при проведении лабораторных тестов EMC. Даже при установке изделия в металлический корпус может случиться так, что уровень излучаемых помех превысит пороговое значение.

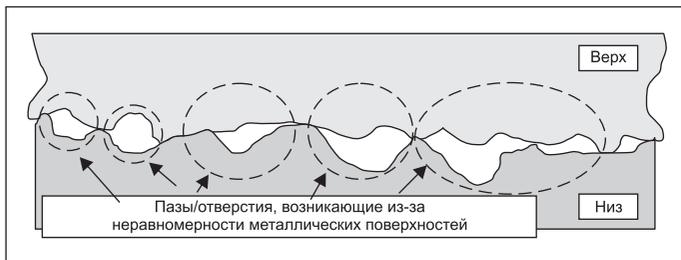


Рис. 1. Снижение экранирующего эффекта из-за наличия «апертур»

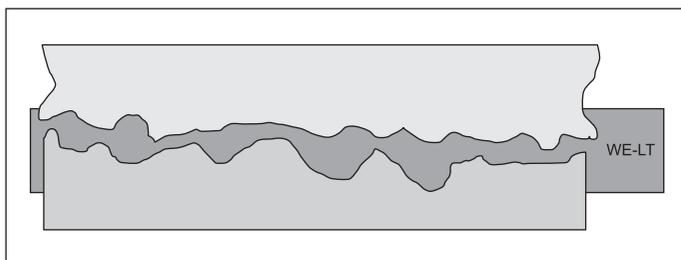


Рис. 2. Герметизация щелей и «апертур» с помощью электропроводящих прокладок WE-LT

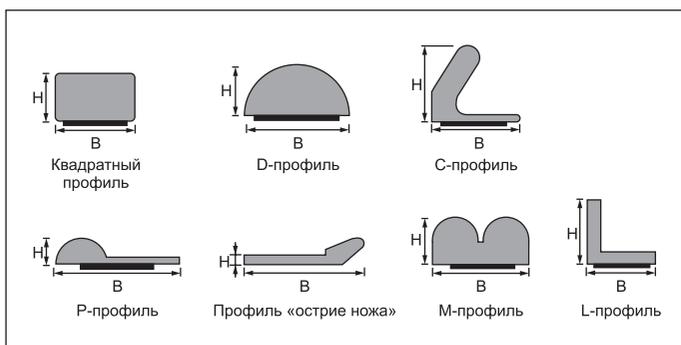


Рис. 3. Профили прокладок WE-LT

Что происходит?

В большинстве случаев металлический корпус сам по себе не является частью электронной системы и разрабатывается отдельно конструкторами механической части изделия. Они предусматривают в корпусе отверстия, необходимые, например, для прокладки кабелей, вентиляции, установки кнопок управления, динамиков, датчиков и дисплеев. Все это может привести к заметному ухудшению экранирующего эффекта. При наличии отверстий в металлическом корпусе, а также при соединении его частей невозможно обеспечить полную герметизацию без применения специальных накладок, в результате чего появляются пути для прохождения радиочастотных (RF) излучений.

Почему это происходит

Если посмотреть на плоскую поверхность металла под микроскопом, становятся хорошо видны ее дефекты. Можно обнаружить, что материал неравномерный, с шероховатостями на поверхности. Поэтому при соединении двух частей металлического корпуса между ними не образуется непрерывное соединение. Следовательно, в месте сочленения экран прерывается неоднородностями, и с точки зрения RF-техники данную область можно считать чрезвычайно уязвимой. Щели и отверстия, которые образуются вследствие шероховатости поверхностей, создают «открытые ворота» для проникновения коротковолнового излучения в экранированную камеру и из нее (рис. 1).

Предложения по решению проблемы

Решением проблемы является герметизация «апертур», образующихся из-за дефектов поверхностей. Для этой цели отлично подходят токопроводящие текстильные прокладки WE-LT (рис. 2).

Доступные профили электропроводящих прокладок показаны на рис. 3.

К проводящим прокладкам предъявляются разные требования, которые зависят от их назначения. На основании практического опыта выработаны следующие минимальные стандарты:

- UL94-V0 — утвержденная комбинация материалов (необходима, если конечный продукт предназначен для рынка США);

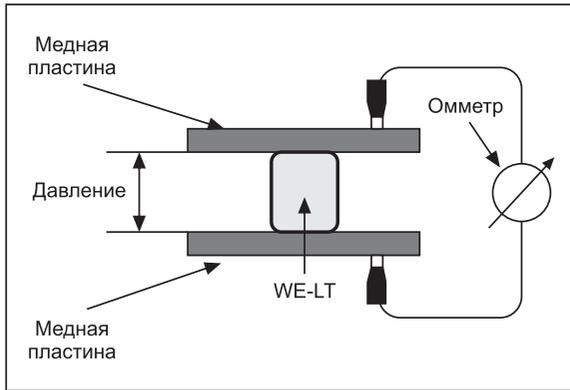


Рис. 4. Установка для проверки зависимости поверхностного сопротивления WE-LT от давления

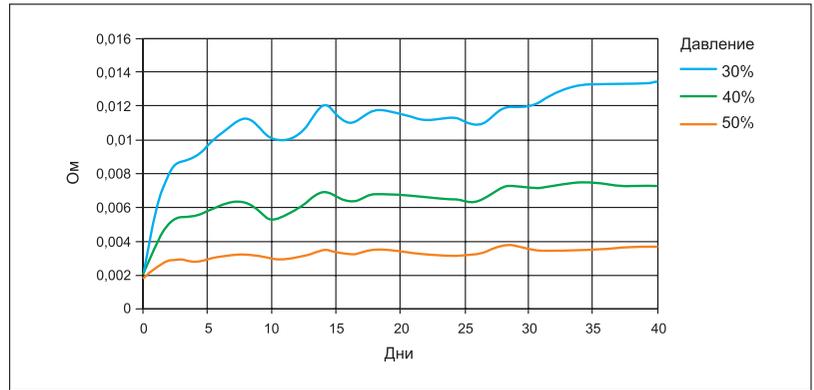


Рис. 5. Временная зависимость поверхностного сопротивления при разных уровнях давления



Рис. 6. Проводящие нейлоновые клипсы



Рис. 7. Заземляющие ремни

Таблица 1. Основные показатели защиты IP

Первая цифра: защита от инородных твердых тел	
IP0X	Нет специальной защиты
IP1X	Крупные инородные тела (кулак, диам. > 50 мм)
IP2X	Средние инородные тела (палец, диам. > 12 мм)
IP3X	Инструменты, провода и т. д. толщиной более 2,5 мм; мелкие инородные тела, диам. > 2,5 мм
IP4X	Инструменты, провода и т. д. толщиной > 1 мм; гранулированные инородные тела, диам. > 1 мм
IP5X	Некоторое количество пыли может проникать внутрь, однако это не нарушает работу устройства. Полная защита от контакта
IP6X	Полная защита от пыли
Вторая цифра: защита от воды, жидкостей	
IPX0	Нет специальной защиты
IPX1	Вертикальные капли воды/конденсация/слабый дождь
IPX2	Вода распыляется под углом (до 15° от вертикали), слабый дождь с ветром
IPX3	Брызги воды (любое направление до 60° от вертикали), сильный ливень
IPX4	Брызги воды со всех направлений (допускается ограниченное проникновение), разбрызгивание
IPX5	Струи воды низкого давления со всех направлений (допускается ограниченное проникновение), вода из шланга, направленного вниз
IPX6	Сопла высокого давления со всех сторон (допускается ограниченное проникновение), вода из шланга, направленного вниз, например на палубе корабля
IPX7	Временное погружение, погружение в бак на глубину 15 см — 1 м
IPX8	Постоянное погружение под давлением для использования на титановых спасательных судах

Таблица 2. Пригодность материалов для использования с WE-LT

+	Алюминий (Al)
+	Железо (Fe)
+	Родий (Rh)
++	Серебро (Ag)
-	Гальванизированная сталь
++	Титан (Ti)
-	Цинк (Zn)
++	Олово (Sn)
++	Хром / серебро, нержавеющая сталь 13%, хром (пассивный)
++	Хромированная сталь 18%, латунь (La)
++	Нержавеющая сталь 13%, хром (активный)
++	Нержавеющая сталь 18%, хром 8%, никель (пассивный)
--	Магниеые сплавы
++	Монель, никель (Ni), медь (Cu)
+	Платина (Pl), золото (Au), углерод (C)

Примечания. -- Не подходит, - не рекомендуется, + рекомендуется, ++ хорошо подходит.

- защита против жестких условий окружающей среды (пыль/влажность);
- хорошая поверхностная проводимость для получения низкоомного соединения;
- двухсторонняя адгезивная поверхность для фиксации и монтажа.

Для применения токопроводящих прокладок требуется воздействие определенного минимального давления, позволяющего поддерживать переходное сопротивление на стабильно низком уровне (рис. 4). Долговременные исследования при разных уровнях сжатия показали, что монтажное давление влияет на временные характеристики проводимости (рис. 5). Устойчивое сжатие по меньшей мере 50% контактной поверхности необходимо, чтобы поддерживать низкое и стабильное переходное

сопротивление в течение длительного времени.

Типовое поверхностное сопротивление WE-LT ниже 8 мОм. Достигнутый экранирующий эффект составляет около 80 дБ на частоте 100 МГц и приблизительно 75 дБ на частоте 1 ГГц (согласно стандарту MIL 285). Одновременно наблюдается и положительный побочный эффект: прокладки обеспечивают класс защиты IP 54 от проникновения пыли и воды (табл. 1).

При соприкосновении разных токопроводящих материалов происходит гальванический процесс, который приводит к коррозии контактных поверхностей. В результате возникает оксидный слой, изолирующий поверхности друг от друга вместо того, чтобы обеспечить хорошее электрическое со-

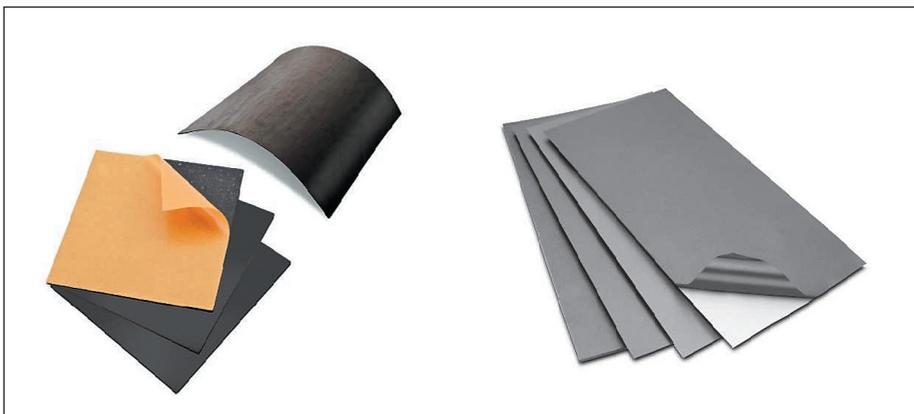


Рис. 8. Гибкие листовые абсорберы

единение. Для практических применений необходимо учесть сведения, изложенные в таблице 2, демонстрирующие возможность использования WE-LT с различными материалами и, следовательно, гарантирующие долговременную надежность.

Эффективное механическое/электрическое соединение для минимизации шумов

Еще одна распространенная ошибка, возникающая при заземлении экранированного кабеля, состоит в использовании витой пары (так называемые «свиньи хвостики») слишком большой длины. Результатом является высокое сопротивление соединения, не обеспечивающее хороших условий для прохождения шумовых сигналов в цепь заземления. Рекомендуется, чтобы все связи кабельных экранов с «землей» имели низкий импеданс. Эта задача легко решается с помощью проводящих нейлоновых клипс (рис. 6).

Проводящие нейлоновые клипсы могут использоваться с кабелем диаметром 3–15 мм. Они очень гибкие, чрезвычайно легкие и не имеют острых краев. Таким образом, кабель надежно подключается и хорошо фиксируется на печатной плате (PCB) без риска повреждения экрана. Связь между PCB и кожухом (корпусом) должна быть учтена при рассмотрении проблемы EMC. Обычно для данной цели применяются стальные шпильки-проставки, но это не лучшее решение из-за неопределенных параметров соединения печатной платы с «землей». В данном случае предпочтительно другое решение — использование заземляющих ремней (рис. 7). Они гарантируют надежную связь в широком диапазоне частот, что обеспечивает свободное прохождение шумовых сигналов и снижение их уровня.

Если в одном корпусе находится несколько печатных плат, расположенных очень близко друг к другу, между некоторыми PCB возникает связь, параметры которой почти невозможно проанализировать. Это взаимодействие происходит на высоких частотах и может быть подавлено путем

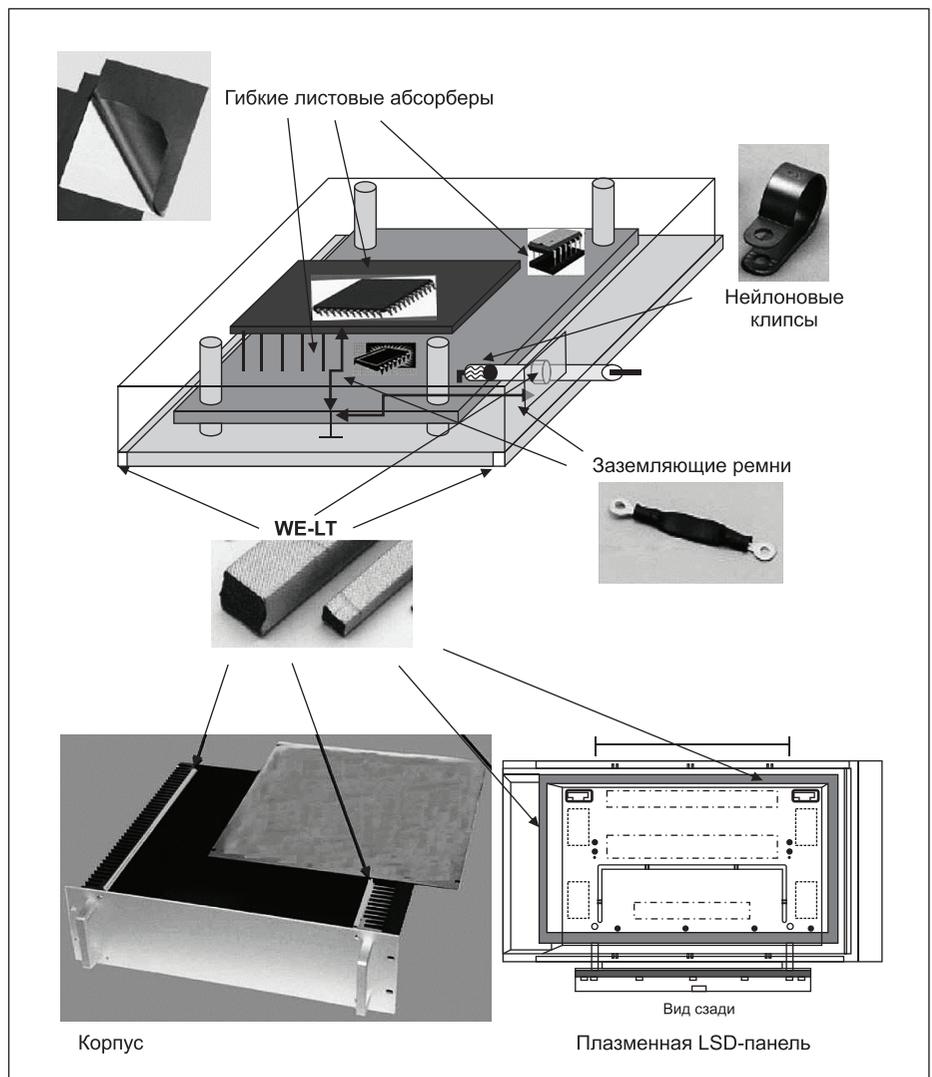


Рис. 9. Примеры применения

установки металлических кожухов вокруг печатных плат. Подобная система, называемая «зонной», полезна, но в большинстве случаев оказывается слишком дорогой. Гораздо более эффективным решением являются гибкие листовые абсорберы (рис. 8), которые наклеиваются на печатную плату. Лист феррита имеет присоединенный к нему двусторонний адгезивный слой. Эти поглощающие материалы

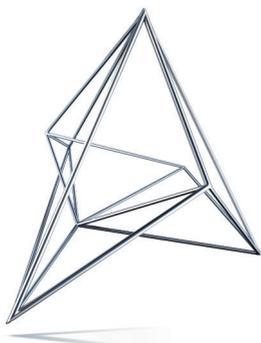
не нуждаются в заземлении или подключении к любому другому устройству (рис. 9). За счет очень высокой гибкости они могут быть отформованы даже по поверхности других компонентов (необходимо избегать высоких температур!). Экранирование реализуется за счет механизма поглощения энергии магнитного поля и превращения ее в тепловую (величина градиента ΔK не может быть измерена).

Электронные и электромеханические КОМПОНЕНТЫ



- Отгрузки меньше нормы упаковки по всей каталожной продукции.
- Комплекты для разработчиков с бесплатным пожизненным пополнением.
- Программные инструменты (3D-модели всех компонентов, библиотеки для Altium, EAGLE, программы-симуляторы и библиотеки к ним).
- Предоставление бесплатных образцов в течение 3–5 дней.
- Поддержка складом более 95% всей стандартной (каталожной) продукции, срок поставки 2–4 недели.

Компания Würth Elektronik eiSos производит ЭМС-компоненты: индуктивности, RF-индуктивности, конденсаторы, LTCC-компоненты, трансформаторы, компоненты защиты, LED-драйверы, соединители, переключатели, светодиоды, силовые элементы для технологии Press Fit.



Symmetron

МОСКВА
Ленинградское шоссе, д. 69, к. 1
Тел.: +7 495 961-20-20
moscow@symmetron.ru

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
ул. Таллинская, д. 7
Тел.: +7 812 449-40-00
spb@symmetron.ru

Группа компаний «Симметрон» — эксклюзивный дистрибьютор компании Würth Elektronik в России.

НОВОСИБИРСК
ул. Блюхера, д. 716
Тел.: +7 383 361-34-24
sibir@symmetron.ru

МИНСК
ул. В. Хоружей, д. 1а, оф. 403
Тел.: +375 17 336-06-06
minsk@symmetron.ru

www.symmetron.ru

Техническая поддержка: wurth@symmetron.ru



Экранирующие листы Flexield серии IFL для подавления шума

По мере того как электронные устройства становятся все более компактными и многофункциональными, возрастает плотность большого количества электронных компонентов, установленных на печатную плату. В результате увеличивается потребность в подавлении помех, излучаемых микросхемами и проводниками. Поскольку на этапе проектирования трудно оценить реальный уровень шума, все чаще принимаются меры по подавлению шума на производственном этапе.

Flexield — экранирующий гибкий листовый материал, изготовленный путем обработки смеси мелкого порошка из магнитомягкого металла и пластика. Установка листов Flexield на источники помех или в места, которые подвергаются шумовому воздействию, позволяет очень эффективно подавить шум. Этот материал легко перфорируется и режется, принимает разные формы в зависимости от обработки и может применяться даже на искривленных поверхностях и гибких кабелях (рис. 1).

Строение листа Flexield

Как видно из рисунка 2, лист Flexield от компании TDK состоит из поверхностной пленки, магнитной пластины, полученной из смеси магнитомягкого материала и пластика, двухсторонней ленты и покровной пленки. Материал Flexield серии IFL выпускается в виде рулонов и листов толщиной 0,025–0,2 мм. Вопрос использования двухсторонней ленты зависит от требований конкретного приложения. Кроме того, компания TDK добавила новое изделие в продуктовую

линейку, которое мы обсудим ниже. Это изделие гибридного типа с металлическим слоем, которое обеспечивает гораздо большее подавление шума.

Основные функции и применения листов Flexield

Перечислим основные функции листов Flexield:

- поскольку материал листов изготовлен из магнитомягких металлов с высокой магнитной проницаемостью, эти изделия

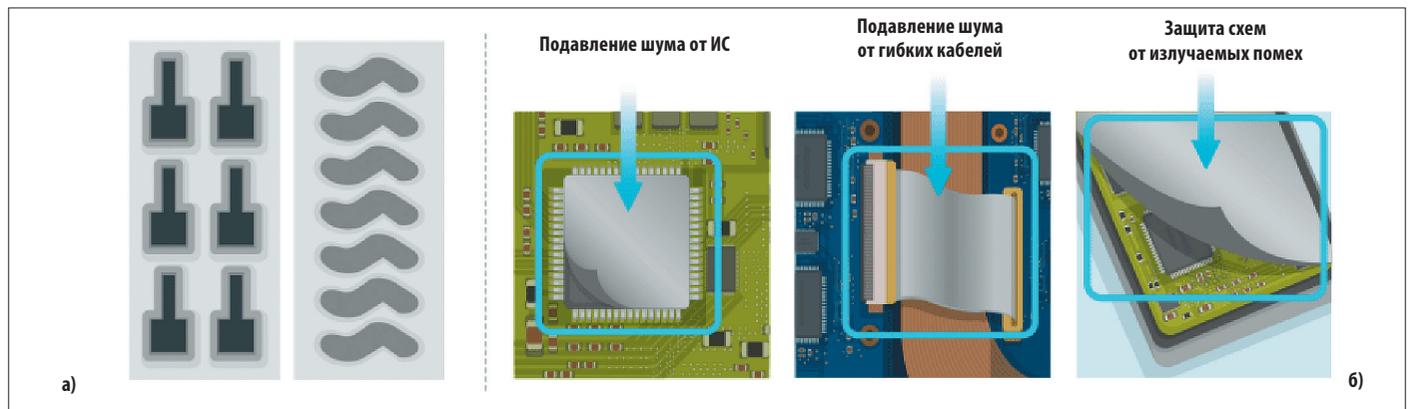


Рис. 1. Примеры: а) перфорирования пластины Flexield; б) ее использования



Рис. 2. а) Строение листа Flexield; б) виды его изготовления

очень эффективно подавляют излучаемые помехи;

- благодаря тому, что листы тонкие, их можно установить в небольшие промежутки;
- благодаря своей гибкости листы не переламываются при механическом воздействии;
- поскольку листы принимают разные формы в зависимости от обработки, у них разная форма и размеры;
- листы выпускаются в виде рулонов, что экономично и подходит для серийного производства.

Основные приложения:

- лист Flexield на поверхности ИС защищает ее от источников шума;
- лист Flexield на поверхности кабеля защищает от помех с его стороны две соединенные кабелем платы или плату с подключенным к ней компонентом;
- лист Flexield между двумя платами уменьшает влияние помех;
- лист Flexield на корпусе устройства позволяет подавить просочившиеся от него помехи.

Принцип работы Flexield

Листы Flexield поглощают энергию излучаемого шума и преобразуют ее в тепло. Поясним принцип действия этих листов.

Магнитная проницаемость (μ) магнитомягкого материала, находящегося в порошкообразном виде в пластике, в значительной мере определяет параметры подавления шума листов Flexield. Магнитная проницаемость определяет скорость нарастания плотности магнитного потока (B) в магнитном веществе в магнитном поле (H). Другими словами, магнитная проницаемость является мерой того, насколько легко магнитный поток проходит сквозь вещество (магнетизирует его), и описывается следующим уравнением:

$$\mu = B/H.$$

Магнитомягкое вещество обладает высокой магнитной проницаемостью и малой коэрцитивной силой. Под воздействием переменного магнитного поля направление намагничивания легко изменяется на обратное, что и востребовано, например, во многих схемах с трансформаторными сердечниками. Однако если частота переменного магнитного поля очень высока, изменение плотности магнитного потока запаздывает относительно изменений магнитного поля, приводя к возникновению сдвига по фазе δ . Проницаемость магнитного материала при прохождении переменного тока определяется из соотношения:

$$\mu = \mu' - j\mu'' = |\mu| \cos \delta - j|\mu| \sin \delta$$

где μ' – действительная часть комплексной величины проницаемости, а μ'' – мнимая часть. Если $\delta = 0$, речь идет о магнитной проницаемости при прохождении постоянного

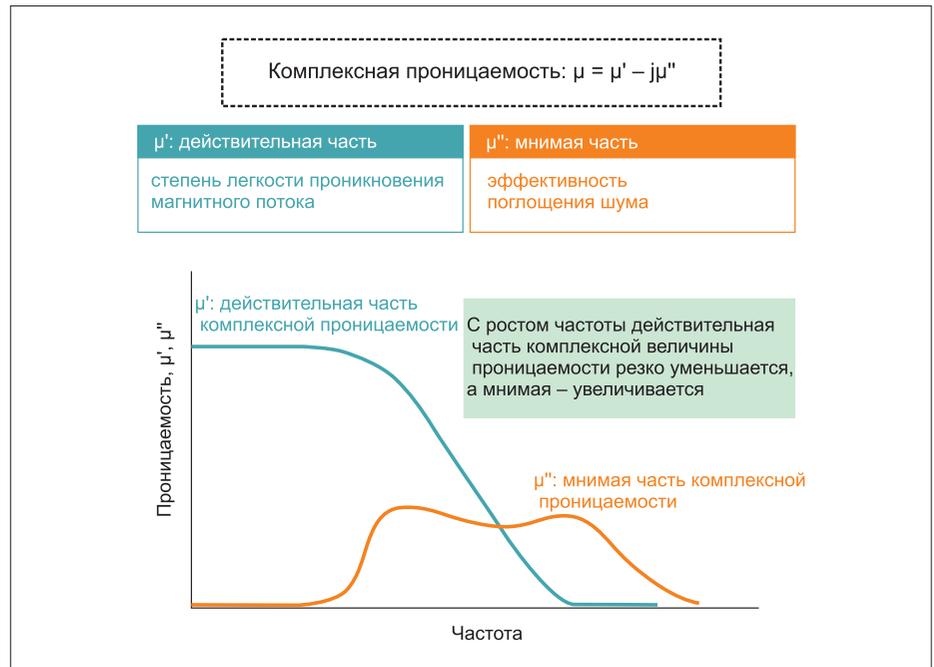


Рис. 3. Диаграмма показывает, как изменяется магнитная проницаемость под воздействием переменного магнитного поля

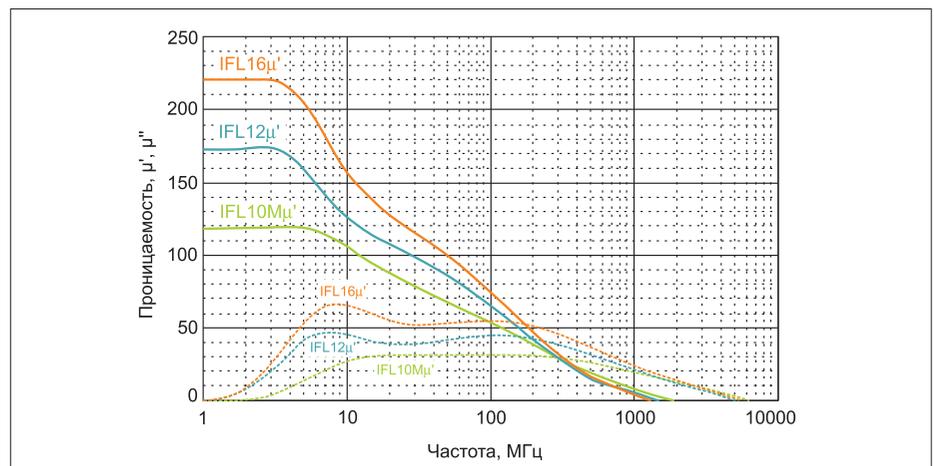


Рис. 4. Частотная зависимость проницаемости листов Flexield серии IFL, которые применяются для подавления шума

тока, но по мере увеличения частоты в случае переменного тока δ тоже увеличивается, а проницаемость падает.

Действительная часть μ' , мнимая часть μ'' и сдвиг фазы в комплексном представлении проницаемости связаны следующим образом:

$$\mu''/\mu' = \operatorname{tg} \delta,$$

где $\operatorname{tg} \delta$ – коэффициент потерь.

Чем меньше величина $\operatorname{tg} \delta$ у трансформаторного сердечника, тем меньше потери. Это значит, что материал сердечника очень хорош. В листах Flexield это свойство используется для подавления помех. На рисунке 3 представлена зависимость проницаемости от частоты переменного магнитного поля. В области низких частот в комплексной переменной преобладает действительная часть μ' . По мере увеличения частоты изменение плотности магнитного потока происходит с отставанием от изменения магнитного поля. При

определенной частоте возникает магнитный резонанс (резонанс колебаний доменных стенок, вихревое намагничивание и т. д.), из-за которого резко уменьшается действительная часть μ' , а мнимая часть μ'' возрастает.

Частотная характеристика проницаемости листов серии IFL

Действительная часть μ' комплексной проницаемости отражает меру проникновения магнитного потока. Чем она больше, тем, например, больше дальность связи, установленной с помощью антенны. Мнимая часть μ'' определяет величину магнитных потерь, или величину поглощения шума. Магнитомягкий металл, который входит в состав листов Flexield, поглощает шум в соответствии с величиной мнимой части и преобразует его в тепло. Таким образом, как подавитель шума лист должен работать в широком диапазоне частот, а μ''

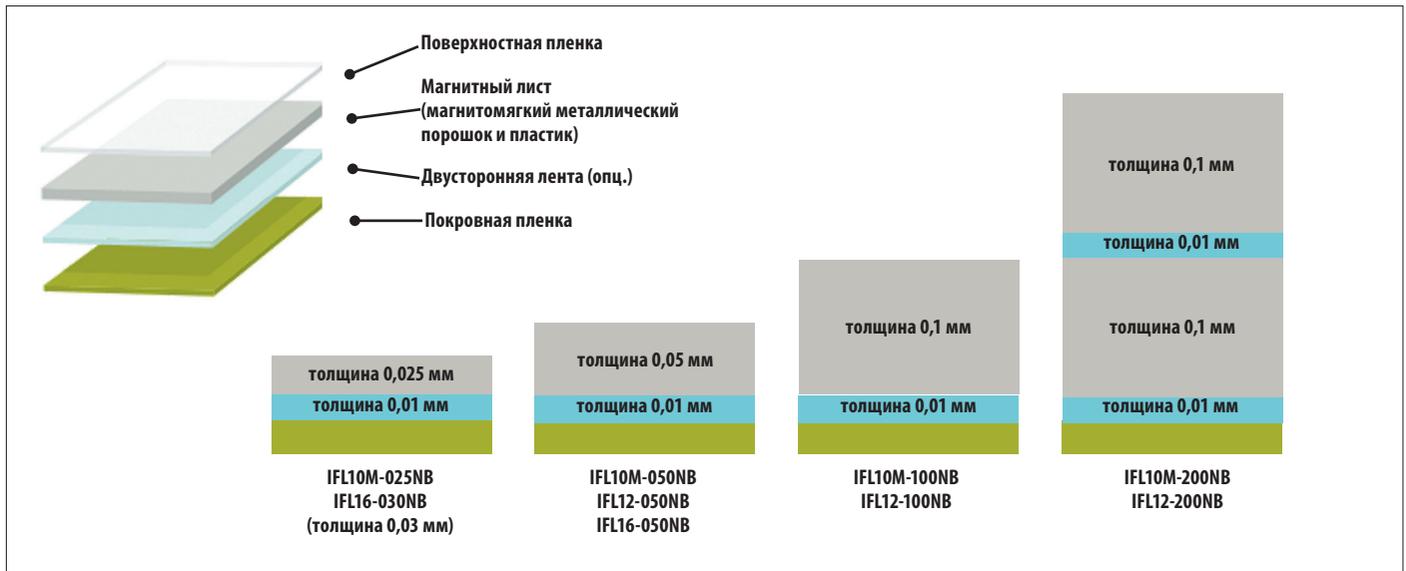


Рис. 5. Листы Flexield серии IFL разной толщины

является достаточно большой величиной в комплексной величине проницаемости.

Кстати, в магнитных листах Flexield другого типа, которые применяются для подавления шума в радиочастотных метках компании TDK (чтобы повысить чувствительность приема сигналов в RFID-системах), действительная часть μ' достаточно велика, а мнимая — мала на рабочей частоте 13,56 МГц. Таким образом, характеристики этих листов зависят от требований конкретного приложения. На рисунке 4 показана частотная зависимость проницаемости листов Flexield серии IFL.

Изделия серии IFL разной толщины

Эффективность подавления шума листом определяется мнимой частью его магнитной проницаемости μ'' и толщиной. Как правило, по мере повышения проницаемости материала растет и мнимая часть μ'' . Следовательно, для изготовления достаточно тонких листов требуется материал с высокой проницаемостью. Листы Flexield от TDK обладают малой толщиной и высокой проницаемостью. Например, у изделий IFL16, серийное производство которых осуществляется с 2015 г., высокая проницаемость $\mu = 220$ на частоте 1 МГц. Это самый высокий показатель в отрасли. Толщина этих листов

уменьшилась на 20% по сравнению с изделиями серии IFL12 при той же эффективности шумоподавления. В серию IFL входит широкий ряд изделий разной толщины в диапазоне 0,025–0,2 мм (рис. 5).

Метод изготовления листов Flexield

Существуют два метода производства листов, применяющихся для шумоподавления. «Сухой» метод состоит в том, что магнитомягкий металлический порошок в пластиковой заготовке прессуется с помощью каландрового вала. «Мокрый» метод заключается в нанесении покрывающей пленки, образующейся из смеси магнитомягкого металлического порошка, пластика и растворителя. Для изготовления листов Flexield серии IFL от компании TDK применяется второй метод, в котором задействованы технологии покрытия, разработанные для производства магнитных лент, оптических дисков и других электронных компонентов.

Второй метод нанесения покрытия позволяет изготавливать более тонкие магнитные листы, но для равномерного распределения мелкого порошка магнитомягкого металла в пластике и нанесения слоя покрытия в растворенном виде требуется высокоэффективная технология. На ри-

сунке 6 показан поперечный срез магнитного листа. Все крупинцы магнитомягкого металлического порошка заключены в пластиковую оболочку и расположены в соответствии с ориентацией магнитного поля, образуя слой на поверхности листа.

Толщина слоя, образованного магнитомягким металлическим порошком, влияет на характеристики магнитного листа. Внешнее переменное магнитное поле вызывает вихревые токи в проводящей среде. Магнитное поле вихревых токов противодействует внешнему магнитному полю, а результирующее магнитное поле затухает в проводнике у поверхности. Это явление называется поверхностным эффектом. Расстояние, при прохождении которого магнитное поле ослабевает в e раз, называется глубиной проникновения поля в среду. Как уже упоминалось, мнимая часть μ'' комплексной величины проницаемости представляет собой эффективность поглощения шума магнитным листом. Если толщина слоя из магнитомягкого металла меньше глубины проникновения поля, величина μ'' растет. Следовательно, изменяя толщину и расположение слоя металлического порошка, можно получить лист с требуемой зависимостью проницаемости от частоты.

Тонкие листы Flexield серии IFL от TDK для подавления помех имеют высокую проницаемость благодаря магнитомягкому металлу собственной разработки компании. У этого материала действительная μ' и мнимая части μ'' подобраны оптимальным образом, что обеспечивает отличную дисперсность и ориентацию частиц.

Новые листы гибридного типа серии IFL

Компания TDK представляет новую продукцию — листы гибридного типа (магнитный слой + проводящий слой) с металличе-

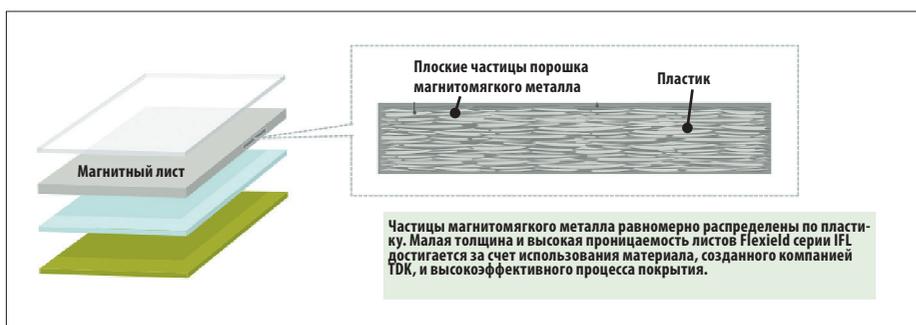


Рис. 6. Поперечный (схематичный) разрез магнитного листа

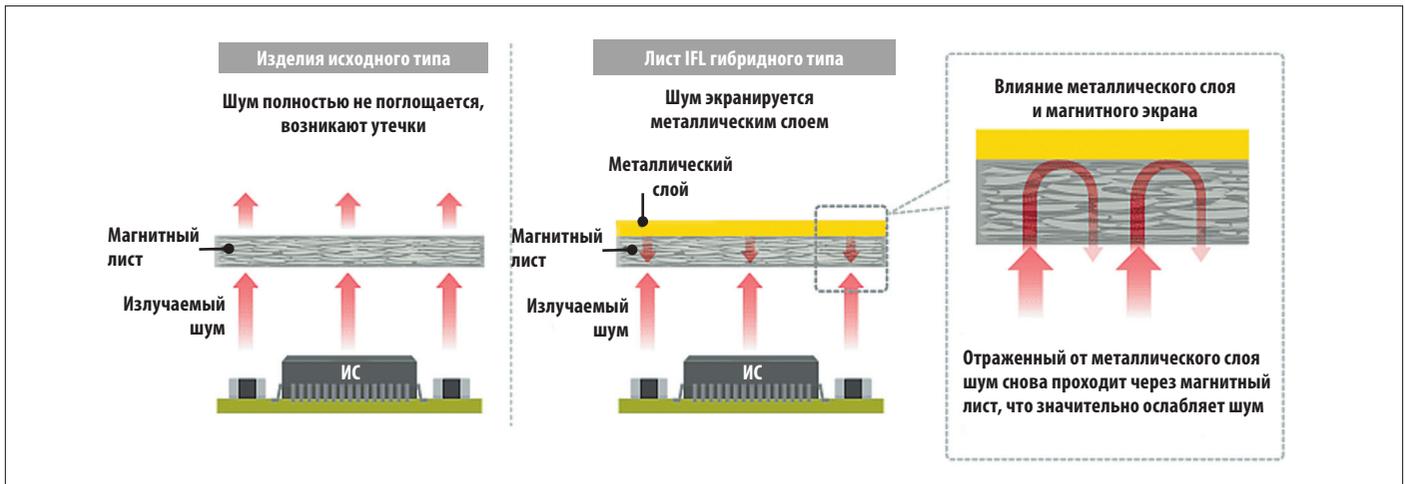


Рис. 7. Функция металлического слоя в листах гибридного типа серии IFL

ским слоем, серийное производство которых началось в 2016 г.

В новых листах гибридного типа, которые используются для подавления помех, вместо поверхностной пленки применяется металлический слой. Дело в том, что листы исходного вида подавляют помехи не полностью — часть шума все-таки проходит сквозь эти изделия. Для решения проблемы были разработаны листы гибридного типа. Из рисунка 7 видно, что шум, не поглощен-

ный магнитным листом, экранируется металлическим слоем; после отражения от этого слоя он поглощается магнитным листом. Другими словами, благодаря тому, что поступающий шум поглощается при прохождении через магнитный лист в прямом и обратном направлениях, энергия помех заметно ослабевает. Таким образом, в смартфонах, где плотность размещения компонентов очень высока, эти листы позволяют уменьшить излучаемый шум внутри корпуса.

На рисунке 8 приведен пример анализа магнитного поля в ближней зоне с использованием DDR-памяти в качестве испытуемого образца и листов гибридного типа серии IFL. Участки с высоким уровнем шума выделены красным цветом, а с малым шумом — синим. В изделиях исходного типа возникают утечки шума, тогда как в листах гибридного вида шум практически полностью подавляется. Из рисунка 8 видно, насколько эффективно подавляют шум листы с экранирующим слоем. ■

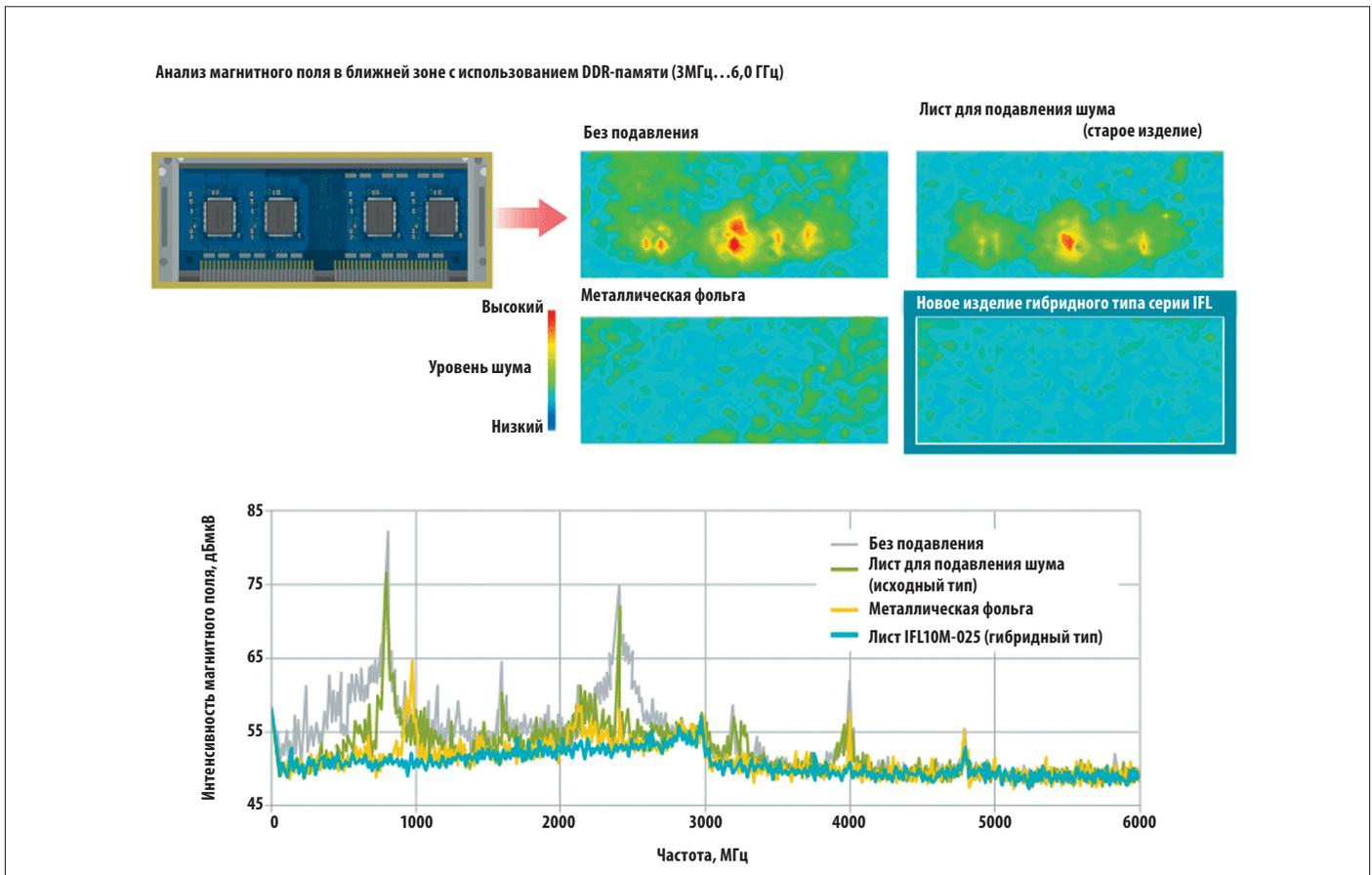


Рис. 8. Эффективность подавления помех с помощью листов гибридного типа серии IFL

Экранирующие корпуса от Gainta Industries Ltd. — эффективное решение проблемы ЭМС

Компания GAINTA, имеющая 20-летний опыт разработки продуктов, является одним из крупнейших производителей корпусов в Азии и является лидером на рынке корпусов, используемых для защиты электрических и электронных компонентов. Продукция компании GAINTA производится на современных заводах, расположенных на Тайване.

Компания GAINTA предлагает самый широкий ассортимент высококачественных корпусов для защиты электрических и электронных компонентов и систем. Корпуса могут поставляться в стандартном исполнении с полными конфигурациями или изготавливаться в полном соответствии с требованиями заказчика. Имеющийся на текущий момент ассортимент готовой продукции включает в себя более 700 различных стандартных корпусов из поликарбоната, ABS, особо прочных из стеклонполненных пластиков, а также выполненных методом высококачественного литья из алюминиевого сплава.

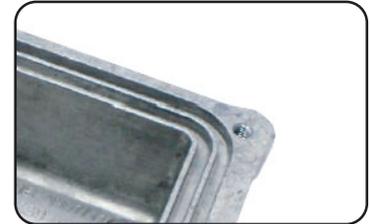
Особое место в ассортименте продукции компании GAINTA занимают корпуса серии HQ0xxEMS, предназначенные для работы в крайне жестких условиях окружающей среды. Корпуса предлагаемой серии были специально разработанные для выполнения требований в части экранирования собственного излучения электромагнитных помех и выполнения требований по электромагнитной совместимости. Корпуса серии HQ0xxEMS являются не только герметичными, но и благодаря специальной конструкции с дополнительными прокладками гарантируют высокую степень электромагнитного экранирования уровнем не менее -40 дБ в широком диапазоне частот. Кроме того, при

необходимости, корпуса могут использоваться в качестве эффективных радиаторов для отвода тепла от силовых полупроводниковых компонентов.

Основные технические характеристики корпусов серии HQ0xx:

- Материал корпуса — алюминиевый сплав ADC-12 (стандарта JIS, Япония);
- Отверстия для внешнего крепления и крепежные элементы крышки расположены за пределами внутренней полости корпуса, что обеспечивает его надежную герметизацию;
- Для крепления крышки к корпусу в комплект входят винты M4 из нержавеющей стали с потайной головкой;
- Для внешнего крепления корпусов доступны дополнительные аксессуары;
- Корпус (указывается при заявке) может быть окрашен электропорошковой краской светло-серого (указывается в конце LG) или черного цвета (указывается в конце BK);
- Силиконовая прокладка (обозначение при заказе S и EMS) по всему периметру крышки и корпуса обеспечивает степень защиты оболочки IP67;
- Исполнение с дополнительной токопроводящей прокладкой для выполнения требований в части электромагнитной совместимости (обозначение при заказе EMS).

Кроме экранированных корпусов специального назначения серии HQ0xxEMS, для заказа доступны экранированные корпуса широкого применения серии G0XXX, предназначенные для бытовых, радиочастотных, сетевых и электротехнических приложений.



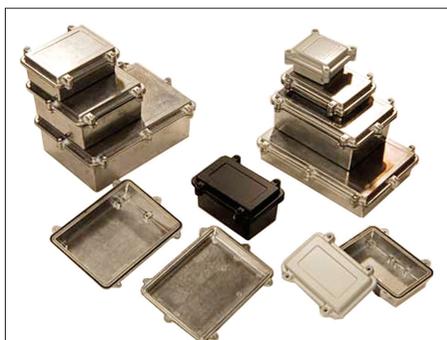
Серия HQ0XX
Простой вариант
без элементов уплотнения



Серия HQ0XXS
Водонепроницаемый
вариант IP67
Цельная по периметру
силиконовая водонепроницаемая
прокладка



Серия HQ0XXEMS
Водонепроницаемый
вариант IP67
С дополнительной цельной
по периметру токопроводящей
экранирующей прокладкой



Корпуса серии HQ0XXEMS



Корпуса серии G0XXX

Политика компании GAINTA основана на том, что кроме лидерства в технической сфере, она нацелена на стремление к максимальному пониманию потребностей своих заказчиков. Компания разрабатывает продукты в тесном сотрудничестве с клиентами, используя при этом информацию от глобальной клиентской базы, что дает возможность компании GAINTA создания корпусов для новых приложений и улучшать серийно выпускаемые продукты.

Корпуса по низким ценам в «СПЕЦЭЛСЕРВИС» ООО

Склад: Москва, ул. Краснобогатырская, 2С15
Call-центр: +7 (495) 150-09-11, (495) 150-09-22
Бесплатный звонок по России: 8-800 333-02-49
Email: info@specelservice.ru
Интернет-магазин: <https://www.specelservis.ru>

Магнитная защита для беспроводных систем

Хорхе Виктория АВИР
(Jorge Victoria ANUIR)

Влияние электромагнитных помех на электронные устройства растет по ряду причин. К ним относится сокращение расстояния между платами одной системы, микросхемами и многими другими чувствительными к помехам компонентами. Кроме того, использование технологий электромагнитной связи (Qi-WPC, NFC, RFID, PMA, A4WP, WCT и т. д.) усложняет топологию печатных плат и расчет эффекта близости. В статье рассматриваются ферритовые пластины компании Würth Elektronik, которые позволяют управлять магнитным потоком, увеличивая эффективность беспроводных систем связи.

Защита с помощью ферритов

Поскольку магнитная проницаемость ферритовых материалов выше, чем у воздуха, они заметно влияют на распределение и величину магнитного поля (рис. 1). Устанавливая магнитные компоненты на определенные участки платы, мы, таким образом, локально повышаем интенсивность магнитного поля и влияем на его форму. Этот эффект используется, чтобы повысить эффективность и уменьшить наводки. Относительная магнитная проницаемость, которая характеризует магнитные свойства материала, определяется следующим образом:

$$\mu_r = \frac{B}{B_0}$$

Потери в магнитном материале могут возникать из-за гистерезиса и собственных вихревых токов. Из-за этих потерь энергия магнитного поля превращается в тепло, которое приводит к саморазогреву изделия. Для количественной оценки потерь необходимо представить относительную проницаемость в комплексном виде:

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

Ферритовые материалы с большими значениями реактивной составляющей μ'' , применяющиеся в фильтрах для подавления помех, относятся к линейке WE-CBF. Материалы с большими значениями действительной составляющей μ' используются для того, чтобы максимально улучшить управление магнитным потоком с минимальными потерями. Оба этих параметра зависят от частоты (рис. 2). Правильный выбор материала обеспечивает его пригодность

для эксплуатации на частоте работы системы и максимального увеличения фильтрации или способности к управлению.

Необходимость в повышении эффективности приложений, помехозащиты и дальности передачи сигналов особенно велика в беспроводной связи, и в частности, в беспроводной связи ближнего радиуса действия. Интеграция этих магнитосвязанных технологий в электронные устройства с высокой плотностью монтажа с жесткими массогабаритными ограничениями приводит к ряду нежелательных эффектов, из-за которых уменьшается эффективность системы и повышаются потери.

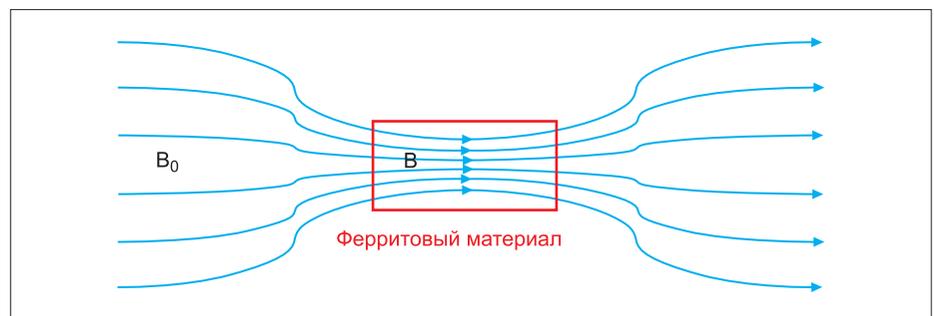


Рис. 1. Концентрация линий магнитного поля в ферритовом материале

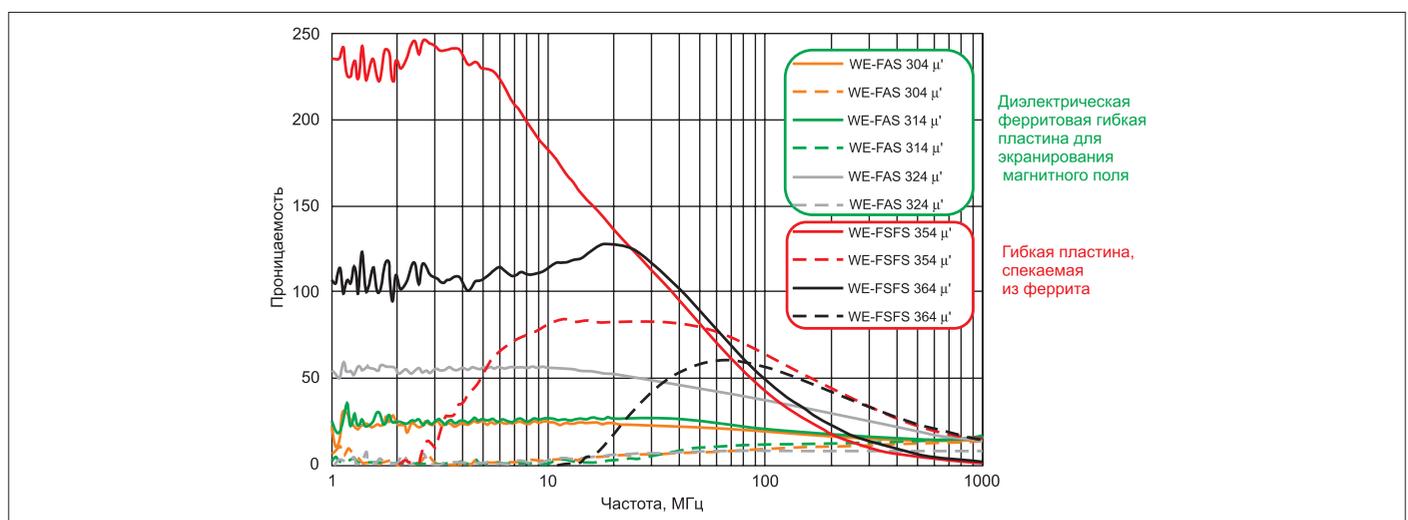


Рис. 2. Комплексное представление относительной магнитной проницаемости ферритовых материалов



Рис. 3. Тонкие поглощающие пластины WE-FAS

Стандартные проводящие экраны защищают устройства от нежелательных наводок за счет генерации противоположно направленного поля, отражая помехи и даже отводя наводки на землю. Однако это средство защиты фильтрует также защищаемый сигнал.

В идеальном случае необходимо сосредоточить в максимальной мере магнитное поле только в тех областях, где оно требуется, чтобы защитить остальные участки системы и повысить ее эффективность. С этой целью применяются материалы с большим значением μ' и малым μ'' на рабочей частоте системы связи.



Рис. 4. Гибкие пластины WE-FSFS со спеченным ферритом

В ассортименте компании Würth Elektronik имеется ряд изделий, которые удовлетворяют этим требованиям. К ним относятся, например, тонкие диэлектрические ферритовые пластины WE-FAS (рис. 3), которые изготовлены из полимера с наполнителем из ферритового порошка. Это очень гибкие пластины, магнитные свойства которых редуцированы из-за наличия полимера. Величина магнитной проницаемости пластин остается приемлемой в диа-

пазоне до нескольких гигагерц. Кроме того, поскольку они поглощают электрическое поле, эти пластины хорошо подавляют электромагнитные помехи на высоких частотах.

На рисунке 4 показаны гибкие пластины WE-FSFS из спеченного ферритового материала. Эта новая линейка материалов обеспечивает высокую магнитную проницаемость и малые потери при очень небольшой толщине (более 0,1 мм). Пластины, состоящие из тонкого ферритового слоя с зазором, помещенного между клеящей лентой и слоем из полиэтилентерефталата (ПЭТФ), обладают отличными защитными и изоляционными свойствами, а также большим поверхностным удельным сопротивлением. Пластины обеспечивают хорошее управление магнитным потоком.

Беспроводная передача энергии

При передаче энергии с помощью магнитосвязанной пары катушек магнитный поток направляется от передатчика к приемнику. Окружающая среда используется в качестве обратного тракта. Как видно из рисунка 5, этот направленный поток проходит через прием-

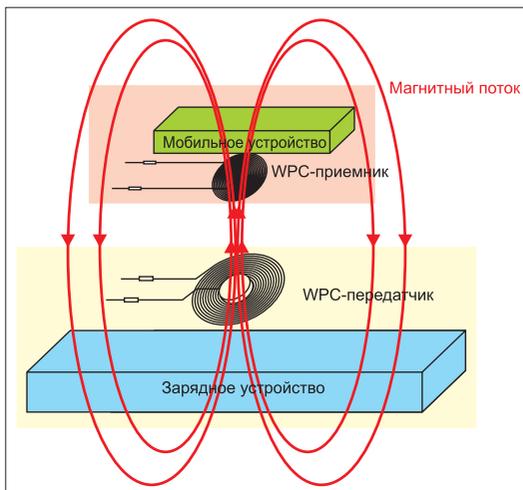


Рис. 5. Магнитный поток в отсутствие защитного экрана

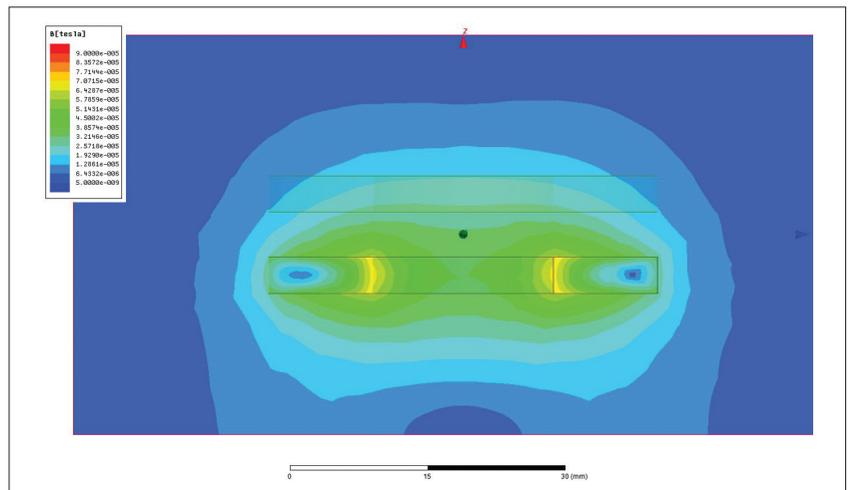


Рис. 6. Распределение плотности магнитного потока в отсутствие защитного экрана (результат моделирования)

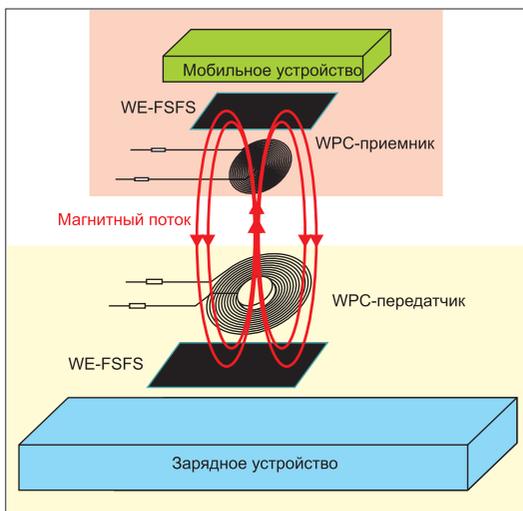


Рис. 7. Беспроводная зарядка с использованием защитного экрана

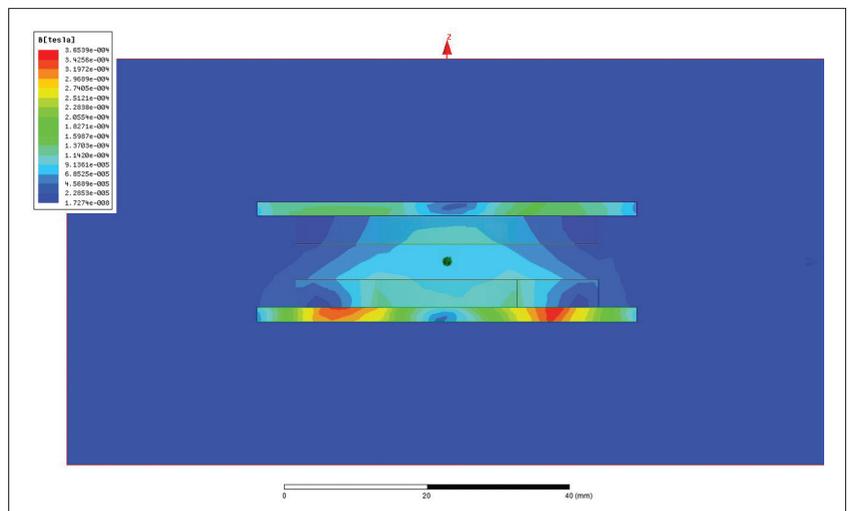


Рис. 8. Распределение плотности магнитного потока при использовании защитного экрана (результат моделирования)

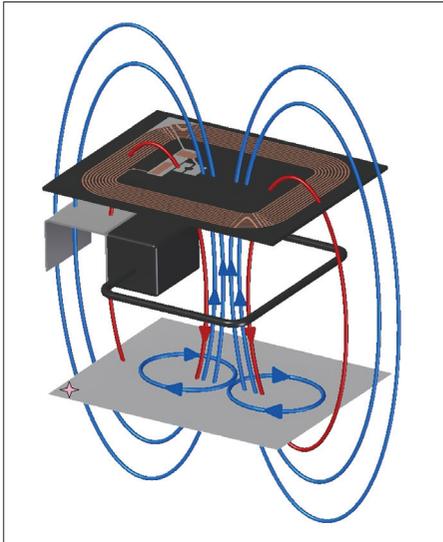


Рис. 9. Связь NFC-RFID в отсутствие экранирования

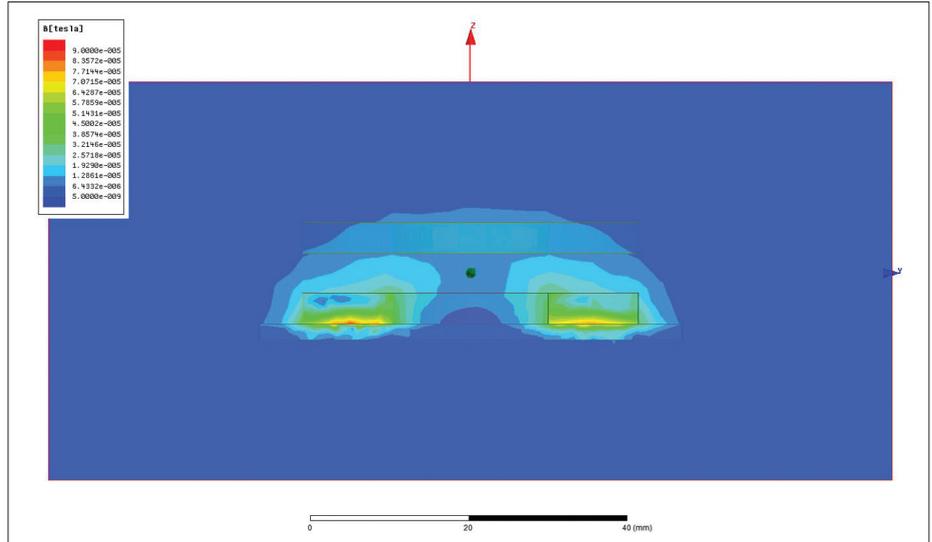


Рис. 10. Влияние проводящего слоя на распределение магнитного потока (симуляция)

Таблица 1. Диапазоны рабочей частоты приложений при беспроводной передаче энергии

Стандарты беспроводной зарядки	Диапазон рабочей частоты
WPC-Qi	100–205 кГц
PMA	277–357 кГц
A4WP	6,78 МГц
WCT	13,56 МГц

ник в заряжаемое устройство. Магнитное поле, проникая в проводящие элементы, вызывает в них нежелательные эффекты — саморазогрев. Из-за индуктивной связи возникают также контуры паразитного тока в проводящих материалах (например, в проводниках ИС, печатных плат), который создает ЭМП.

На рисунке 6 представлен результат моделирования магнитного потока. Видно, как этот поток, наибольшая концентрация которого приходится на питающий контур (зеленые и желтые участки), распространяется в сторону приемника. Часть этого потока находится за передатчиком (светло-голубые участки рисунка). Из рисунков 7–8

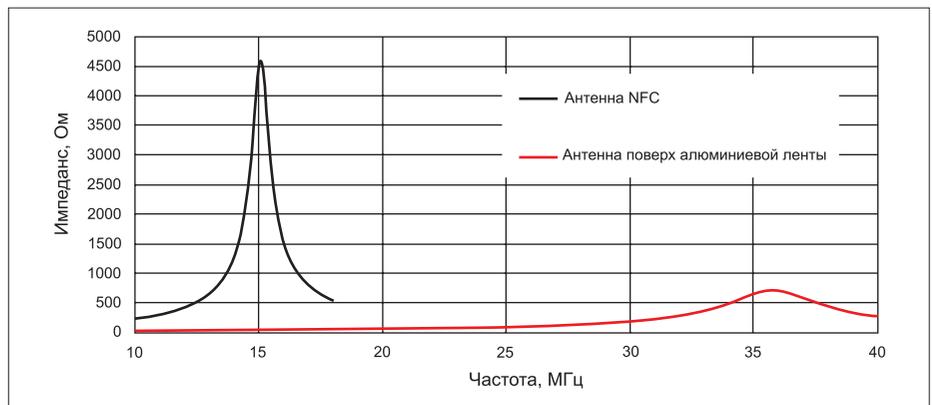


Рис. 11. Влияние проводящего слоя (уход частоты и уменьшение добротности)

видно, что основная часть магнитного потока сосредоточена между катушками передатчика и приемника, если за ними установлены ферритовые пластины.

Известно несколько стандартов индуктивной зарядки на разных частотах (см. табл. 1). Магнитный материал пластины выбирается так, чтобы обеспечить наилучшие рабочие параметры (максимальное значение μ' и мини-

мальное μ''). Величина потерь μ'' у пластины WE-FSFS 354 меньше 2 до 2 МГц, тогда как μ' превышает 200. Пластины этого типа являются отличным экраном для использования в приложениях согласно стандартам Qi и PMA. При более высоких частотах наилучшим выбором являются пластины WE-FSFS 364 благодаря малым потерям ($\mu'' < 2$) до 13,56 МГц; при этом μ' больше 100.

Таблица 2. Основные характеристики пластин WE-FSFS 354 и WE-FSFS 364

Группа	Код заказа	Форма	Длина, мм	Ширина, мм	Высота, мм	$R_{\text{поверх, ГОМ}}$	μ' при 1 МГц	μ' при 13,56 МГц	μ'' при 1 МГц	μ'' при 13,56 МГц
WE-FSFS 354 (WPC-Qi, PMA)	354001	квадрат	120	120	0,1	>1	230	150	<2	90
	354002				0,2					
	354003				0,3					
	354004		60	60	0,1					
	354005				0,2					
	354006				0,3					
WE-FSFS 364 (A4WP, WCT)	364001	квадрат	120	120	0,1	>1	110	120	<2	2
	364002				0,2					
	364003				0,3					
	364004		60	60	0,1					
	364005				0,2					
	364006				0,3					

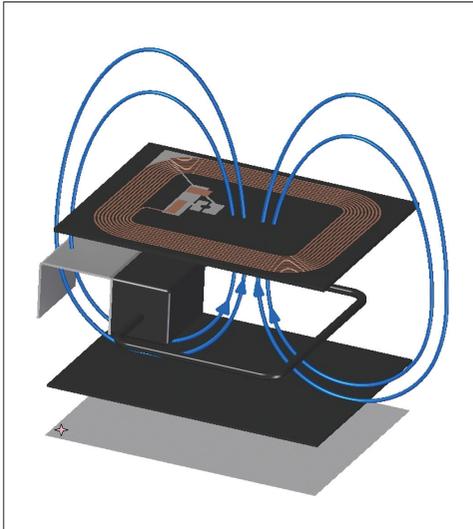


Рис. 12. Экранирование устройств NFC-RFID

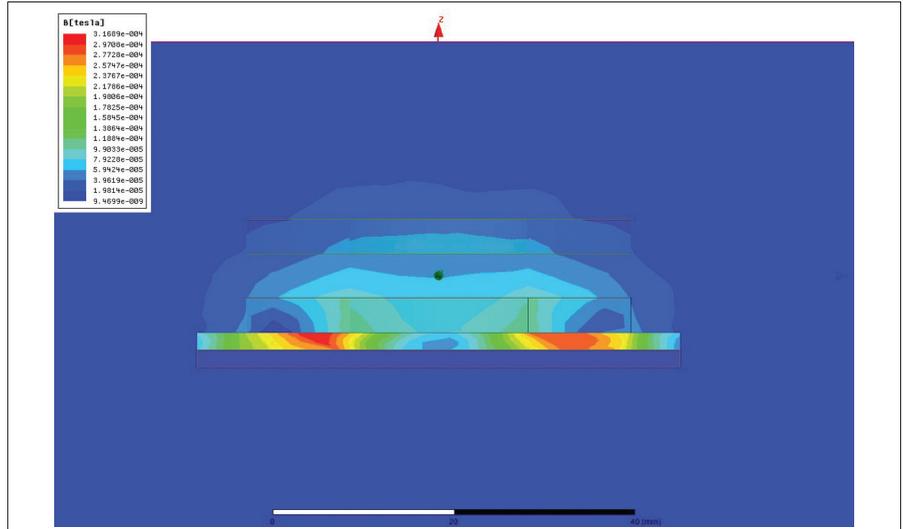


Рис. 13. Результаты симуляции проводящего слоя с ферритовым экраном

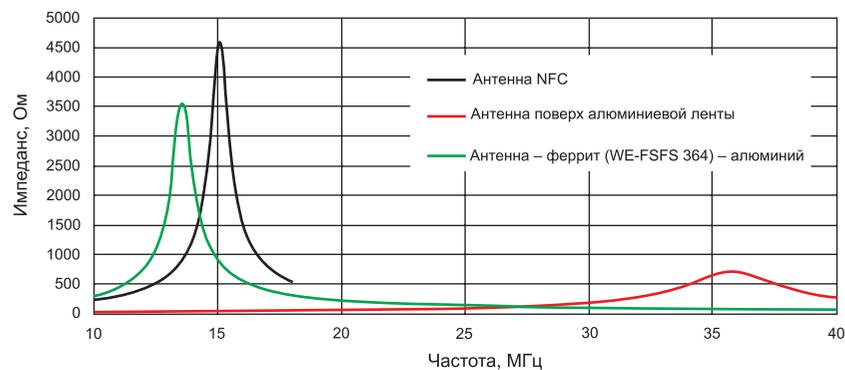


Рис. 14. Влияние экрана (возвращение частоты к исходному значению и повышение добротности)

Технология NFC

К приложениям, в которых применяется технология NFC, относятся платежи с мобильных устройств, оплата билетов в общественном транспорте и управление доступом. Для обмена данными используется частота 13,56 МГц. Катушки индуктивности излучающего и приемного устройств настроены так, чтобы эта частота была резонансной. Как правило, в состав данных устройств входят согласующие цепи.

Однако наличие проводящей поверхности (например, батареи, заземления, металлического корпуса) препятствует нормальной связи из-за эффектов экранирования этих устройств. Поток, генерируемый считывающим устройством (см. синие эллипсы на рисунке 9), проходит по проводящему слою, вызывая вихревые токи.

Эти токи генерируют противоположно направленный поток (см. красные эллипсы на рисунке 9), уменьшая эффективность связи. На рисунке 9 показана связь между устройствами в отсутствие экранирования, а на рисунке 10 — результаты моделирования того, как влияет проводящий слой на распре-

деление магнитного потока. В то же время проводящий материал, находящийся рядом с одной из катушек устройств, уменьшает их индуктивность. В результате резонансная частота схемы возрастает по сравнению с расчетным значением, что увеличивает число отказов и препятствует эффективному установлению связи.

Уменьшение индуктивности вызвано увеличением потерь в катушках из-за потерь в проводящем материале, обусловленных вихревыми токами. В результате возрастает сопротивление катушки по постоянному току, а добротность контура падает (рис. 11).

Согласующей схеме очень трудно компенсировать изменение частоты и добротности. Ферритовая пластина WE-FSFS 364 с большим значением μ' на частоте 13,56 МГц перенаправляет этот поток за пределы проводящего слоя, позволяя избежать появления вихревого тока (см. табл. 2).

В силу малого значения μ'' при той же частоте потери на сопротивлении R существенно не вырастают, и обеспечивается высокая добротность резонансного контура (рис. 12–14).

Выводы

Анализ и измерения параметров индуктивно связанных устройств показали, что эти параметры можно улучшить путем использования ферритовых материалов (в первую очередь, ферритовых пластин). Управляя магнитным потоком, эти материалы обеспечивают превосходное экранирование устройств в таких критичных к помехам приложениях, как передача электроэнергии и беспроводная связь ближнего радиуса действия.

Выбор правильных материалов в соответствии с рабочей частотой приложения, использование максимального значения μ' и минимального μ'' наряду с корректным размещением компонентов на печатной плате обеспечивает высокую эффективность переноса. В то же время следует минимизировать влияние посторонних полей, которые вызывают нежелательные помехи и нагревание устройств. Благодаря отличным рабочим характеристикам и малой толщине гибких пластин WE-FSFS со спеченным ферритом от компании Würth Elektronik достигаются высокие значения эффективности и более высокие уровни интеграции электронных систем. ■

Гибкие ферритовые пластины WE-FSFS и их выбор

Хорхе Виктория АВИР
(Jorge Victoria AHUIR)

В статье рассматривается структура, физические свойства и параметры гибких ферритовых пластин серии WE-FSFS от компании Würth Elektronik eiSos, которые применяются в высокочастотной технике для эффективного поглощения электромагнитного излучения.

Пластины WE-FSFS

Гибкие ферритовые пластины компании Würth Elektronik eiSos (WE-FSFS) предназначены для высокоэффективного управления магнитным потоком. Корректное управление этим потоком улучшает качество передачи энергии и данных в системах с индуктивной связью (NFC, RFID, Wireless Power и т. д.), благодаря чему повышается эффективность приложений и увеличивается дальность связи.

Поскольку размер и вес являются критичными параметрами в современных электронных устройствах, ферритовые материалы последнего поколения в пластинах WE-FSFS



Рис. 1. Пластина WE-FSFS

(рис. 1) обеспечивают оптимальные результаты при минимальной толщине.

Пластины WE-FSFS состоят из следующих трех слоев (рис. 2):

- защитный слой из полиэтилентерефталата (ПЭТ). Высокое удельное поверхностное сопротивление и сила сцепления обеспечивают защиту ферритового слоя;
- основу пластины составляет предварительно изготовленный ферритовый слой из спекаемого материала. Этот слой обеспечивает концентрацию внешних магнитных полей и управление ими;
- клеевой слой с высокой адгезионной прочностью, которая позволяет защитить ферритовый слой и удержать пластину на изделии.

Магнитная проницаемость

Электромагнитные характеристики материалов WE-FSFS определяются их от-

носительной магнитной проницаемостью (рис. 3), где μ' – идеальная магнитная проницаемость, которая обуславливает способность материала концентрировать и перенаправлять магнитный поток. С увеличением μ' пластины WE-FSFS в большей мере концентрируют магнитный поток, повышая качество передачи данных и энергии; μ'' – потери в материале, которые обусловлены преобразованием части магнитного потока в тепло. Обладая высокими значениями μ'' , пластины WE-FSFS хорошо поглощают помехи и преобразуют их в тепло.

Поскольку μ' и μ'' зависят от частоты, необходимо тщательно выбирать материал для каждого конкретного приложения. Например, для RFID-меток, работающих в диапазоне 13,56 МГц, лучше всего подойдет материал 364, который перенаправляет сигналы на рабочей частоте и поглощает сигналы с частотой выше 13,56 МГц (помехи).

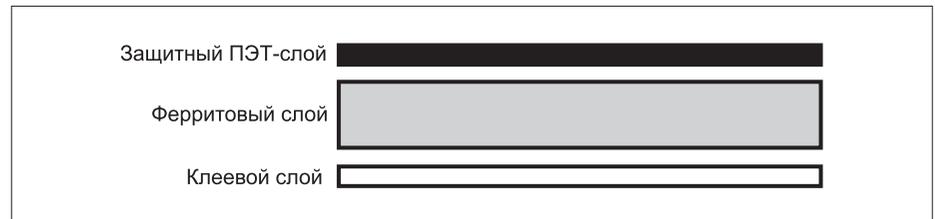


Рис. 2. Структура пластины WE-FSFS

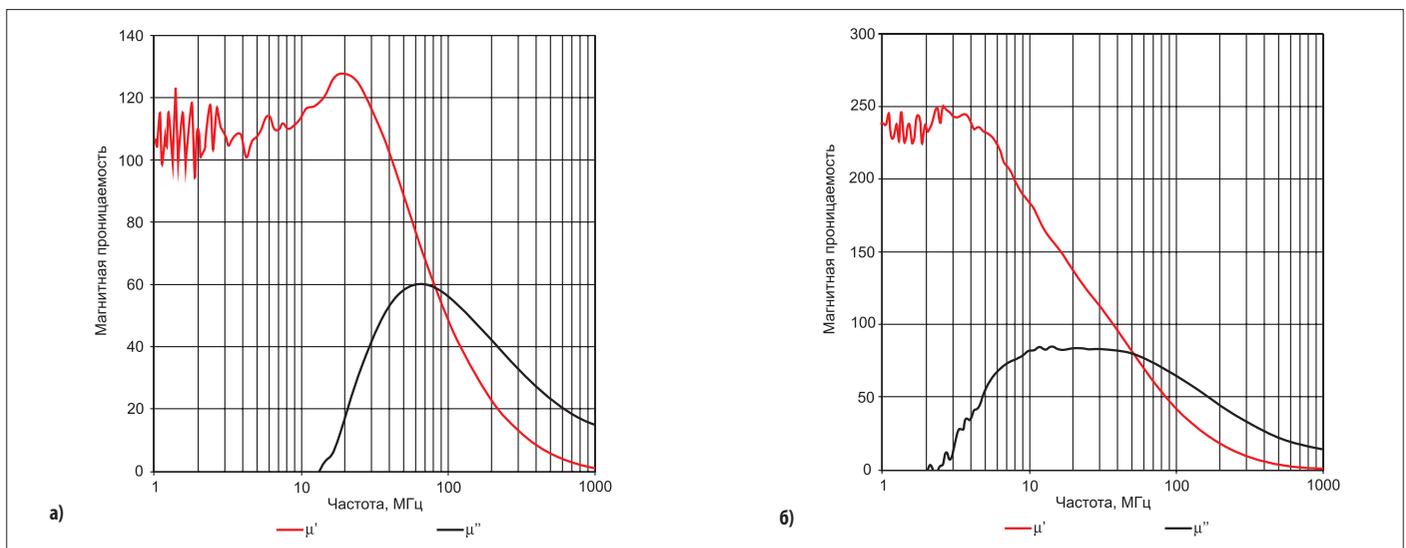


Рис. 3. Относительная магнитная проницаемость материалов 364 и 354

Гибкость

Благодаря своей структуре пластины WE-FSFS, несмотря на малую толщину, имеют достаточную прочность, которая обеспечивает их надежную транспортировку, хранение и монтаж. Ферритовый слой разделяется лазером на квадраты размером 2×2 мм, защищенные с одной стороны ПЭТ-слоем, а с другой — двухсторонним клеевым слоем. Эта структура допускает многократные сгибания, которые не ухудшают ее электромагнитные характеристики.

Испытания на изгиб

Для подтверждения электромагнитных характеристик WE-FSFS компания Würth Elektronik eiSos провела испытания на изгиб (рис. 4).

Пластины изгибали под радиусом 10 см и выдерживали в этом положении 30 с. Этот цикл повторялся 20 раз. Затем измерялись электромагнитные характеристики образцов, чтобы установить их соответствие спецификациям.

Толщина

После выбора требуемого материала выбирается его толщина. Чем она больше, тем лучше ферритовая пластина перенаправляет магнитный поток, поглощает помехи и выше индуктивность катушки. Мы рассмотрим эти эффекты на трех образцах.

Увеличение индуктивности

Благодаря большому значению μ' пластина WE-FSFS, установленная поверх плоской катушки, увеличивает ее индуктивность (рис. 5), не ухудшая добротность. Тот же эффект наблюдается в результате установки ферритового сердечника в традиционные соленоидные катушки. Инженеры компании протестировали влияние пластин WE-FSFS с материалом 354 разной толщины на печатную катушку индуктивности (см. табл. 1).

Перенаправление магнитного потока

Если металлическую пластину установить рядом с RFID-антенной, затрудняется ее функционирование. Генерируемый антенной магнитный поток при пересечении поверхности металла создает в нем вихревые токи. В результате индуктивность антенны уменьшается, и повышается резонансная частота. При существенном отклонении резонансной частоты от величины 13,56 МГц передача данных прекращается.

Этот эффект нивелируется, если установить между антенной и металлической поверхностью ферритовую пластину, которая

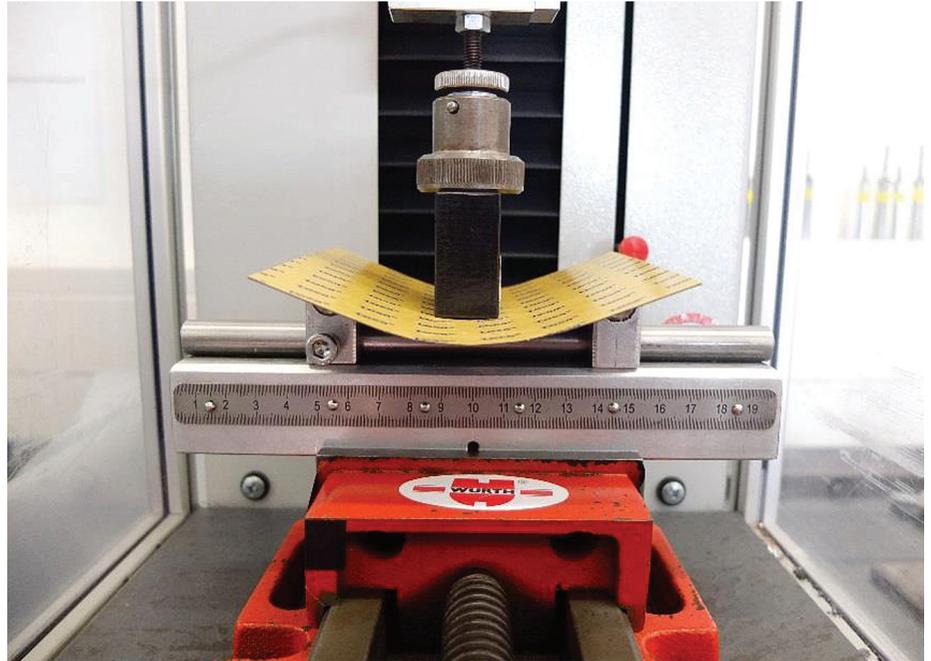


Рис. 4. Испытание пластины WE-FSFS на изгиб

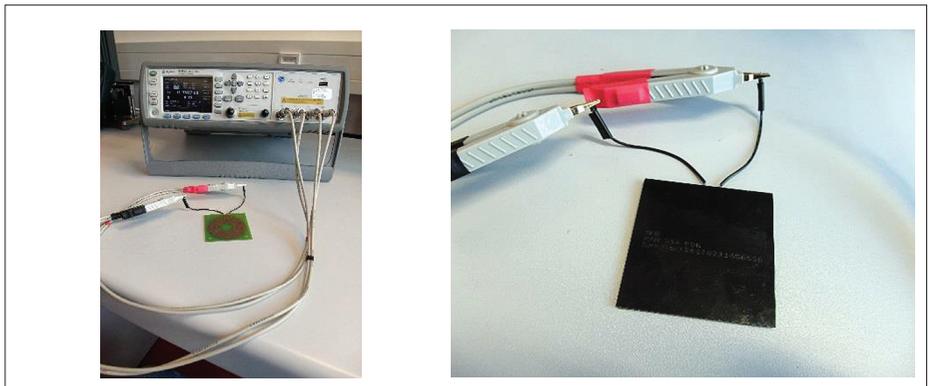


Рис. 5. Измерение влияния толщины пластины на индуктивность печатной катушки

Таблица 1. Результаты влияния пластин WE-FSFS 354 разной толщины на печатную катушку индуктивности

	Печатная катушка	Печатная катушка и пластина WE-FSFS 354 толщиной 0,1 мм	Печатная катушка и пластина WE-FSFS 354 толщиной 0,2 мм	Печатная катушка и пластина WE-FSFS 354 толщиной 0,3 мм
Индуктивность, мкГн	8,4	12,8	13,6	14,2

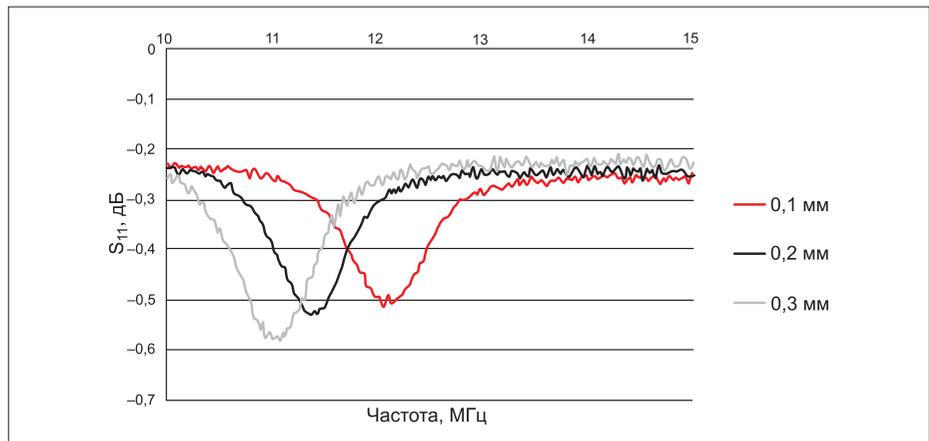


Рис. 6. Влияние толщины ферритовой пластины на резонансную частоту



Рис. 7. Испытательная установка с микрополосковой линией

увеличивает индуктивность антенны и смещает резонанс в область более низких частот. Чем толще пластина, тем больше смещение. Толщина пластины подбирается для каждого конкретного приложения.

Установив ферритовые пластины WE-FSFS 364 разной толщины между RFID-антенной и алюминиевой пластиной толщиной 2 мм, инженеры компании измерили уход резонансной частоты антенны (рис. 6).

Поглощение помех

Благодаря большой величине μ'' в широком диапазоне частот пластины WE-FSFS применяются для поглощения помех. При увеличении толщины пластины растет ее те-

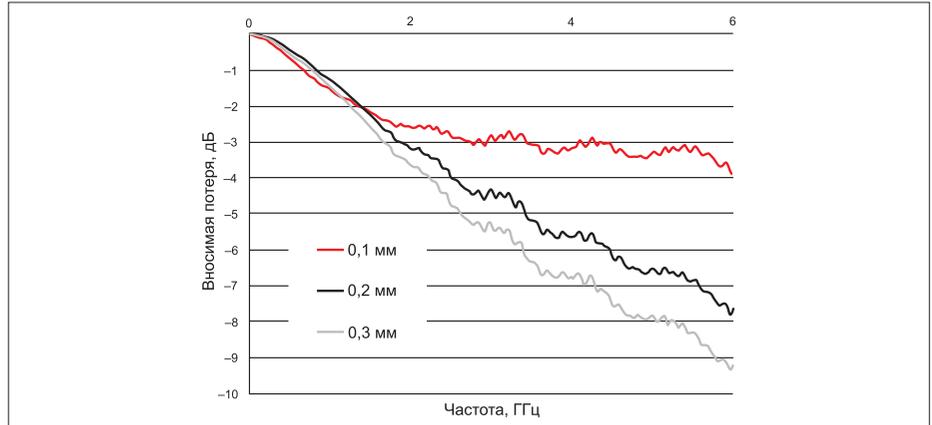


Рис. 8. Вносимое затухание (S_{21}) в микрополосковую линию

плоемкость и, соответственно, способность преобразовывать энергию в тепло.

Чтобы доказать это утверждение, инженеры компании установили пластины WE-FSFS размером 60×60 мм на микрополосковую линию передачи и измерили потери на поглощение (рис. 7–8).

Размеры

Размер и форма пластин WE-FSFS оптимизируются в зависимости от конкретных требований приложения. По запросу компания предоставляет пластины специфической

конфигурации (рис. 9). Необходимо учитывать структуру ферритовой пластины квадратной формы размером 2×2 мм и по возможности избегать возникновения острых углов и тонких перемычек.

Заметим, что пластины WE-FSFS, размеры которых превышают 120×120 мм, компания не производит. При необходимости обеспечить большую площадь покрытия рекомендуется использовать несколько листов, что практически не ухудшает характеристики приложения.

В таблице 2 приведены параметры пластин WE-FSFS. ■

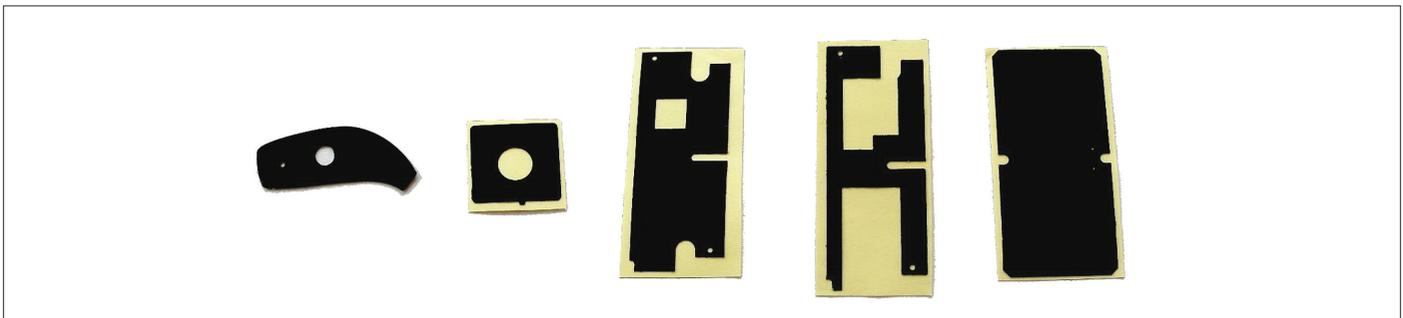


Рис. 9. Примеры заказных пластин WE-FSFS

Таблица 2. Параметры пластин WE-FSFS

Пластина	Код заказа	Д, мм	Ш, мм	В, мм	$R_{\text{поверх}} \text{ ГОм}$	μ' при 1 МГц	μ'' при 13,56 МГц	μ' при 1 МГц	μ'' при 13,56 МГц
WE-FSFS 354 (WPC-Qi, 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 (RFID, NFC, A4WP, 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

Основные вопросы обеспечения электромагнитной совместимости

Несмотря на то, что в рамках одной статьи невозможно обсудить все вопросы проектирования изделий, мы попытаемся описать наиболее часто встречающиеся проблемы, которые были выявлены в сотнях устройств. К этим вопросам относятся неправильно разработанные печатные платы, использование кабелей, экранирование и фильтрация.

Александр ПОНОМАРЕВ

Среди первых трех наиболее часто встречающихся причин отказов находятся излучаемые помехи, восприимчивость к шумам и электростатический разряд. К другим типам отказов относятся кондуктивное излучение, быстро протекающие переходные процессы, порождающие звон и «иголки», восприимчивость к кондуктивным помехам и всплески тока. Большинство из этих проблем обусловлено плохо продуманными схемами, в результате чего и возникают три основных отказа.

Проектирование печатных плат

Наиболее важным фактором, обеспечивающим электромагнитную совместимость и защиту от электромагнитных помех (ЭМП), является правильное проектирование печатных плат. Необходимо заметить, что не во всех источниках информации на эту тему, к которым относятся книги, журнальные статьи или указания по применению от производителей, корректно освещаются вопросы проектирования печатных плат с целью обеспечить ЭМС. В первую очередь, это замечание относится к источникам информации старше 10 лет. Кроме того, многие т. н. «эмпирические правила» основаны на практике разработки специфических приложений и уже неприменимы к разработке современных или будущих систем.

Платы для цифровых устройств необходимо проектировать, руководствуясь законами физики с учетом того, что проводники с высокочастотными сигналами, синхросигналами и схемы разводки питания (СРП) должны создаваться как линии передачи. Это значит, что по печатным платам сигналы или энергия передаются в виде электромагнитных волн. Отдельный случай представляют собой схемы разводки питания, поскольку в них должна запастись энергия для переходных процессов. Характеристический импеданс СРП должен быть очень мал — как правило, 0,1–1 Ом, тогда как у сигнальных проводников этот показатель составляет 50–100 Ом.

Часто причиной возникновения отказа является недостаточно хорошо продуманный возвратный тракт. Разрывы или щели в обрат-

ном тракте являются главными причинами отказов, обусловленных излучаемыми помехами, восприимчивостью к шумам и электростатическими разрядами.

Электрические поля на платах ПК возникают между двумя металлическими поверхностями, например микрополосковой линии в слое обратного сигнала. В поврежденной обратной цепи электрическое поле «замыкается» на ближайший металлический участок, приводя к изменению расчетных параметров обратного тракта. Утечка электромагнитного поля через диэлектрик приводит к появлению синфазных токов на всей поверхности платы, а также к возникновению перекрестных помех из-за взаимного влияния синхросигналов или других быстро распространяющихся сигналов на десятки других проводников схемы в том же диэлектрическом слое.

На рисунке 1 показано, как распространяется волна в диэлектрике по сигнальному проводнику и обратно, а также ток смещения. Скорость волнового фронта сигнала определяется диэлектрической проницаемостью материала. В воздушной среде сигналы проходят около 30 см за 1 нс. В типовом стеклотекстолите эта скорость в два раза меньше. В [1–3] подробно описаны физические аспекты распространения сигналов по печатным платам ПК.

Следует учитывать взаимодействие между соседними слоями питания и обратными трактами питания, а также между соседними слоями сигнальных и обратных сигнальных трактов. В схеме разводки питания требуются сглаживающие и развязывающие конденсаторы для накопления энергии. Сглаживающие конденсаторы емкостью 4,7–10 мкФ (тип.), как правило, устанавливаются вблизи входного разъема питания, а развязывающие конденсаторы емкостью 1–10 мкФ (тип.) — рядом с самыми шумящими коммутационными устройствами. В идеальном случае все развязывающие конденсаторы должны устанавливаться над (или рядом) сквозными переходными отверстиями. Для каждого конденсатора применяется несколько таких отверстий, чтобы уменьшить величину последовательной индуктивности.

У сигнальных слоев и слоев питания всегда имеется тракт для возвращения тока в источник. Из рисунка 2 видно, как электромагнитное поле сосредотачивается в диэлектрике по обеим сторонам слоя обратного тракта сигнала. Собственно диэлектрик не показан для наглядности представления.

ПРИМЕЧАНИЕ.

В статье намеренно не используется понятие «земля», которое очень по-разному многие понимают, что в конечном итоге приводит к возникновению отказов из-за проблем с электромагнитной совместимостью (ЭМС). Гораздо точнее использовать термины «питание» и «обратный провод питания», а также «сигнал» и «возвратный сигнал», или «слой с обратным сигналом», или «опорная плоскость». Наконец, правильнее утверждать, что экран кабеля и экранированный корпус «соединены» друг с другом, но не «заземлены». Под опорной плоскостью понимается слой или плоскость, имеющая электрическое соединение с общим выводом источника питания или с выводом разъема, который связан с общим выводом источника питания. Единственным исключением является употребление термина «защитное заземление», или «заземление». Однако у него нет ничего общего с проектированием, обеспечивающим ЭМС, поскольку заземление предназначено всего лишь для защиты от поражения электрическим током. Исключением в этом случае является заземление трехпроводного сетевого фильтра. Кроме того, в некоторых случаях применяется заземление плат персонального компьютера — в первую очередь, речь идет об источниках питания. Однако и в этих случаях заземление изделия или системы не повышает уровень защиты от ЭМП из-за очень высокой индуктивности (длины) провода.

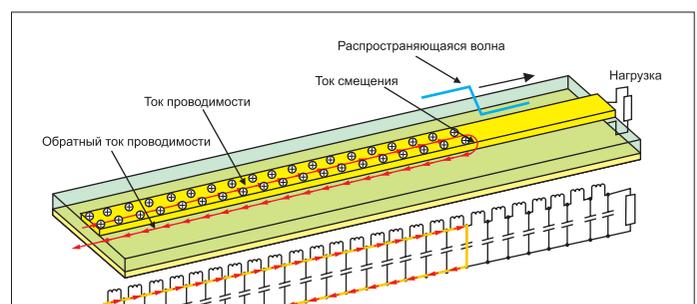


Рис. 1. Распространение электромагнитной волны по микрополосковой линии с опорной плоскостью

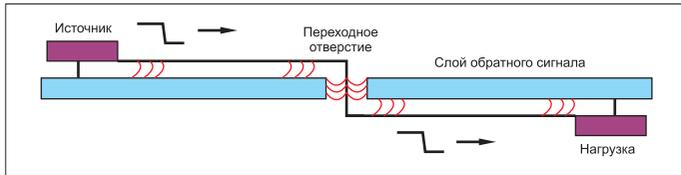


Рис. 2. Сигнальный проводник, проходящий через слой с обратным сигналом

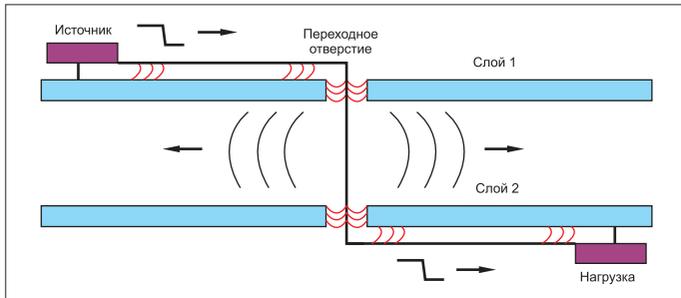


Рис. 3. Сигнал распространяется по проводнику через две опорные плоскости. Если у них одинаковый потенциал, рядом с отверстиями для сигналов достаточно расположить массив переходных отверстий. Однако если у этих плоскостей разные потенциалы, очень близко к отверстиям для сигналов устанавливается массив конденсаторов. Если тракт обратного сигнала недостаточно хорошо проработан, возникает утечка электромагнитного поля вокруг диэлектрика, появляются наводки на другие сигнальные отверстия или помехи на краях платы

С другой стороны, из рисунка 3 видно, что, если сигнал проходит через две опорные плоскости, анализ такого случая намного усложняется. Если у двух плоскостей одинаковый потенциал (например, они являются опорными), рядом с сигнальным отверстием можно расположить соединительные переходные отверстия. В результате появится хорошо определенный тракт обратного сигнала.

Если у двух плоскостей разные потенциалы, конденсаторный массив устанавливается рядом с сигнальным переходным отверстием. В недостаточно хорошо продуманном тракте с обратным сигналом электромагнитная волна распространяется через диэлектрик, вызывая перекрестную помеху на других сигнальных отверстиях, помехи на краях платы, а также утечку энергии.

Например, рассмотрим на рисунке 4 случай неправильного, но очень распространенного проектирования многослойной платы.

Из рисунка видно, что слои питания и обратного тока питания отделены друг от друга. Любые переходные процессы в схеме распределения питания являются источниками перекрестной помехи для двух сигнальных слоев, которые находятся между этими шинами питания. Аналогично, поскольку несколько сигнальных слоев соседствует с плоскостью обратного тока питания, распространяющаяся по ней волна воздействует на ближайшие металлические проводники, соединенные с источником питания. В таких случаях помехи, создаваемые тактовыми последовательностями, распространяются по всей плате.

Пример корректного расположения слоев платы показан на рисунке 5. В этом случае один сигнальный слой отсутствует, а слои питания и обратного тока питания расположены рядом друг с другом. При этом каждый сигнальный слой соседствует с сигнальным или силовым слоем обратного тока. Два слоя с обратными токами соединяются переходными отверстиями, что обеспечивает наименьший импеданс обратного тракта. ЭМП можно значительно уменьшить, если использовать этот же принцип при проектировании печатных плат. Во многих случаях достаточно поменять порядок расположения плоскостей в многослойных платах, чтобы уменьшить помехи.

Заметим, что при прохождении сигналов между верхним и нижним слоями следует на расстоянии 1–2 мм от каждого переходного отверстия с сигналом расположить массив переходных отверстий между слоями обратного тока и массив конденсаторов между шинами питания. Такие меры позволяют минимизировать обратный тракт.

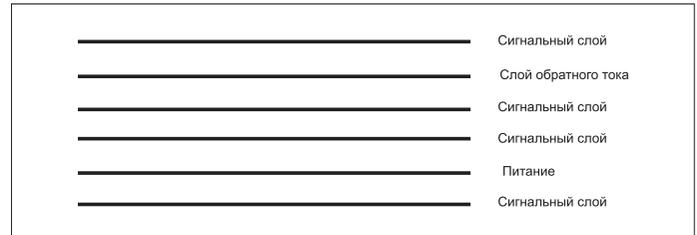


Рис. 4. Из-за неправильного расположения слоев платы возникают большие электромагнитные помехи

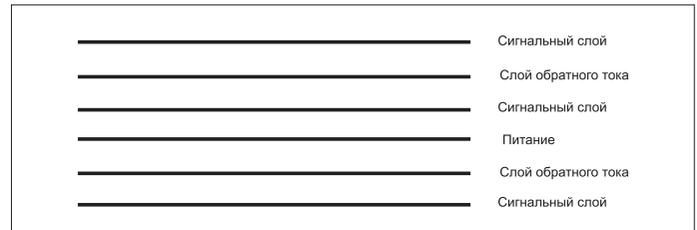


Рис. 5. Пример корректного расположения слоев платы, благодаря которому минимизируются ЭМП. Каждый сигнальный слой соседствует с обратным слоем, а слои питания и обратного тока питания расположены рядом друг с другом

Рекомендуется также располагать все разъемы питания и портов ввода/вывода вдоль края печатной платы, чтобы уменьшить перепад напряжения высокой частоты между разъемами и свести к минимуму, таким образом, помехи от кабеля. Кроме того, рекомендуется отделять друг от друга цифровые, аналоговые и РЧ-цепи, чтобы уменьшить перекрестные помехи.

Разумеется, тракты для высокоскоростных сигналов, в т. ч. синхросигналов, должны иметь минимальную длину. В случае с высокоскоростными сигналами нельзя размещать проводники сравнительно большой длины вдоль краев печатной платы или рядом с разъемами.

Щели в слое с обратным током

На рисунке 6 схематично показан разрыв в обратном токовом тракте. Ток проводимости вынужден течь вокруг щели. В противном случае он находит путь с наименьшим импедансом, чтобы вернуться к своему источнику. Электромагнитное поле этого тока распространяется по всей печатной плате [4].

Разница между уровнем помех в обратных трактах со щелью и без нее видна из рисунка 7. Красным цветом показаны гармонические токи в диапазоне 10–15 дБ и выше в случае с проводником со щелью. Следует помнить, что главной причиной отказов из-за воздействия излучаемых помех являются сигнальные тракты и проводники с токами, протекающими к источнику питания.

Экранирование

При использовании экранированных корпусов требуется решить две задачи. Первая из них заключается в обеспечении плотного, без щелей, соединения всех частей корпуса друг с другом, а вторая — в том, чтобы силовые кабели и кабели ввода/вывода проходили

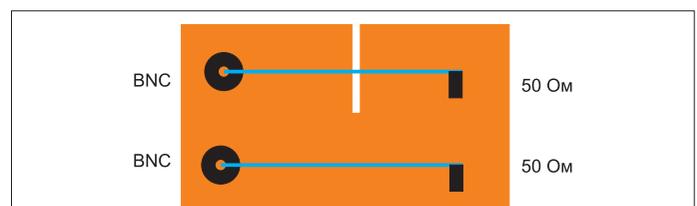


Рис. 6. Демонстрационная тестовая плата с линиями передачи сигнала с согласованным импедансом 50 Ом. У одной из этих линий — щель в обратном тракте. Генератор импульсов длительностью 2 нс поочередно подключался к одному из двух BNC-разъемов, после чего измерялся гармонический ток в перерезанном проводе

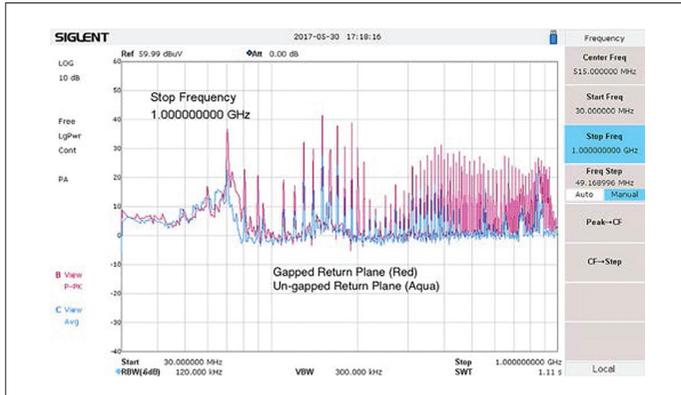


Рис. 7. Измеренные синфазные токи. Синим цветом показаны синфазные токи в обратном тракте без щели, а красным — в обратном тракте со щелью. Между теми и другими сигналами наблюдается разность в диапазоне 10–15 дБ и выше. При протекании гармонических токов излучаются помехи, которые могут привести к отказу системы

сквозь корпус, не вызывая утечек синфазных токов. Для надежной связи между металлическими элементами корпуса могут понадобиться уплотнительные прокладки или другие средства. Щели или отверстия в экранированных корпусах требуют обязательной заделки, если их наибольший размер сопоставим с длиной полуволны. С помощью диаграммы на рисунке 8 можно определить, на какой частоте эффективность ослабления сигнала достигает 20 дБ при заданной длине щели. Подробнее об этой зависимости и рекомендации по проектированию экранов изложены в [5–7].

На рисунке 9 показана диаграмма, позволяющая установить частоту в зависимости от длины щели. Например, у 15-см щели полуволновой резонанс происходит на частоте 1000 МГц. Если требуется, чтобы эффективность ослабления с помощью защитного экрана составила, по меньшей мере, 20 дБ, максимальная длина щели должна равняться 1,27 см.

Ввод кабеля в экранированный корпус

Одним из основных источников электромагнитного излучения являются кабели, которые входят в экранированный корпус без соответствующей защиты — экрана, который должен был бы надежно соединяться с металлическим корпусом, или без фильтрации синфазных помех на силовом разъеме либо разъеме ввода/вывода (рис. 10–11). Так происходит достаточно часто, поскольку большинство разъемов крепится непосредственно к печатной плате и проходит через

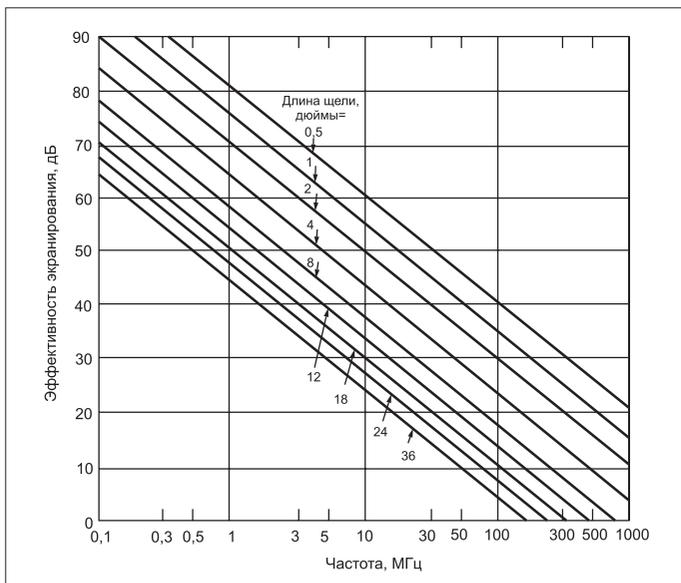


Рис. 8. Диаграмма зависимости эффективности ослабления от длины щели

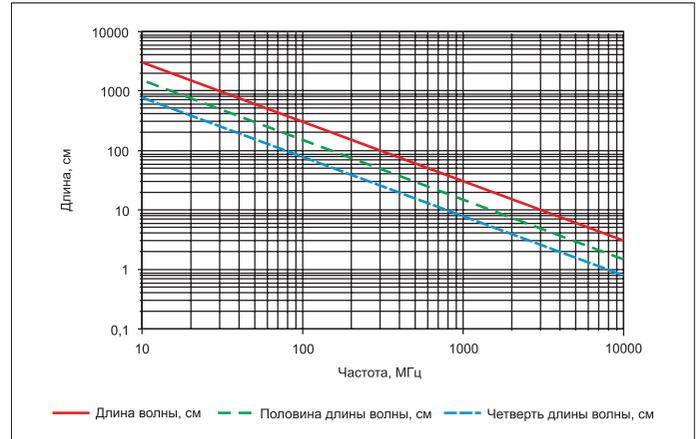


Рис. 9. Определение резонансной частоты в зависимости от длины щели. Щели, длина которых составляет половину длины волны, можно считать дипольными антеннами — источниками помех

экран. Кабель, подключенный к внутренним цепям без соответствующей защиты, становится причиной возникновения ЭМП.

При проектировании приложения необходимо учитывать, какие изделия и кабели станут применяться — экранированные или неэкранированные. Поскольку силовые кабели, как правило, являются неэкранированными в случае потребительских или коммерческих изделий, требуется фильтрация сетей электропитания в точке ввода кабеля или у разъема печатной платы. Экранированные кабели должны соединяться с экранированным корпусом изделия. Если изделие не защищено от помех экранированным корпусом, в точке ввода кабеля или у разъема ввода-вывода платы устанавливается схема фильтрации. На рисунке 11 показано, что происходит в отсутствие соединения между экранами разъемов и корпуса.

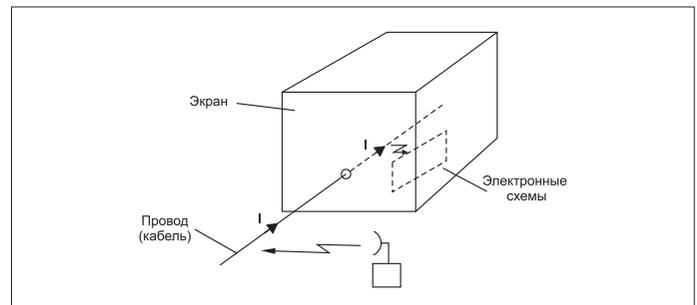


Рис. 10. Незащищенный ввод кабеля в корпус нарушает экранировку. Внешние источники энергии наводят шумовые токи в кабеле ввода/вывода, которые воздействуют на внутренние цепи. Верно и обратное — внутренние шумовые токи, покидающие пределы кабеля, становятся причиной возникновения отказов

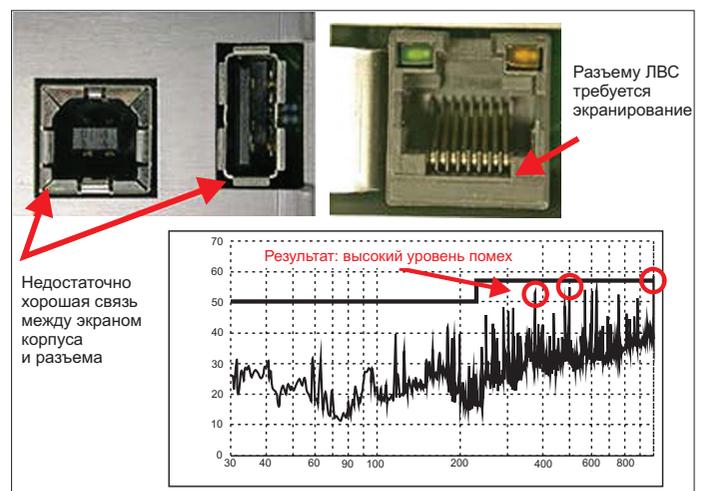


Рис. 11. Высокий уровень помех из-за отсутствия соединения разъемов ввода/вывода с экранированным корпусом

Фильтрация

Мы не станем очень подробно останавливаться на вопросе фильтрации ЭМП, поскольку он достаточно хорошо рассмотрен в [8]. Достаточно упомянуть, что фильтры, а также схемы защиты от переходных процессов играют важную роль в разъемах питания и ввода/вывода. Как правило, в таких случаях применяются синфазные фильтры (рис. 12). Большую часть синфазных дросселей можно изготавливать под поверхностный монтаж. Силовые дроссели имеют достаточно большой размер и выпускаются для поверхностного монтажа или монтажа в сквозные отверстия, что зависит от величины номинального тока. Многие Ethernet-разъемы оснащены встроенным синфазным фильтром.

Фильтры, установленные на входах источников питания, как правило, предназначены для подавления дифференциальных и синфазных токов. Типовая схема фильтра представлена на рисунке 13. Конденсатор X фильтрует дифференциальный ток, а дроссель СМ и конденсаторы Y — синфазный ток.

Ферритовые или индуктивные компоненты нельзя устанавливать последовательно выводам питания микросхем, т. к. в результате ухудшается способность развязывающих конденсаторов поставлять необходимую энергию при одновременных переключениях выходных каскадов этих ИС, что приводит к провалу напряжения питания.

Ферритовые дроссели

Часто кабельные сборки ввода-вывода оснащаются ферритовыми дросселями, которые уменьшают помехи от кабелей или восприимчивость к шумам.

Величина импеданса большинства ферритовых дросселей зависит от АЧХ и часто имеет пиковые значения в диапазоне 100–300 МГц. В системах, работающих на более низких частотах, использование в сердечниках некоторых материалов обеспечивает пиковые значения импеданса на частотах меньше 100 МГц. Максимальные значения импеданса находятся в диапазоне 25–1000 Ом в зависимости от используемого ферритового материала и типа дросселя.

В некоторых случаях применение ферритовых дросселей в кабельных сборках не обеспечивает требуемого затухания по той причине, что эффективный импеданс дросселя тот же или меньше, чем у кабеля. Величина затухания при использовании ферритового дросселя определяется следующим образом:

$$20\lg((Z_{ВХ} + Z_{ФЕРРИТ} + Z_{НАГР})/(Z_{ВХ} + Z_{НАГР})).$$

Например, если в цепь с кабелем источника питания установить 100-Ом ферритовый дроссель при импедансе системы 10 Ом, величина затухания составит:

$$20\lg((10 + 100 + 10)/(10 + 10)) = 15,5 \text{ дБ.}$$

Ферритовые дроссели и общая схема фильтрации намного подробнее рассматриваются в [9].

Защита от помех в переходном процессе

Чтобы предотвратить воздействие переходных процессов на внутренние цепи, например обеспечить защиту от электростатического разряда, всплесков напряжения в сети, ударов молний, на все порты питания и ввода/вывода устанавливаются специальные устройства, которые ограничивают импульсы переходного процесса до заданной величины напряжения.

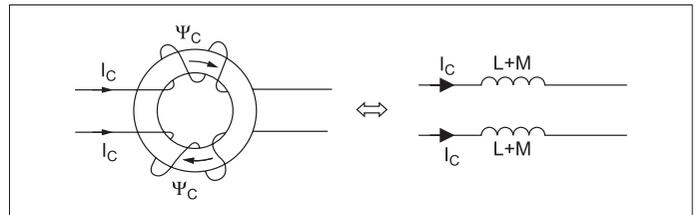


Рис. 12. Стандартный синфазный фильтр для фильтрации помех в кабелях ввода/вывода. Две разнонаправленные обмотки позволяют избавиться от синфазных токов

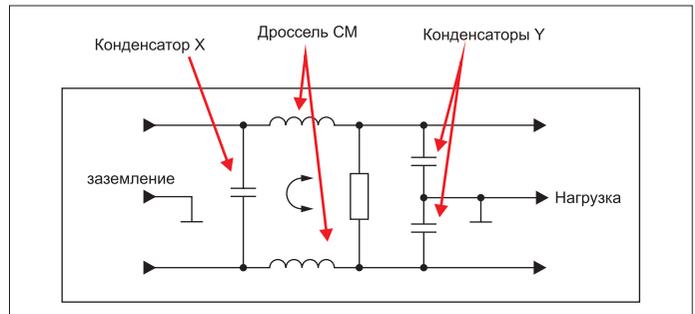


Рис. 13. Универсальный фильтр, который применяется для фильтрации на входе источника питания

У устройств, предназначенных для защиты от переходных процессов и используемых в сигнальных линиях, как правило, величина емкости, параллельной тракту с обратным током, должна быть очень мала (0,2–1 пФ), чтобы обеспечить целостность сигналов. У этих полупроводниковых устройств корпуса для поверхностного монтажа имеют очень малые размеры.

Для защиты от всплесков напряжения в линиях питания требуются устройства намного большего размера. Наиболее востребованными являются газоразрядные или металлооксидные варисторы. Подробнее о проектировании схем защиты от всплесков напряжения см. [4].

Выводы

Большинство отказов из-за плохой электромагнитной совместимости и электромагнитных помех обусловлено недостаточно хорошим экранированием, непродуманной топологией печатной платы и некорректным размещением ее слоев. Устранение причин этих широко распространенных отказов снижает риск возникновения неисправностей, позволяет уменьшить стоимость проектирования и сократить график изготовления изделий. ■

Литература

1. Eric Bogatin. Signal Integrity – Simplified. Prentice-Hall. 2009.
2. Ralph Morrison. Grounding and Shielding – Circuits and Interference. Wiley. 2016.
3. Ralph Morrison. Digital Circuit Boards – Mach 1 GHz. Wiley. 2012.
4. Kenneth Wyatt. Gaps in Return Planes – Bad News for EMI (with video demo) // interferencetechnology.com/gaps-return-planes-bad-news-emi.
5. Henry Ott. Electromagnetic Compatibility Engineering. Wiley. 2009.
6. Patrick André and Kenneth Wyatt. EMI Troubleshooting Cookbook for Product Designers. SciTech. 2014.
7. ITEM. 2016 EMI Shielding Guide // learn.interferencetechnology.com/2016-emi-shielding-guide.
8. ITEM. 2017 EMC Filters Guide // learn.interferencetechnology.com/2017-emc-filters-guide.
9. Würth Elektronik. Trilogy of Magnetics. 2010.

Статья опубликована в журнале «Электронные компоненты» № 9'2017

Инженерное моделирование квазистатического электромагнитного поля в программе ELCUT для задач электроники

Семен ДУБИЦКИЙ
simon@tor.ru

Программа ELCUT разработки ООО «Тор» (Санкт-Петербург) — единственный в России коммерческий инструмент общего назначения для моделирования низкочастотных электромагнитных и температурных полей методом конечных элементов. Она написана электротехниками для инженеров-электротехников и имеет множество пользователей в этой индустрии и профильных вузах. В статье предпринята попытка заново переосмыслить возможности применения ELCUT также и в электронике, выделить классы задач, где ее использование целесообразно, и осознать имеющиеся границы применимости.

Введение

Более столетия назад инженеры, работающие с задачами электромагнитного поля, разделились на две слабо связанные культуры: низкочастотные поля большой мощности (электротехника) и высокочастотные поля относительно малой мощности (электроника). Несмотря на то, что обе группы работают с решениями уравнений Максвелла, в каждом практическом случае эти уравнения решаются в разных приближениях и допущениях, специально подобранных для адекватного описания конкретного круга задач.

Традиционной средой обитания расчетчиков современной электронной техники является высокочастотная часть спектра электромагнитного поля, где господствуют волновые решения. В то же время в задачах электротехники уравнения Максвелла обычно записываются в допущениях, приводящих к уравнению диффузии, у которого волновые решения отсутствуют.

В данном обзоре предпринята попытка осмысления того, как программа ELCUT, использующая низкочастотное (квазистационарное) приближение уравнений электромагнитного поля, может быть использована в задачах проектирования электронной техники [4] и где проходит граница ее применимости.

Программа ELCUT

Петербургская компания «Тор» — это компания одного продукта: программы ELCUT [1, 2]. Ключевые слова, характеризующие ELCUT, — инженерное моделирование [3] и квазистатический анализ [4].

Слово «инженерный» команда ELCUT понимает следующим образом: программа предназначена в том числе и для тех инженеров, которые нуждаются в расчете поля

время от времени, и для которых эта задача не обязательно находится в центре профессиональных интересов и навыков. Это означает повышенные требования к простоте и интуитивной ясности использования продукта.

В свою очередь, простота использования означает, что программа не только в полной мере автоматизирует рутинные операции, но и способна предлагать ключевые решения в областях, для которых она является экспертной системой. К примеру, мы полагаем, что модуль решения задачи должен иметь единственную кнопку «решить», не осложняя жизнь пользователю постановкой вопросов о том, какой метод он предпочитает, сколько и каких нужно делать итераций и т. п. Все эти решения разумная программа инженерного анализа должна принять сама, сделав это оптимальным образом.

От пользователя, освобожденного от рутинных операций, ожидается знание физической сути решаемой задачи и детальное понимание сделанных им допущений и упрощений.

История создания ELCUT

Компания основана осенью 1988 г., в основном выходцами из завода «Электросила», где к тому времени функционировала сильная школа численного моделирования электромагнитных полей под руководством профессора В. В. Домбровского.

За более чем 25-летний путь развития программы расширился диапазон формулировок полевых задач, которые представляют собой подмножество полной системы уравнений Максвелла с упрощениями и допущениями, специально подобранными для решения определенного круга практических задач [4]. К настоящему времени расчет электрического и магнитного поля может проводиться в статическом приближении, в частотной и временной

области, с учетом многих видов нелинейности, т. е. зависимости параметров задачи от поля.

ELCUT предоставляет также развитый программный интерфейс [5], позволяющий писать клиентские приложения в диапазоне от простых скриптов до специализированных систем анализа в предметной области. Ряд сателлитных приложений и утилит с исходными кодами доступен для свободной загрузки с сайта программы.

В последние годы основным направлением развития ELCUT является освоение трехмерного анализа. К настоящему времени (версия 6.3) возможно решение трехмерных статических задач со скалярной потенциальной функцией: электростатика, электрическое поле постоянного тока, температурное поле.

Пользователи ELCUT

Важно иметь в виду, что ELCUT является «коробочным» продуктом, т. е. поставляется пользователям из разных областей инженерной и исследовательской деятельности as is, без кастомизации.

Основной массив пользователей ELCUT в индустрии — предприятия, поставляющие электротехнические изделия и компоненты, такие как электрические машины, трансформаторы [13], высоковольтные аппараты, кабельная техника [11], электролитические конденсаторы и др. (рис. 1).

Другие пользователи представляют электронное приборостроение, обычно с преобладанием магнитных компонентов (магнетроны, томографы), магнитное обогащение рудных и нерудных материалов [9]. В последние годы усилился интерес строительных проектировщиков к расчету тепловых свойств ограждающих конструкций современных зданий [8] методами численного моделирования температурного поля. Пригодность ELCUT к задачам тепло-

вой защиты зданий подтверждена сертификатом соответствия.

Среди научно-исследовательских организаций пользователями ELCUT являются:

- ведущие научные центры экспериментальной физики;
- создатели электрофизического оборудования;
- ведущие научные центры по электротехнической аппаратуре;
- центры материаловедения, прежде всего в области магнитных материалов;
- организации, занятые оборудованием неразрушающего контроля.

Пользователи отмечают, что ELCUT является хорошим выбором для первого знакомства с техникой моделирования поля методом конечных элементов. Это способствует распространению ELCUT в ведущих инженерных вузах страны, в основном на кафедрах общей и теоретической электротехники [6], электрических машин и аппаратов, а также на кафедрах, связанных с силовоточной электронно-лучевой и твердотельной электроникой [7].

Обзор формулировок задач

Как отмечалось выше, полная система уравнений Максвелла почти никогда не используется целиком при численном моделировании. Для каждого очерченного круга практических задач выбираются адекватные упрощающие допущения, которые образуют ту или иную частную формулировку (рис. 2). Все формулировки ELCUT опираются на квазистационарное приближение, приводящее к уравнению диффузии.

Для расчета электрических полей в диэлектриках и проводящих средах используются *электростатическая формулировка*, позволяющая вычислить емкость и оценить электрическую прочность, *электрическое поле постоянных токов*, оценивающее интегральное сопротивление проводниковых систем постоянному току и омические потери, *электрическое поле переменных токов* в частотной области, расширяющее понятие электростатики на случай неидеального диэлектрика с потерями, и *нестационарное электрическое поле*, вводящее в оборот нелинейные характеристики материала при анализе во временной области.

Для расчета магнитных полей используется *магнитостатическая формулировка*, позволяющая определить индуктивность с учетом насыщения магнитных материалов для поля, созданного постоянными токами и постоянными магнитами. Формулировка *магнитного поля переменных токов* проводит анализ в частотной области с учетом вихревых токов. Главные результаты такого расчета — активные и индуктивные сопротивления проводников с полным учетом скин-эффекта и эффекта близости, а также потери в проводниках и магнетиках



Рис. 1. Области применения ELCUT

на переменном токе. Задача *нестационарного магнитного поля* решается во временной области с полным учетом реальной кривой намагничивания ферромагнетиков. Этот анализ позволяет учитывать одновременное магнитное действие переменных, постоянных и импульсных токов и постоянных магнитов.

Математическое сходство уравнений позволяет распространить ELCUT также на задачи расчета температурного поля и упруго-напряженного состояния. Задача теплопроводности решается в установившемся (статическом) или переходном режимах (во временной области). Эффекты конвективного и радиационного теплообмена учитываются приближенно в виде граничных условий. Теплотехнические свойства материалов (теплопроводность, теплоемкость) могут зависеть от температуры. Задача упругости анализирует плосконапряженное, плоско-деформированное или осесимметричное упру-

гое напряженное состояние материала при различных видах нагружения и закрепления.

Мультифизические задачи

Задачи, одновременно использующие уравнения из разных областей физики (доменов) или качественно различные модели, принято называть мультифизическими. Связи между доменами могут быть сильными, когда все уравнения аккумулируются в одной общей матрице и решаются совместно, либо слабыми (последовательными), когда задачи в разных доменах решаются последовательно одна за другой. ELCUT использует сильную связь при совместном решении уравнений магнитного поля с уравнениями Кирхгофа для присоединенной электрической цепи (цепно-полевая формулировка), а для большинства остальных мультифизических задач используется последовательная связь (рис. 3).

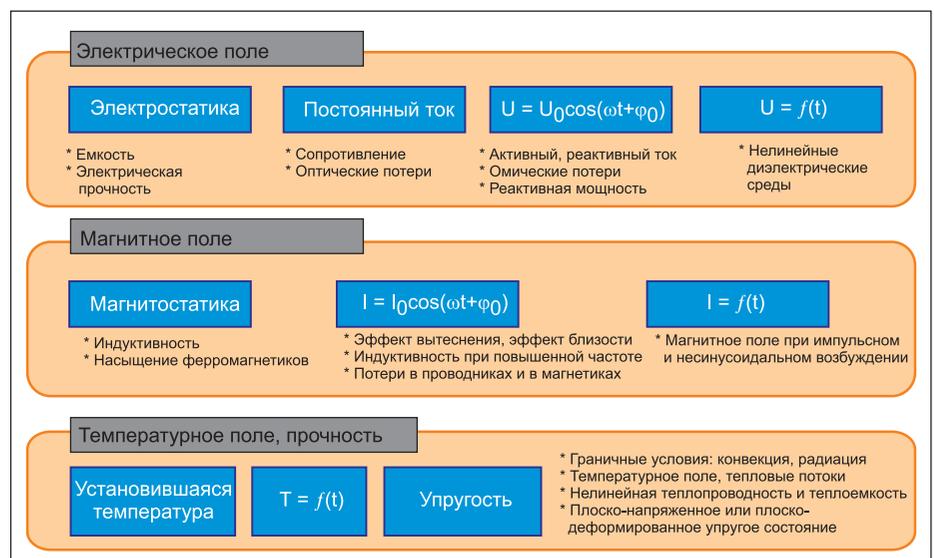


Рис. 2. Обзор постановок задач в ELCUT

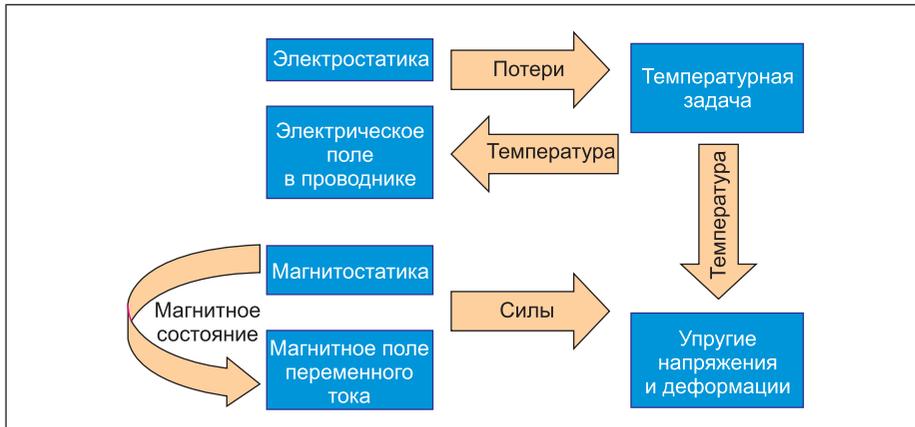


Рис. 3. Мультифизические связи между отдельными постановками задач

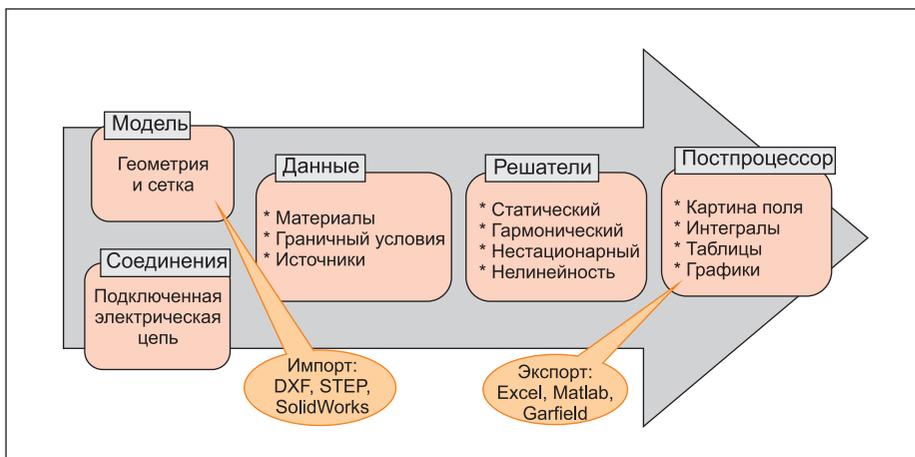


Рис. 4. Подсистемы программы ELCUT

Так, любая задача анализа электрического или магнитного поля порождает электродинамические усилия, которые могут автоматически передаваться в задачу упругости в качестве источника.

Каждая электрическая или магнитная формулировка, рассматривающая ток в проводящей среде, генерирует омические потери, которые могут быть переданы в качестве

источника тепла в задачу температурного поля. С другой стороны, электропроводность металлов зависит от температуры, так что результат расчета температурного поля может передаваться в электромагнитный анализ для уточнения удельного сопротивления среды.

Температурное поле также может использоваться задачей анализа упругого напряженного состояния в качестве источника термических деформаций. И, наконец, магнитное состояние нелинейного ферромагнитного материала может запоминаться и экспортироваться в другую магнитную задачу для корректного вычисления дифференциальной индуктивности многообмоточной магнитной системы.

Подсистемы ELCUT

Последовательность решения задачи в ELCUT предельно проста: нарисовать геометрию модели, сгенерировать расчетную сетку конечных элементов, указать граничные условия, задать свойства материалов, решить дискретную задачу, проанализировать результат решения, извлекая из него локальные и интегральные инженерные параметры.

Перечисленным этапам решения соответствуют подсистемы ELCUT (рис. 4):

- Геометрический редактор для работы с геометрией модели и сеткой конечных элементов. Геометрия может быть прорисована в модели либо импортирована из CAD в формате DXF или SolidWorks. Сетка конечных элементов строится полностью автоматически с гибкими возможностями априорного либо адаптивного управления густотой.
- Подсистема физических данных управляет и хранит сведения о граничных условиях и разнообразных свойствах материалов в разных физических доменах. Некоторые свойства могут нелинейно зависеть от поля либо от температуры. Многие граничные условия могут быть заданы формулой, описывающей их зависимость от координат и времени.
- Редактор электрической цепи используется для решения задач магнитного поля с сопряженной электрической схемой соединения проводников.
- Решатель системы уравнений отличается высокой устойчивостью, отсутствием управляющих параметров и пологой зависимостью времени решения задачи от ее размерности (время пропорционально размерности примерно в степени 1,10...1,15) (рис. 5).
- Подсистема анализа решения (постпроцессор), по отзывам пользователей, является одним из самых разветвленных в индустрии. Он показывает картину поля разными способами (цветная карта, линии поля, семейства векторов, графики, та-

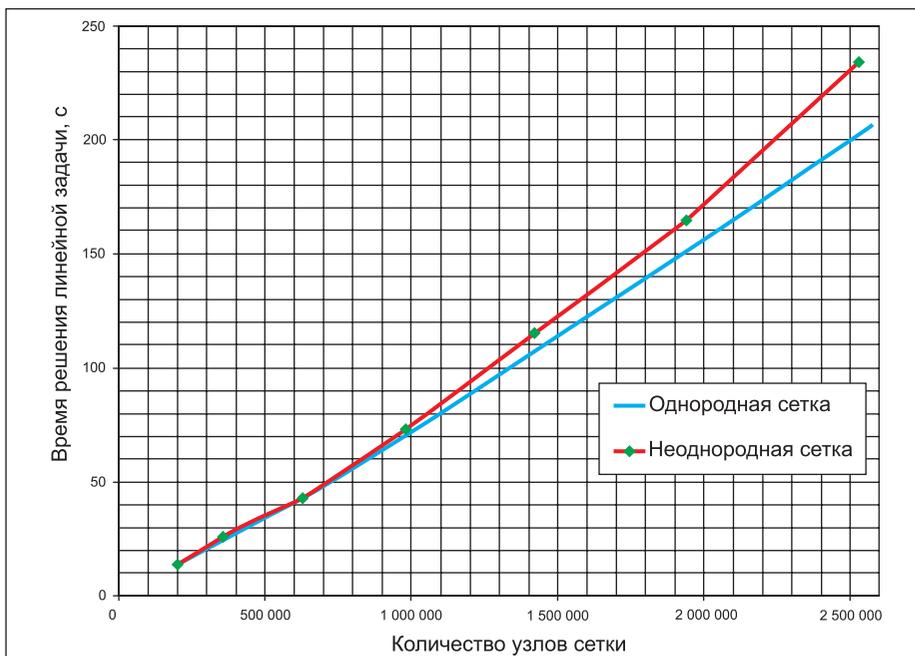


Рис. 5. Зависимость времени решения от размерности задачи

блицы, анимация), вычисляет локальные и интегральные значения. Интегрирование может выполняться вдоль кривой, по поверхности или по объему.

- Результаты могут быть экспортированы в сторонние программы (Excel, MATLAB, Garfield и др.).

Квазистатические расчеты и радиочастоты

Хорошо известно, что одни и те же системы проводников и диэлектриков могут рассматриваться как квазистационарные или как волновые в зависимости от электрической длины объекта — отношения характерного размера L к характерной длине волны λ . Если $L \ll \lambda$, устройство адекватно описывается квазистационарным приближением, как это принято в ELCUT. Когда размер модели намного больше длины волны ($L \gg \lambda$), подходящим видом анализа будут волновые уравнения электромагнитного поля или уравнения волновой оптики (этот вид анализа лежит за пределами ELCUT). Граница между стационарным и волновым диапазоном не является четкой. Это, скорее, некоторая протяженная серая зона, где в разных приближениях применимы и должны взаимодействовать оба описанных подхода (рис. 6).

Одним из примеров, когда для радиочастотных устройств полезно использовать квазистационарные методы расчета электромагнитного поля, являются линии передачи, использующиеся на уровне печатной платы или на уровне микросхемы. Статические или квазистационарные расчеты проводятся в поперечном сечении линии передачи, в предположении, что мода колебаний заранее известна. Так, расчет электростатического поля в поперечном сечении линии передачи позволяет вычислить не только емкость, но также характеристический импеданс и скорость распространения электромагнитной волны. Объектом расчета может быть полосковая или микрополосковая линия, копланарный волновод, щелевая линия — четная или нечетная, дифференциальная пара либо любая пространственная комбинация проводников и диэлектрических слоев.

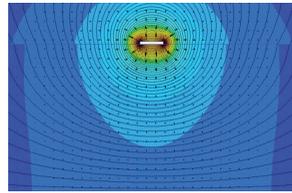
Замена электростатического анализа на модель электрического поля в неидеальном диэлектрике в частотной области позволяет, помимо импеданса и времени задержки, оценить также диэлектрические потери. Если имеется информация о зависимости свойств диэлектрика от частоты, то может быть оценена также дисперсия импеданса и задержки в нужном диапазоне частот (рис. 7).

Анализ магнитного поля в частотной области позволяет определить индуктивность линии или системы проводников с полным учетом скин-эффекта и эффекта близости (рис. 8). Другим результатом анализа магнитного поля является точное знание потерь в проводниках с учетом реального распре-

Квазистатическая формулировка

Квазистационарное решение:

- * Взаимная индуктивность
- * Скин-эффект, эффект близости
- * Собственная и взаимная ёмкость
- * Потери в проводнике и диэлектрике



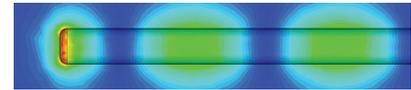
$L < \lambda/100$

ELCUT

Волновая формулировка

Волновое решение:

- * Близкая и дальняя зона
- * Отражение, рассеяние
- * Граничные условия рассеяния
- * Моды колебаний, собственные частоты



$L > 10\lambda$

Другие программы

Рис. 6. Соотношение между волновой и квазистатической формулировками

деления плотности тока по сечению. Серия расчетов в диапазоне частот даст картину дисперсии индуктивности и потерь.

Учет технологических факторов

Важно подчеркнуть, что геометрия расчетной области задачи в поперечном сечении линии передачи не ограничена каноническими формами. Проф. Л. Н. Кечиев (МИЭМ) [14] со своими аспирантами выполнили с помощью ELCUT широкий спектр исследований анализа влияния технологических факторов на параметры микрополосковой линии, а именно: несколько слоев диэлектрика (печатная плата, паяльная маска, влагозащитное покрытие, заливочный компаунд), а также учет реальной (трапециевидной) формы печатного проводника вследствие подтравы (рис. 9).

Независимость технологии расчета от predetermined геометрии линии позволяет рассчитывать параметры линии с нестандартной геометрией, определять потери в диэлектриках и проводниках, находить частотную зависимость параметров линии, учитывать влияние ферритовых и иных магнитных материалов.

Электромагнитная связь проводников

Электрическая и магнитная двумерные модели поля в поперечном сечении могут учитывать не только единственный сигнальный проводник, как в обычных линиях передачи, но и системы из многих проводников. Важно подчеркнуть, что мода колебаний должна быть известна заранее, поскольку для квазистационарных расчетов она входит в число исходных данных: для электрического поля это потенциалы проводников, а для магнитного поля — полный ток каждого проводника.

В системе из нескольких проводников параметры линии приобретают матричную

форму: матрица частичных емкостей и матрица собственных и взаимных индуктивностей. ELCUT оснащен надстройкой CMatrix для автоматического вычисления матрицы частичных емкостей системы многих проводников (рис. 10).

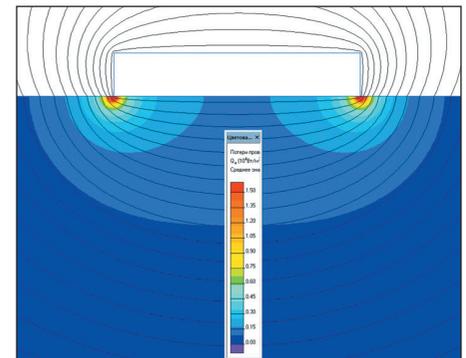


Рис. 7. Электрическое поле с учетом потерь в диэлектрике

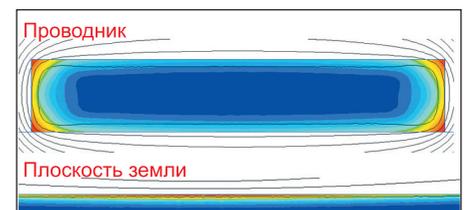


Рис. 8. Магнитное поле с учетом эффектов вытеснения и близости

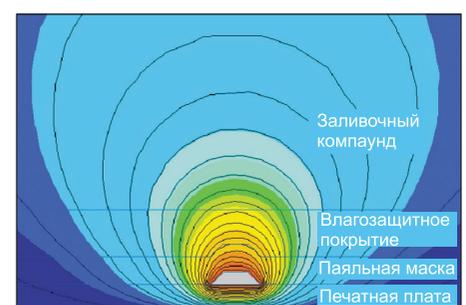


Рис. 9. Учет влияния технологических факторов на электромагнитные параметры (с разрешения проф. Л. Н. Кечиева, МИЭМ)

Настройка автоматически идентифицирует проводники, входящие в систему (включая линейные и точечные проводники), предоставляет пользователю графический интерфейс для заземления части проводников, определяет необходимое количество полевых задач для решения, автоматически формирует и решает необходимые задачи. Результатом решения каждой задачи, в которой ненулевой потенциал присвоен одному проводнику или паре проводников, является полная энергия электрического поля. Сформированная матрица энергии обращается с целью получения матрицы коэффициентов электростатической индукции или эквивалентной ей, но более удобной матрицы собственных и взаимных частичных емкостей.

Аналогичные вычисления могут быть выполнены относительно задачи расчета магнитного поля с целью вычисления матрицы собственных и взаимных частичных индуктивностей.

Выводы

ELCUT на сегодня является зрелым «коробочным» продуктом, пригодным для использования в разных отраслях инженерной, исследовательской и академической деятельности [8].

Для задач электроники, в частности двумерного расчета поля линий передачи в поперечном сечении, прямо «из коробки» ELCUT способен:

- вычислять волновое сопротивление линий передачи с неограниченным разнообразием формы, размеров и расположения проводников и диэлектриков, при условии, что заранее известна мода колебаний;
- вычислять потери в диэлектрике и в проводниках с учетом скин-эффекта и поверхностного эффекта;
- вычислять индуктивность проводников на переменном токе;
- вычислять матрицы частичных емкостей и частичных индуктивностей системы из нескольких проводников;
- оценивать тепловое состояние элементов в 2D- и 3D-моделях при задании условий конвективного теплообмена;
- проводить оптимизационный и статистический анализ.

Помимо развитого графического интерфейса, ELCUT предоставляет опытным пользователям и разработчикам программный интерфейс для широкого круга задач автоматизации: от написания простых скриптов для выполнения рутинных операций до интеграции ELCUT в существующий многопрограммный поток проектирования радиоэлектронной аппаратуры.

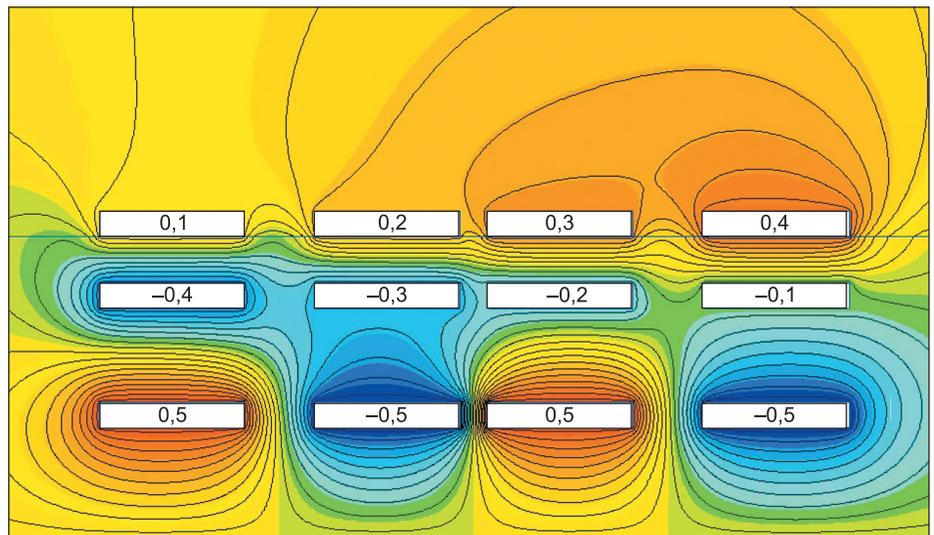


Рис. 10. Электрическое поле системы нескольких проводников

Программный интерфейс, называемый ActiveField, выполнен по технологии COM/ActiveX. Он содержит сотни объектов, методов и свойств, которыми можно пользоваться из большинства современных языков программирования на платформе Windows в одномашинной и многомашинной конфигурациях, а также из прикладных пакетов (MS Office, MATLAB и пр.).

На сайте программы представлены в свободном доступе пользовательская документация, а также обширный набор инструкций, видеоматериалов, записанных семинаров и технических статей по применению ELCUT в различных отраслях индустрии. ■

Литература

1. www.elcut.ru
2. Е. Э. Мазин, С. Д. Дубицкий, В. Г. Поднос, А. С. Любимцев. ELCUT 6.3. Руководство пользователя. CreateSpace Independent Publishing Platform. 2017.
3. Дубицкий С. Д., Поднос В. П. ELCUT — инженерная система моделирования двумерных физических полей // CADmaster. 2001. № 1.
4. С. Д. Дубицкий. ELCUT — конечно-элементный анализ низкочастотного электромагнитного поля // EDA Express. 2005. № 12.
5. С. Д. Дубицкий. ELCUT 5.1 — платформа разработки приложений анализа полей // Exponenta Pro. Математика в приложениях. 2004. № 1(5).
6. Бутырин П. А., Дубицкий С. Д., Коровкин Н. В. Использование компьютерного моделирования в преподавании теории электромагнитного поля // Электричество. 2014. № 10.

7. Затонов И. А. Применение программного пакета Elcut для подбора параметров магнитного поля бетатрона // Инженерия для освоения космоса: сб. научных трудов IV Всероссийского молодежного форума с международным участием. Томск, 12–14 апреля 2016.
8. Использование компьютерного моделирования и численных расчетов для решения инженерных задач // Сб. статей. СПб.: Любавич, 2015.
9. Коняев А. Ю., Назаров С. Л., Якушев Н. С. Оценка электромагнитных усилий, определяющих поведение немагнитных проводящих тел, в электродинамических сепараторах // Актуальные проблемы энергосберегающих электротехнологий АПЭЭТ-2014. Екатеринбург. 2014.
10. Рыбаков М. М. Факторы, влияющие на теплотеплопередачу через узел оконного откоса // Интернет-журнал «Науковедение». 2016. Т. 8. № 2.
11. Грешняков Г., Дубицкий С. Численная оценка токовой нагрузки XLPE кабельной системы // Силовая электроника. 2013. № 3.
12. Гуревич Э. И. и др. О применении нестационарных методов определения теплопроводности корпусной изоляции обмоток электрических машин // Электричество. 2011. № 6.
13. Сахно Л. И., Сахно О. И., Дубицкий С. Д., Вальков В. В., Зарываев Р. Г. Использование метода конечных элементов для комплексного расчета трансформаторов машин контактной сварки // Сварочное производство. 2016. № 1(974).
14. Кечиев Л. Н., Соловьев А. В. Методика анализа влияния технологических факторов печатных плат на их электрофизические параметры // Технологии приборостроения. 2006. № 1.

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

Андреас НАДЛЕР (Andreas NADLER)
Кем COM (Cem SOM)

Перевод, дополнения и комментарии:
Владимир РЕНТЮК

В предыдущей части публикации были рассмотрены принципы беспроводной передачи энергии и базовое схемотехническое решение. Во второй части мы сосредоточим внимание на проблемах, связанных с электромагнитными помехами (ЭМП), и вытекающих из этого вопросах соответствия устройств беспроводной передачи энергии большой мощности, которые работают в условиях индустриальной среды, требованиям по электромагнитной совместимости (ЭМС).

Поскольку энергия питания передается одновременно с функционированием приложений в режиме передачи данных по беспроводной сети, то соблюдение допустимых уровней ЭМП требует внимательности и ответственного отношения. Проблема в том, что катушки передатчика и приемника ведут себя как трансформатор с малым коэффициентом связи и очень большим воздушным зазором. Это приводит к достаточно большому уровню электромагнитного поля вблизи катушек. Измерения в части выполнения требований по ЭМС показали, что широкополосные помехи могут возникать в спектре основной волны вплоть до частот порядка 80 МГц. Если уровень помех измеряется ниже установленного предела с хорошим запасом, то можно предположить, что требования по напряженности поля радиопомех также будут соблюдаться.

В общем, при разработке устройств беспроводной передачи мощности выполнение требований стандарта EN55022 для Класса В может представлять собой проблему, сложность решения которой нельзя недооценивать. Пример результата измерения уровня кондуктивных ЭМП приведен на рис. 1.

Магнитное поле H (dI/dt) может создать индуктивную связь и, следовательно, навести ток помехи на соседние проводящие дорожки. Обычно для борьбы с этим явлением полезно максимально разнести такие цепи или использовать ферритовые гибкие материалы, например WE-FSFS [4], подробно об этом материале и вопросах применения магнитного экранирования, в том числе и для беспроводных зарядных устройств, написано в [5].

В отличие от магнитного электрическое поле E (dV/dt) имеет емкостную связь с «зем-

лей». Это можно наблюдать при измерении напряжения помех или напряженности поля. Вот почему такие источники синфазных помех необходимо подавлять как в низкочастотном (килогерцевом), так в более высокочастотном (мегагерцевом) диапазоне.

Поскольку в рассматриваемых приложениях беспроводной передачи энергии именно электрическое поле E (а точнее, поле рассеяния) является основной причиной проблем ЭМС, то рекомендуется принять следующие меры:

- Для уменьшения вихревых токов под катушкой, особенно если это передатчик, должна быть установлена и ориентирована по направлению к ней перфорированная металлическая пластина. Это может быть, например, медная фольга на печатной плате, подключенная через конденсатор (например, типа WE-CSMH емкостью 1–100 нФ, рассчитанный на рабочее напряжение 2000 В) к заземлению или корпусу схемы. Он накоротко замкнет большую часть электрического поля на источник, и оно уже не будет распространяться через «землю» (общий провод).
- Защитить катушки передатчика и приемника и их цепи возбуждения и приема энергии хорошо экранирующим металлическим и/или поглощающим материалом WE-FAS, WE-FSFS [5].
- Если это допускают уровни токов утечки (они нормируются стандартами по электробезопасности, в частности в медицинском оборудовании [2]), то снизить уровни помех в широком частотном спектре помогут Y-конденсаторы максимальной емкостью $2 \times 4,7$ нФ, например серии WE-CSSA.
- Для фильтрации источников синфазных помех в низкочастотном диапазоне 0,05–5 МГц, в зависимости от рабочего напряжения и тока, могут использоваться синфазные дроссели с компенсацией постоянного тока из следующих серий: WE-CMB, WE-CMBNC, WE-UCF, WE-SL или WE-FC.

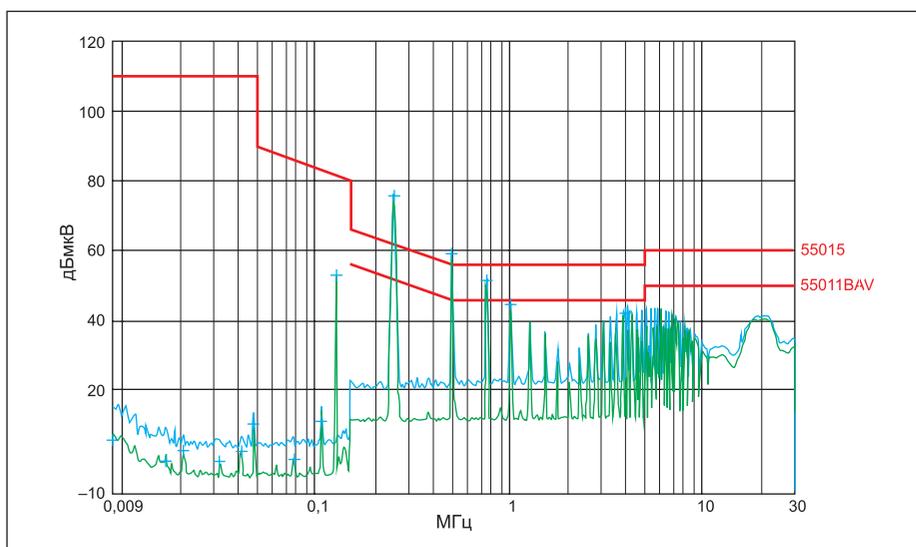


Рис. 1. Пример результата измерения спектра кондуктивных электромагнитных помех в диапазоне частот 9 кГц – 30 МГц, предел по Классу В

- Для фильтрации синфазных помех в более высокочастотном диапазоне 5–100 МГц, в зависимости от рабочего напряжения и тока, могут применяться синфазные дроссели с компенсацией постоянного тока из следующих серий: WE-CMB NiZn, WE-CMBNC, WE-SL5HC или WE-SCC.
- Подавить дифференциальные ЭМП в зависимости от рабочего напряжения помогут X-конденсаторы из следующих серий, которые должны быть подключены между обеими линейными шинами и нейтралью: WE-FTXX или WE-CSGP.
- Поскольку во всей цепи, в зависимости от приложения, протекает очень большой переменный ток, то для соответствия устройства требованиям по ЭМС важно иметь компактную печатную плату с малой собственной индуктивностью проводников. Компоненты силовой цепи и колебательного контура должны быть расположены максимально близко друг к другу и подключаться проводниками с малой собственной индуктивностью. Для этого необходимо оптимально использовать «заливку» свободных областей с применением обычных полигонов.

Пример решения по выполнению требований ЭМС с использованием X- и Y-конденсаторов приведен на рис. 2, а пример конструктивного решения, когда ввиду специфики устройства нельзя использовать Y-конденсатор с подключением на «землю», скажем, в медицинских устройствах, носимой аппаратуре и в оборудовании для работы в потенциально взрывоопасной среде, показан на рис. 3.

Как правило, во время проведения ОКР необходимо измерять уровни ЭМП на всех этапах проектирования, начиная с прототипа. Для этого рекомендуется заключить договор и поручить выполнять измерения компетентной лаборатории, профессионально занимающейся вопросами ЭМС. Внесение изменений в массовом производстве всегда связано с более высокими материальными затратами [3].

Кроме того, следует учитывать, что требования национальных стандартов могут отличаться, поэтому если конечный продукт будет продаваться в разных странах, то для ускорения процесса разработки и вывода изделия на рынок необходимо заранее учитывать регламенты стандартов и допустимые полосы частот для каждой страны.

Передающие и приемные катушки: особенности выбора

Для того чтобы найти подходящую беспроводную катушку для системы беспроводной передачи энергии, необходимо обратить внимание на следующие вопросы:

- Насколько высок ожидаемый максимальный ток в катушке (реактивный и номинальный ток)?
- Каковы максимально допустимые размеры корпуса устройства (длина, высота и ширина)?

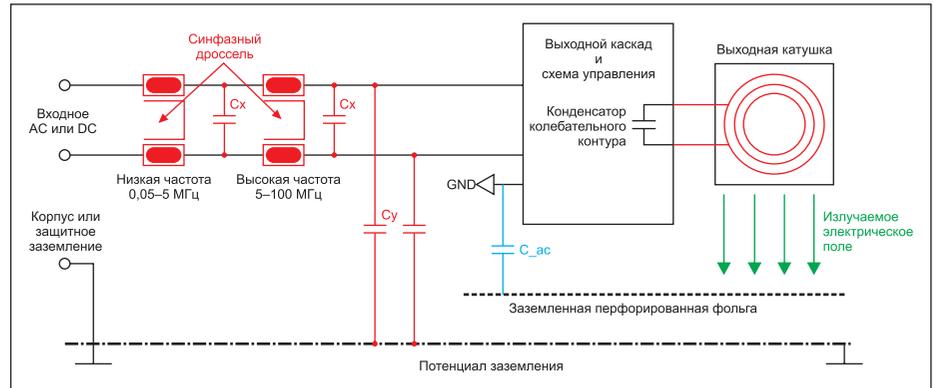


Рис. 2. Предлагаемое общее решение по снижению уровня синфазных и дифференциальных помех

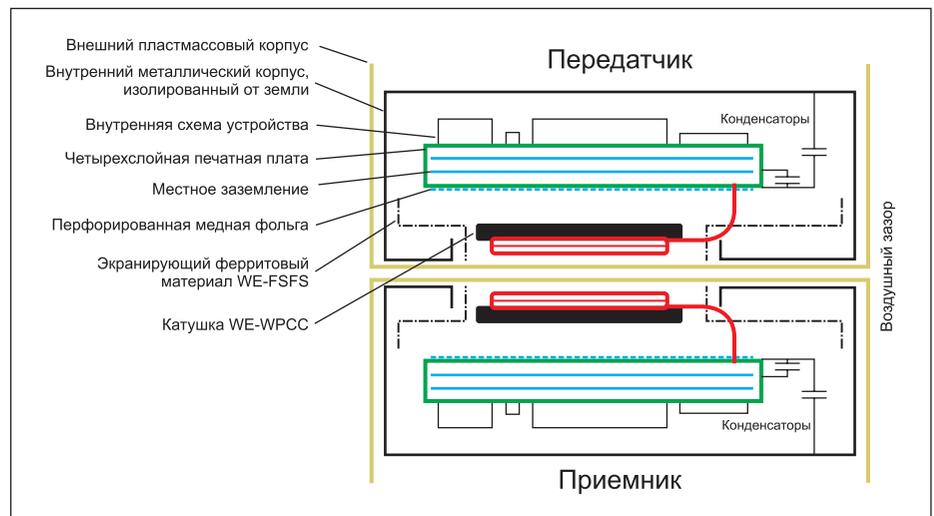


Рис. 3. Пример решения, когда из-за ограничения по току утечки или ввиду специфики устройства нельзя использовать Y-конденсатор

Во избежание нежелательного насыщения или перегрева у катушек всегда должен быть запланирован некий запас, обычно на уровне 30% от расчетного номинального рабочего тока. Если можно использовать несколько вариантов катушек, предпочтение следует отдавать тем катушкам, которые имеют наименьшую индуктивность, поскольку в этом случае конденсатор колебательного контура может быть меньше. Кроме того, такой подход сокращает уровень реактивных токов, возникающих в колебательном контуре. Меньшие токи в контуре приводят к снижению самонагрева и улучшению свойств в части ЭМС.

Максимальный ток в колебательном контуре равен: $I_{\max} = \pi U_{in} \sqrt{C/L}$, где U_{in} — напряжение на контуре.

Лучший коэффициент связи достигается тогда, когда катушки передатчика и приемника имеют одинаковые геометрические размеры, поэтому здесь рекомендуются катушки с соотношением размеров 1:1. Компоненты семейства WE-WPCC, например 760308102142 (53×53 мм), 760308100143 (Ø50 мм), 760308100110 (Ø50 мм), были специально разработаны для устройств высокой мощности. Эти катушки могут использо-

ваться в качестве передатчиков и приемников. Они характеризуются весьма низкими значениями сопротивления по постоянному току R_{dc} и очень высокими значениями добротности Q и очень высокими токами насыщения I_R .

Конденсатор колебательного контура: особенности выбора

Поскольку в параллельном колебательном контуре, как известно из теории, циркулируют большие токи, то при выборе типа используемых в нем конденсаторов подходит далеко не любая технология. В зависимости от приложения пригодны только три типа конденсаторов: МКП (например, WEFTXX и WE-FTBP), с диэлектриком NP0 (в частности, WE-CSGP) или ФКР. В связи с их низким уровнем собственных потерь данные типы конденсаторов способны выдерживать высокие переменные токи без перегрева. Однако в зависимости от мощности резонансного преобразователя, для того чтобы уменьшить нагрев, применяют разделение токов, которое достигается параллельным включением нескольких конденсаторов. Здесь следует тщательно следить за тем, чтобы ни один

из конденсаторов не нагревался до температуры, превышающей 85 °С. Именно по этой причине конденсаторы с более высокими потерями (особенно следует оценивать уровень диэлектрических потерь) X7R, X5R, MKS и т. д. не подходят для колебательных контуров в резонансных преобразователях. Принимая во внимание размер корпуса, общие затраты и минимально возможный реактивный ток в резонансной контуре, необходимо выбрать максимально низкую емкость конденсатора. Предельными факторами здесь являются максимальная рабочая частота преобразователя, индуктивность катушки передатчика и приемника. Номинальное рабочее напряжение конденсатора должно быть не менее πV_{in} плюс дополнительный запас в 20%. Также следует учитывать, что максимально допустимое среднеквадратичное напряжение переменного тока $V_{AC_{rms}}$ для конденсаторов типа МКР заметно падает на частотах выше 5 кГц.

Коэффициент потерь конденсатора в процентах определяется как: $DF = 2\pi f \times ESR_{cap} \times C \times 100\%$.

Индуктивности фильтра: особенности выбора

Колебательный контур с его переменным током отделяют от источника питания две катушки индуктивности (дроссели). Через них подается напряжение от источника питания постоянного тока, при этом они играют роль фильтрующих элементов. Дроссели следует выбирать исходя из максимально возможного номинального тока конкретной схемы. Здесь должен использоваться классический силовой дроссель (например, WE-HCI, WE-PD, WE-LHMI) с воздушным зазором и высокой добротностью. Его номинальная индуктивность должна быть как минимум в 5 раз выше индуктивности катушки колебательного контура. Это требуется для того, чтобы поставить в колебательный контур достаточную энергию. Если пульсация входного (для передатчика) или выходного (для приемника) напряжения все еще слишком высока, то номинальные значения индуктивности дросселя или емкость конденсатора фильтра могут быть увеличены. В качестве альтернативы, для достижения низких уровней пульсаций, можно уменьшить ESR фильтрующих компонентов. Кроме того, более эффективными здесь будут SMD-дроссели (WE-HCF или WE-HCI), преимущество которых заключается в том, что они имеют меньшие потери на больших токах (как постоянных, так и переменных). Поскольку эти дроссели должны постоянно подавать большой переменный ток в колебательный контур, их нагрев происходит из-за наличия гистерезиса и потерь из-за вихревых токов в материале сердечника. Требуемое значение индуктивности дросселя напрямую связано с емкостью фильтрующего конденсатора.

Добротность дросселя Q определяется как: $Q_L = X_L/R_{dk}$.

К вопросу выбора МОП-транзисторов

Выбор подходящего N -канального МОП-транзистора в основном зависит от уровня напряжения питания. Если это лишь 5 В, то для надежного управления может, например, использоваться транзистор с логическими уровнями управления по затвору. Поскольку большинство мощных МОП-транзисторов имеют максимально допустимое напряжение затвор/исток ± 20 В, то при использовании напряжения питания выше 20 В необходимо принять меры для защиты затвора. Это может быть, скажем, стабилитрон, включенный с затвора на общий провод, или емкостный делитель напряжения, который удержит напряжение затвора в оптимальном диапазоне. Следует также обратить внимание на то, чтобы напряжение на затворе не было слишком низким, поскольку в таком случае МОП-транзистор резонансного преобразователя может оказаться в режиме линейного усилителя, в результате чего схема перестанет функционировать.

Такой режим, когда транзистор окажется в активной области своей вольт-амперной характеристики, как правило, приводит к перегреву одного из двух МОП-транзисторов. Кроме того, необходимо соблюдать осторожность, чтобы предотвратить превышение напряжения с учетом увеличения напряжения на множитель π . Так, при напряжении питания 20 В МОП-транзисторы должны выдерживать напряжение исток/сток не менее 63 В. В этом случае следует использовать 100-В транзисторы. Эффективность (КПД) схемы в значительной степени зависит от того, насколько высоки сопротивление канала транзисторов в открытом состоянии $R_{ds,on}$ и требования по заряду затвора (имеется в виду общий заряд затвора) выбранных МОП-транзисторов. Здесь нужно найти компромисс, поскольку МОП-транзисторы с низким $R_{ds,on}$ обычно имеют более высокую емкость затвора и, следовательно, требуется высокий общий заряд затвора.

Ток заряда/разряда по затвору МОП-транзистора: $I_{gate} = C_{gate} \times (\Delta V_{gate} / \Delta t_{sw})$, где C_{gate} — емкость затвора транзистора; ΔV_{gate} — управляющее напряжение на затворе; Δt_{sw} — длительность импульса.

При этом коммутационные потери равны: $P_V = I^2 d \times R_{ds,on}$, где I_d — ток стока.

Диоды и схема подтяжки

Поскольку МОП-транзисторы необходимо переключать относительно быстро, то в результате появляются связанные с быстрым переключением токи на уровне ампер как следствие заряда и разряда емкости затвора. Такие зарядно-разрядные токи

должны поступать через резисторы подтяжки и диоды. Возникающие при этом потери не столь уж малы. Вот почему необходимо принять меры по оптимизации максимально допустимых потерь мощности (P_V), при этом учитывать и токовую нагрузку компонентов в цепи управления затвором. Аналогично защитные диоды транзисторов должны иметь такое же максимально допустимое обратное напряжение, как и МОП-транзисторы. В качестве альтернативы классическим диодам или диодам Шоттки можно использовать диоды, которые имеются в корпусах МОП-транзисторов. В зависимости от типа они способны выдерживать большие нагрузки, сохранять свои характеристики при более высокой температуре, чем та, что обычно указана в спецификации на транзистор. Не следует недооценивать и потери обратного восстановления, их тоже следует учитывать.

Потери мощности в цепи управления затвором: $P_V = (U_{diode} \times I) + (I^2 \times R_{pull-up})$, где U_{diode} — падение напряжения на диоде; $R_{pull-up}$ — номинальное сопротивление резистора подтяжки.

Входной и выходной конденсаторы: особенности выбора

Входные и выходные конденсаторы в сочетании с дросселями служат в основном как элементы входного и выходного фильтров. Поскольку резонансные частоты в системе беспроводной передачи энергии находятся ниже 200 кГц, то конденсаторы должны быть рассчитаны на более высокие рабочие частоты. Проведенные испытания показали, что значения их номинальных емкостей в зависимости от конкретных решений системы и индуктивности дросселей могут принадлежать к диапазону 10–1000 мкФ. Частота среза по уровню -6 дБ такого LC-фильтра должна составлять около 1/10 от частоты колебательного контура системы. При этом ее ослабление теоретически ожидается с коэффициентом 40 дБ/декада. Принимая во внимание неидеальность реальных компонентов фильтра, на практике следует ожидать уровень затухания 30 дБ/декада. В зависимости от используемого типа дросселя на текущий через него постоянный ток может быть наложен значительный компонент переменного тока. Если этот ток слишком высок, то для работы на больших токах пульсаций вместо обычного алюминиевого электролитического конденсатора лучше использовать полимерный электролитический конденсатор, выдерживающий большие токи переменной составляющей. Полимерные и керамические конденсаторы с присущим им низким ESR также обеспечивают возможность значительного уменьшения амплитуды пульсации отраженного напряжения. Меньшая пульсация напряжения означает, что при измерении помех, влияющих на ЭМС, их уровень бу-

дет ниже. Наилучший результат достигается при использовании параллельного соединения алюминиевых электролитных конденсаторов и полимерных или керамических конденсаторов, например WCAP-PTHF или WCAP-PSLC.

Частота среза входного/выходного фильтра

$$f_{-6\text{дБ}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}},$$

где L — индуктивность дросселя фильтра; C — емкость конденсатора или суммарная емкость всех конденсаторов фильтра.

Падение напряжения (напряжение пульсаций) на конденсаторе фильтра: $U_{\text{ripple}} = \text{ESR} \times I_{\text{AC}}$ где ESR — эквивалентное сопротивление конденсатора или суммарное эквивалентное сопротивление всех конденсаторов фильтра; I_{AC} — переменная составляющая тока.

Возможные проблемы, которые необходимо учитывать при разработке резонансного преобразователя

На практике, если вы остановили свой выбор на предлагаемой топологии схемы, основа которой, несомненно, удобной для использования генератор Ройера, вам обязательно необходимо рассмотреть два момента, связанных с тем, чтобы исключить защелкивание МОП-транзисторов.

1. Требования к источнику питания передатчика в момент включения системы беспроводной передачи мощности

Если источник питания не в состоянии обеспечить достаточный пусковой ток во время переходного процесса при включении, произойдет просадка напряжения и может случиться так, что один из двух МОП-транзисторов начнет зависать в режиме линейного усиления, а через напряжение питания постоянно закорачиваться на «землю», что способно привести к перегреву МОП-транзистора и, как следствие, к его выходу из строя. Следует также обратить внимание на то, чтобы конденсатор входного фильтра не имел чрезмерного номинала, поскольку это может еще больше усугубить эффект «защелкивания», ведь блок питания, кроме пускового тока для генератора, должен будет зарядить и этот конденсатор.

На практике подобного негативного эффекта удастся избежать, подключив конденсаторы и резонансный контур к рабочему напряжению еще до остальной части схемы. Затем затворы МОП-транзисторов можно переключать с помощью оптопар или транзисторов. Затворами также управляют и через отдельный источник питающего напряжения, например уже упомянутый модуль серии MagI³C, его включение от основного источника питания выполняется с некоторой задержкой.

2. Импеданс, отраженный от стороны приемника к передатчику

С учетом больших скачков нагрузки на стороне приемника и вполне реальных внезапных изменений коэффициентов связи катушек может случиться так, что частично отраженный импеданс на коротко замыкает индуктивность намагничивания со стороны передатчика. Это, в свою очередь, приводит к срыву колебаний, а схема «защелкивается».

Коэффициент связи можно определить как:

$$k = \frac{U_{\text{sec}}}{\pi U_{\text{pri}}} \times \frac{N_{\text{pri}}}{N_{\text{sec}}} = \frac{M}{\sqrt{L_{\text{pri}} \times L_{\text{sec}}}},$$

где U_{sec} — напряжение на вторичной обмотке; U_{pri} — напряжение на первичной обмотке; N_{pri} — число витков первичной обмотки; N_{sec} — число витков вторичной обмотки; L_{pri} — индуктивность первичной обмотки; L_{sec} — индуктивность вторичной обмотки.

M — коэффициент взаимной индукции определяется как:

$$M = k \sqrt{L_{\text{pri}} \times L_{\text{sec}}}.$$

Для противодействия этому негативному эффекту полезно слегка отстроить частоту резонансного контура приемника при помощи подключения дополнительного параллельного конденсатора так, чтобы резонансная частота самого контура приемника была на 10–20% выше частоты контура передатчика. Альтернативно, параллельно катушке передатчика, может быть подсоединена дополнительная индуктивность (дроссель), причем так, чтобы не возникло магнитной связи с каналом передачи энергии. Эта параллельная индуктивность должна быть равна или меньше индуктивности намагничивания катушки передатчика. Дроссель сохраняет энергию во время ZVS-процесса и помогает поддерживать колебания в случае неблагоприятных пере-

ходных процессов, связанных с изменением нагрузки.

Отраженный импеданс с параллельной компенсацией:

$$Z_{\text{re}} = \frac{(2\pi f)^2 \times M^2}{L_{\text{sec}}} \times \left(\frac{R_{\text{load}}}{2\pi f \times L_{\text{sec}}} - j \right),$$

где f — частота; R_{load} — сопротивление нагрузки.

Резонансный конденсаторный приемник:

$$C_{\text{sec}} = \frac{1}{L_{\text{sec}} \times \sqrt{1 - k^2} \times (2\pi f)^2}.$$

Дополнительная компенсирующая емкость приемника:

$$C_{\text{comp}} = \frac{1}{(2\pi f)^2 \times L_{\text{pri}} \times \sqrt{1 - k^2}}.$$

На первом этапе, еще при создании прототипа, важно насколько это возможно проверить все ситуации, связанные с изменением нагрузки, что критично для обеспечения надежной конструкции с надлежащей функциональностью.

Оптимизация окружающей среды катушек WPT

Если катушки WPT закреплены на металле, то в этом случае могут возникать индуктивные потери из-за индуцированных вихревых токов, вызванных магнитным полем рассеяния. Кроме того, металл, например медь на печатных платах, способен нагреваться. Мощные магнитные поля рассеяния также могут оказывать непреднамеренное влияние на электронные компоненты схемы. Этот эффект будет увеличиваться при разное катушке WPT.

Меры предупреждения предполагают максимальное удаление излучающей катушки от элементов печатной платы и металлических частей от катушек, а также использование гибких ферритовых материалов с высо-

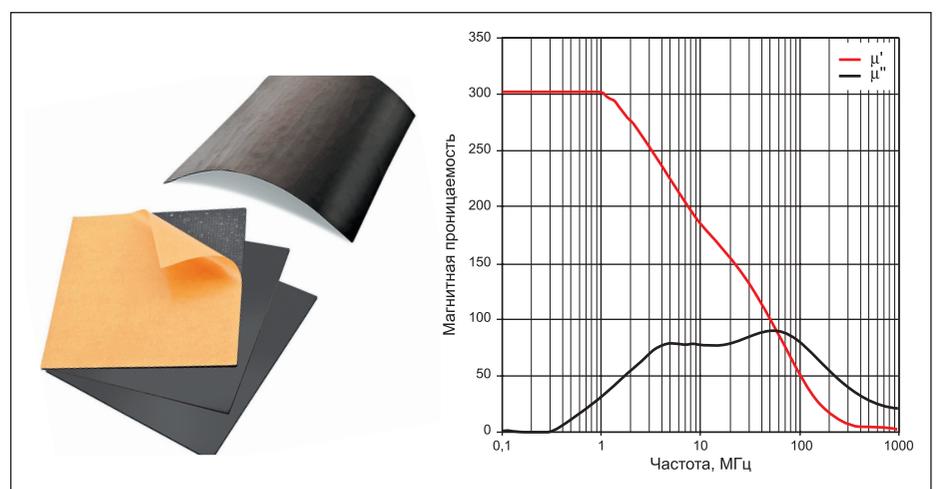


Рис. 4. Внешний вид и зависимость относительной магнитной проницаемости гибкого ферритового материала типа WE-FSFS

кой магнитной проницаемостью, таких как WE-FSFS [4] (код заказа 374006), что позволит сфокусировать магнитный поток в заданном направлении и не превращать его в ненужное тепло. Для рассматриваемого материала на рис. 4 приведены графики поведения действительной и реактивной составляющих относительной магнитной проницаемости.

Здесь μ' — это действительная часть, μ'' — реактивная, или мнимая, часть, описывающая зависящие от частоты потери либо, как их называют, потери на гистерезис. Данные потери приводят к разогреву материала и ухудшению его магнитных свойств, более подробно об этом написано в [5].

Пример решения

Примеры решений, которые рассматривались в рамках настоящей статьи, приведены в [1]. На рис. 5 дан пример обратной схемы, которая может использоваться как передатчик и приемник для беспроводных систем передачи энергии мощностью 100 Вт. **(Внимание! В схеме присутствуют напряжения, опасные для прикосновения.)**

Преимущество схемы, предлагаемой на рис. 5, состоит в том, что здесь требуется только одна катушка фильтра. Центральный отвод увеличивает частоту колебаний в два раза, а уровень пульсаций входного/выходного напряжения становится меньше. Это позволяет использовать менее габаритные дроссели в фильтрах. Кроме того, благодаря наличию двух перекрывающихся катушек снижаются требования по точности сопряжения катушек передающей и приемной стороны. Дополнительное напряжение 8–10 В можно получить из основного рабочего напряжения посредством малоомощного линейного стабилизатора или стабилизатора компании Würth Elektronik (код заказа: 171012401). Транзисторы M3 и M4, выполняющие роль диодов, могут быть заменены быстрыми 1-А диодами Шоттки с номинальным обратным напряжением 100 В.

Если для запитки подтягивающих резисторов применить более низкое напряжение от вспомогательного источника, то удастся сократить потери мощности. В качестве конденсаторов C5 и C6 могут быть использованы конденсаторы номинальной емкостью 1 нФ, рассчитанные на рабочее напряжение 50 В, с ТКЕ NP0. Они необходимы для формирования крутых фронтов при переключении транзисторов M1 и M2. Конструктивное исполнение данной схемы приведено на рис. 6.

Заключение

Предложенный вниманию читателей резонансный преобразователь представляет собой очень гибкое решение, которое легко адаптируется к условиям работы самых разнообразных приложений. Он может обеспечить наиболее эффективную беспроводную передачу энергии до нескольких сотен ватт. Если для

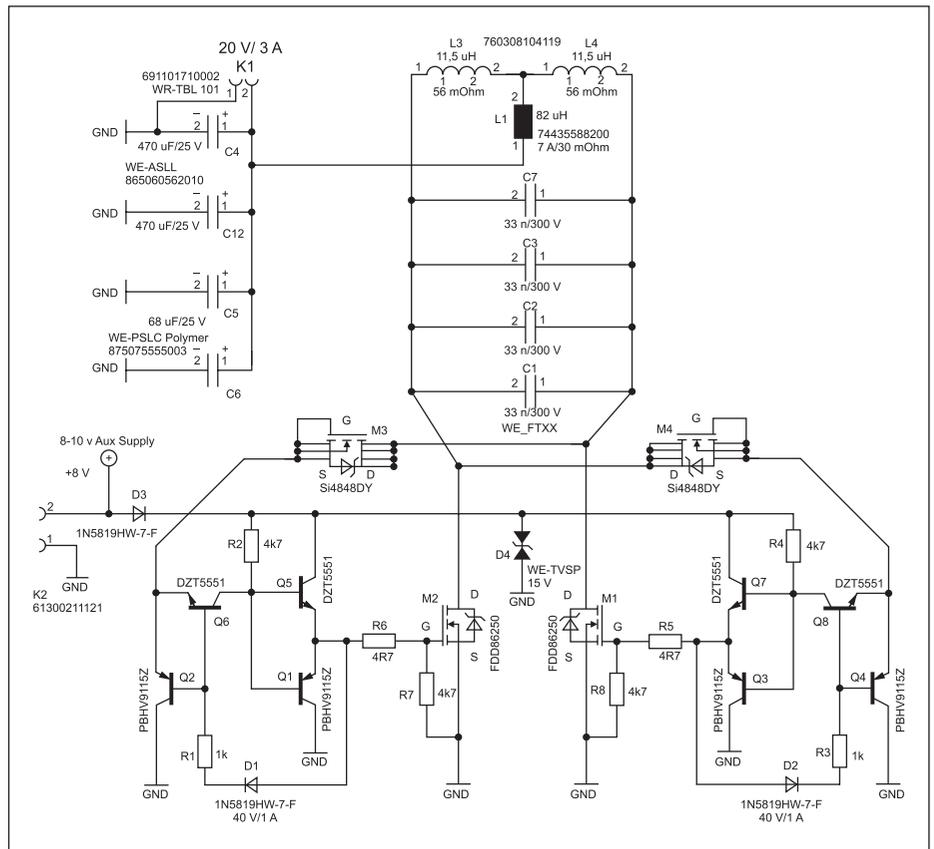


Рис. 5. Резонансный преобразователь для катушек со средним отводом, который можно использовать на стороне передатчика и на стороне приемника. Изображение взято из [1]

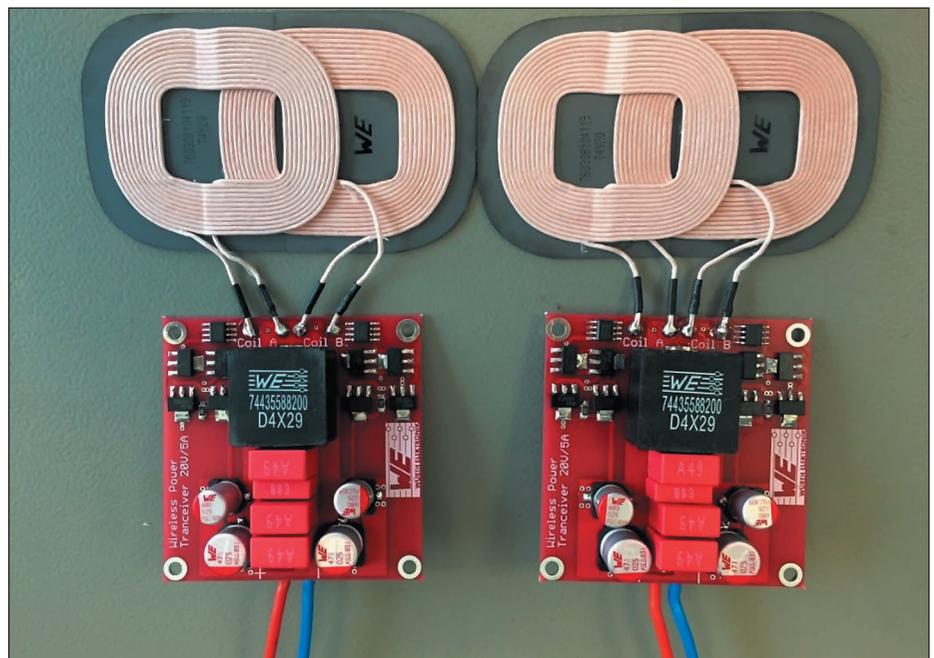


Рис. 6. Пример конструкции передатчика/приемника, схема которого приведена на рис. 5, с катушками 760308 104119, выполненными на одном основании

конкретного приложения необходимо ужесточить требования по безопасности (в частности, отсутствие электрической искры при включении/выключении, обнаружение состояния передачи энергии, например при заряде аккумуляторной батареи и т. д.), то предпо-

читительным окажется именно представленный вариант. Предложенное в настоящей статье схемотехническое решение может стать основой и легко адаптироваться к специфике проектируемого оборудования. Вместо топологии резонансного преобразователя основой

может служить и классическая мостовая схема с активным регулированием. В любом случае измерения на соответствие требованиям стандартов по ЭМС должны выполняться уже на первых прототипах и на самой ранней стадии разработки.

Высокая эффективность, малые габариты и выполнение требований стандартов в части ЭМС в большей степени зависят от схемы генератора, чем от катушек передатчика и приемника. Помимо широкого ассортимента самой разнообразной продукции, компания Würth Elektronik предлагает удобные в применении, полностью собранные катушки с наивысшими значениями добротности Q , которые благодаря высоким значениям индуктивности позволяют использовать малогабаритные конденсаторы.

На катушки намотан высокочастотный специальный многожильный провод, каждая жила которого покрыта изолирующим лаком — литцендратом (от нем. Litzen — пряди, и Draht — провод). Этот провод создан именно для изготовления высокодобротных катушек индуктивности. Данное кон-

структивное решение позволяет катушкам компании Würth Elektronik работать на большой мощности с низкими потерями на токах частоты преобразования. В сочетании с высококачественными ферритовыми материалами, имеющими высокую магнитную проницаемость, обеспечивается не только максимальная эффективность, но и наилучшие показатели электромагнитной совместимости уже как свойство конечного продукта.

В двух частях настоящей статьи показаны принцип и общее решение устройств беспроводной передачи энергии большой мощности, работающих в условиях индустриальной среды, представлены варианты возможных технических решений, даны рекомендации, приведено перспективное практическое решение. Далее будут рассмотрены аспекты, связанные с электромагнитными помехами (ЭМП), и вытекающие из этого вопросы соответствия представленных устройств требованиям по электромагнитной совместимости. Данная публикация, несомненно, окажется полезной разработчикам систем беспроводной передачи энергии,

причем не только однонаправленных, типа зарядных устройств, но и двунаправленных, когда приемник и передатчик энергии могут меняться местами. ■

Литература

1. Nadler A., Som C. ANP032e — High Power Wireless Power Transfer for the Industrial Environment. 2016-08-09, 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. Что нужно знать об испытаниях по выполнению требований по ЭМС для изделий коммерческого назначения // Компоненты и технологии. 2017. № 7.
4. www.katalog.we-online.de/en/pbs/WE-FSFS
5. Рентюк В. Решение проблемы магнитного экранирования на примере материалов компании Würth Elektronik // Компоненты и технологии. 2015. № 8.

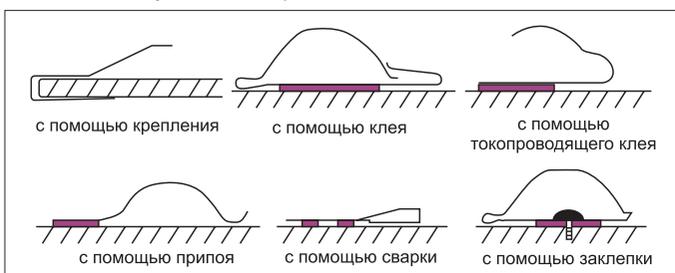
Статья опубликована в журнале «Компоненты и технологии» № 8'2017

Металлические контактные дорожки



Металлические контактные дорожки серии EXF/IDFg изготовлены из тонкой упругой специальным образом формованной металлической ленты (бериллиевая или фосфористая бронза или нержавеющая сталь). В зависимости от типа на дорожки может быть гальванически нанесен никель, олово или золото. Изготавливаются с липким основанием, с клипсовыми зажимами или отверстиями под винт или заклепку. Имеют большой коэффициент подавления ЭМП (не менее 90 дБ на частотах 1–1000 МГц). Контактные дорожки позволяют создать замкнутый контур между различными токопроводящими частями корпуса и увеличить эффективность экранирования.

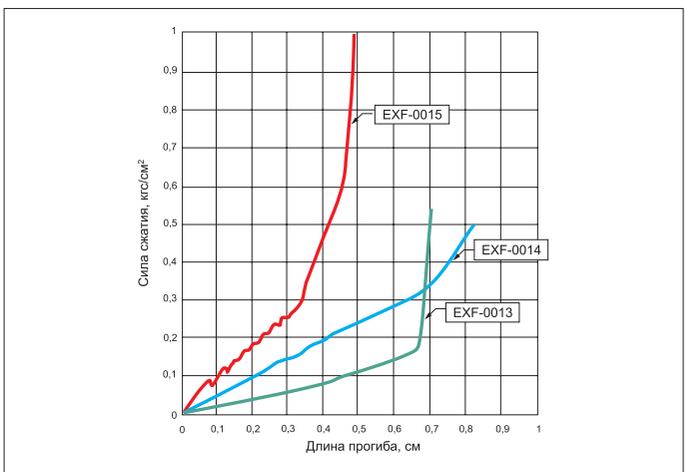
Фиксация дорожки на несущей плоскости



Пример кодировки металлических контактных дорожек: EXF (IDFg)-XXXX-YYYY-ZZZZ, где XXXX — тип дорожки, YYYY — стандартная длина 1 шт. или количество контактов, ZZZZ — покрытие (00: без покрытия; 11: олово; 22: золото; 33: никель).

Физические свойства

- Модуль эластичности (E): $19 \cdot 10^6$ PSI ($131 \cdot 10^3$ МПа)
- Модуль сдвига (G): $7,3 \cdot 10^6$ PSI ($50 \cdot 10^3$ МПа)
- Плотность: $0,302$ lb/in³ ($8,35$ г/см³)
- Удельная проводимость: 22% IACS



- Сопротивление: $7,8$ мОм·см
 - Коэффициент расширения: $9,9 \cdot 10^{-7}$ /°F ($17,8 \cdot 10^{-6}$ /°C)
- Зависимость коэффициента экранирования от усилия сжатия

Спецификация

C17200;
ASTM B194;
QQ-C-553;
SAE J463;
AMS 4530, AMS 4532

Характеристика

- Термообработанный;
- Лучшее формообразование;
- Высокопрочный;
- Наиболее долговечный;
- Хорошая токопроводимость;
- Антимагнитный;
- Низкотемпературный;
- Без внутреннего напряжения.

АО ТЕХНО
105275, г. Москва, ул. Уткина, д. 40
Тел. (495) 735-44-29
<http://www.techno.ru>
e-mail: ywg@techno.ru

Тенденция к миниатюризации: как решить проблемы ЭМС и целостности питания

Стив СЭНДЛЕР (Steve SANDLER)
steve@picotest.com

Перевод, дополнения и комментарии:
Владимир РЕНТЮК

В статье обсуждаются три наиболее распространенные причины возникновения проблем обеспечения целостности питания и связанное с этим выполнение требований в части ЭМС. Также даны рекомендации, как избежать или минимизировать негативные проявления, возникающие из-за нарушений обеспечения целостности питания в проекте.

Введение

Для современной электронной аппаратуры, при одновременном увеличении производительности систем, росте скорости передачи данных и повышении эффективности работы, характерна устойчивая тенденция к постоянной миниатюризации и связанному с ней переходу на элементы в корпусах все меньших типоразмеров и форм-факторов. Более высокая эффективность (в данном контексте подразумевается коэффициент полезного действия) распределенных источников питания часто достигается за счет использования более быстрых кремниевых МОП-транзисторов (MOSFET) или даже превосходящих их скоростных нитрид-галлиевых транзисторов, выполненных по технологии eGaN. Что касается снижения габаритов конечного решения распределенных и смонтированных непосредственно на платах источников питания на основе DC/DC-преобразователей, то уменьшение занимаемой ими площади происходит за счет увеличения частот переключения и замены алюминиевых и танталовых конденсаторов меньшими по габаритам керамическими многослойными конденсаторами (MLCC).

Одним из результатов тенденции к миниатюризации является то, что в этом случае разработчики сталкиваются с большей взаимосвязью между такими разными и, на первый взгляд, несвязанными проблемами. Речь идет о поддержании требований по уровню собственных электромагнитных помех (ЭМП) и соблюдении норм по электромагнитной совместимости (ЭМС), а также об обеспечении целостности передачи сигналов (signal integrity, SI) и подачи питания (в англ. терминологии — power integrity, PI). Последнее еще не получило точного определения в русскоязычной технической литературе, но подразумевает достижение соответствия заданным характеристикам в передаче нужного напряжения и тока от источника

к месту назначения, то есть именно в точке питания непосредственной нагрузки.

ЭМП — величина электромагнитных излучений и наводок, создаваемых токами и напряжениями высокоскоростных сигналов, генерируемых системой. Что же касается целостности питания — это, как уже было сказано выше, показатель качества подачи электроэнергии на запитываемое устройство. Другими словами, для высокоскоростных устройств напряжение питания должно не только поддерживаться в допустимом диапазоне рабочих напряжений, но и гарантировать его надлежащее качество — уровень пульсаций и помех. Это связано с тем, что такие устройства, как приемники радиомодемов и трансиверов и малошумящие усилители, весьма чувствительны к шуму на шинах питания. Но это касается и таких на первый взгляд устойчивых к воздействию помех каскадов, как генераторы тактовой частоты. Причина кроется и в том, что данные шумы приводят к дрожанию фронтов сигналов синхронизации, или джиттеру, помехам в виде отражений, уменьшающим глазок на глазковой диаграмме канала данных, и ухудшению соотношения сигнал/шум (англ. signal-to-noise ratio, SNR) системы. Поскольку DC/DC-преобразователь по своей природе является источником шума, все перечисленные выше проблемы в той или иной степени связаны именно с обеспечением целостности питания. Вот почему разработчикам необходимо принять все соответствующие меры для того, чтобы генерируемые расположенными на плате DC/DC-преобразователями шумы не распространялись через систему питания и не влияли на характеристики системы в целом.

Мы выделили следующие три проблемы:

1. Высокочастотные затухающие колебания («звон»), возникающие на фронтах импульсных сигналов DC/DC-преобразователей и вызывающие резонансные пики в спектре излучения.

2. Генерация гармонических помех непосредственно самими DC/DC-преобразователями на рабочей частоте, которые являются следствием использования в них транзисторов с высокой скоростью переключения, то есть с крутыми фронтами импульсов с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ), — это необходимое условие для уменьшения динамических потерь повышения КПД. Такие ключи могут генерировать гармоники основной частоты в виде коммутационных помех в полосе до гигагерцевой области.

3. Резонанс на шинах питания DC/DC-преобразователей или LDO-стабилизаторов, возникающий как следствие высокой добротности Q используемых конденсаторов, резонирующих с линиями подключения в слое распределения питания печатной платы.

«Звон» и излучение электромагнитных помех

Любой «звон» на фронтах импульсных сигналов, а это довольно частое явление, может приводить к широкополосным резонансам в результирующем радиочастотном спектре. Резонансные частоты, возникающие в результате функционирования DC/DC-преобразователей или линейных стабилизаторов с низким падением напряжения на регулирующем транзисторе (англ. low dropout, LDO), могут лежать как в области низких частот (в районе нескольких килогерц), так и в области сотен мегагерц и выше. Последнее связано с явлением паразитного резонанса на линиях питания (в англ. терминологии — Power Delivery Network, PDN, он используется в современных программах для разводки печатных плат, а сами паразитные резонансы анализируются и минимизируются встроенными программными инструментами), свойственного преобразователям с быстродействующими МОП-ключами.

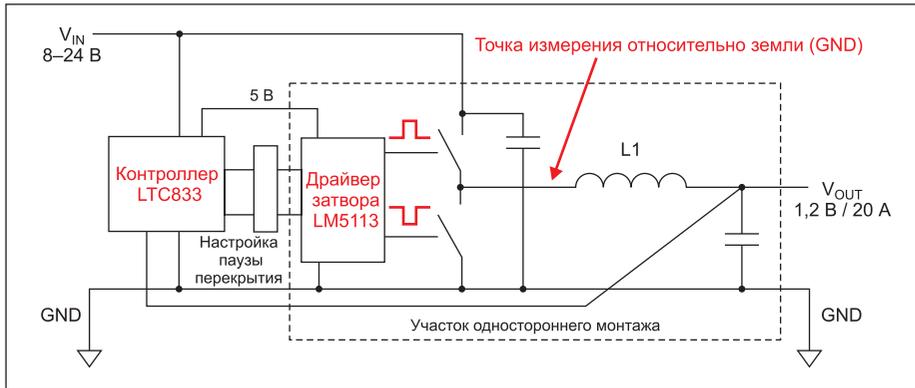


Рис. 1. Диаграмма, показывающая точку в месте соединения ключа (с левой стороны L1), в которой проводились измерения (по отношению к точке заземления)

Гармонические колебания, возникающие в результате переключения ключа, возбуждают паразитные резонансы линий подсоединения питания и резонансы непосредственно самого устройства и проявляются как «звон» во временной области. Токи и напряжения этих паразитных резонансных колебаний приводят к излучению ЭМП. Уровень рассматриваемых паразитных колебаний и уровень излучения ЭМП связаны с добротностью Q и характеристическим импедансом паразитного резонансного контура и гармонической энергией, создаваемой переключением ключей в DC/DC-преобразователях.

В качестве примера были измерены сигналы на ключах демонстрационной платы понижающего DC/DC-преобразователя. Процедура выполнялась с помощью осциллографа RTE 1104 компании Rohde & Schwarz и активного пробника RT-ZS20, имеющего входное сопротивление 1 МОм и полосу пропускания до 1,5 ГГц (рис. 1).

Как это ясно видно на рис. 2, на рабочем импульсе наложен очень большой затухающий гармонический сигнал с частотой 216 МГц.

Для измерения синфазного тока входной цепи (фиолетовая трасса) и дифференциального тока в цепи нагрузки вы-

ходной цепи (трасса цвета морской волны) DC/DC-преобразователя использовался токовый зонд F-33-1 компании Fischer Custom Communications. Обратите внимание (рис. 3) на большие резонансные пики на частоте 216 МГц (маркер 1) и его вторую гармонику на частоте 438 МГц (маркер 2).

Рекомендации по решению проблемы

Существует несколько способов улучшить конструкцию таким образом, чтобы минимизировать резонансы и вызывающий их «звон» и, следовательно, снизить уровень излучаемых и наведенных (кондуктивных) ЭМП. Поскольку энергия этих паразитных резонансов тесно связана с рабочей частотой преобразователя, временем нарастания импульсов с ШИМ, характеристическим импедансом и добротностью Q паразитных резонансных контуров, то именно воздействие на эти факторы и помогает уменьшить их негативное влияние. Итак, необходимо учитывать следующее:

- Меньшая скорость нарастания импульса ухудшает эффективность работы ключа DC/DC-преобразователя, но уменьшает и уровень высокочастотных излучений.

- Тщательная разводка печатной платы и соответствующий выбор конденсатора минимизируют характеристический импеданс и добротность Q .
 - Проводники на печатной плате должны быть как можно более короткими и максимально широкими, а диэлектрик между слоями печатной платы — как можно тоньше.
 - Все элементы, связанные с ключом преобразователя, должны быть установлены на одной стороне платы, выполнить которую предпочтительно из тонкого диэлектрика, что поможет с возвратом высокочастотного тока через собственную емкость платы в соответствующий слой с заземлением.
 - Для демпфирования паразитных резонансов необходимо использовать снабберы (демпфирующие элементы) и конденсаторы со специально рассчитанным ESR (эквивалентным последовательным сопротивлением) или переработать конструкцию, заменив имевшийся ранее дроссель на катушку с меньшей индуктивностью рассеивания.
- Дополнительные сведения об измерении «звона» доступны в [1].

Высокая скорость нарастания фронтов — высокий уровень помех

Современные встроенные в платы DC/DC-преобразователи используют рабочие частоты переключения до 3 МГц. Это является несомненным преимуществом, поскольку позволяет уменьшить физические размеры таких компонентов преобразователя, как дроссель и элементы фильтра, а также повысить его эффективность. Тем не менее высокие скорости нарастания импульса при ШИМ-регулировании создают широкополосный гармонический спектр, чья ширина связана с временем нарастания импульсов напряжения и тока. Так, скорость нарастания фронта в 1 нс может создавать гармоники на частотах до 3 ГГц или даже более.

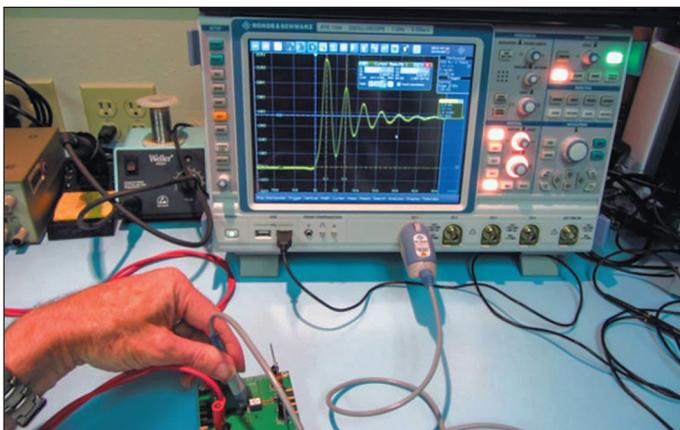


Рис. 2. Измерение «звона» на переднем фронте рабочего импульса DC/DC-преобразователя. Наблюдается достаточно сильный сигнал с частотой 216 МГц

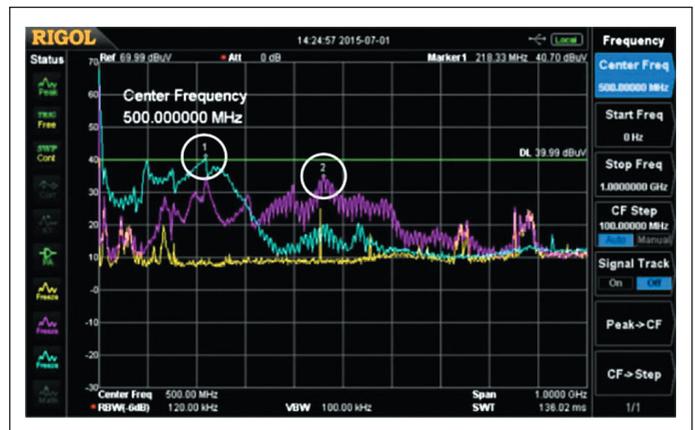


Рис. 3. Результирующие резонансы от «звона» с частотой 216 МГц (маркер 1) и его второй гармоники на частоте 438 МГц (маркер 2)

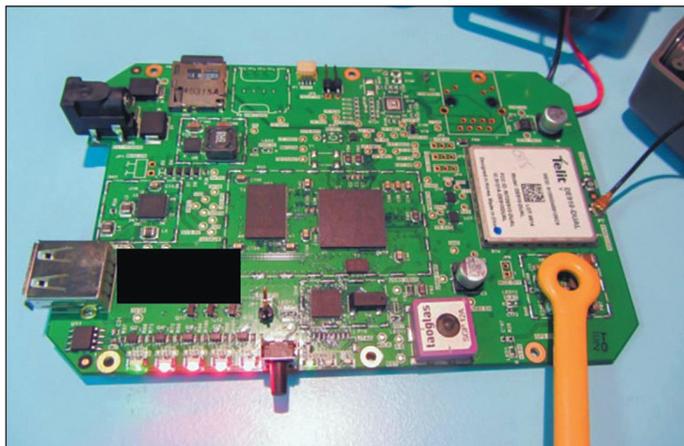


Рис. 4. Исследование источников шума DC/DC-преобразователя на типичном беспроводном устройстве

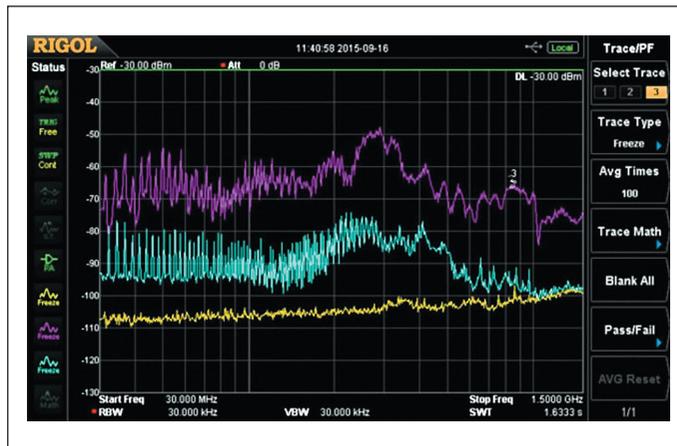


Рис. 5. Результат измерения связанных DC/DC-преобразователей

Эти широкополосные гармоники, их излучение и вызванные им наводки на другие части схемы становятся причиной сбоев и могут влиять на чувствительность приемника радиомодема и трансивера или других размещенных на плате беспроводных систем, например GPS. На рис. 4 показано, как типичная схема преобразователя постоянного тока может быть проверена на излучение с использованием датчика магнитного поля (Н-пробник), подключенного к анализатору спектра.

Для того чтобы получить представление о «звоне» без непосредственного нарушения цепи, можно подсоединить к осциллографу пробник магнитного поля в виде изолированной катушки, если таковой имеется, и подержать его возле каждого DC/DC-преобразователя на плате. Это поможет найти «виновного» и источник проблем.

На рис. 5 показано результирующее измерение связанных DC/DC-преобразователей. Желтая трасса представляет собой уровень окружающего шума измерительной системы и всегда является хорошей идеей для фиксации уровня ЭМП. Трасса цвета морской волны и фиолетовая — это измерения двух преобразователей. Обратите внимание, что оба они генерируют широкополосные токи помех до 1 ГГц, причем помехи от преобразователя, показанные фиолетовой трассой, выходят за пределы 1,5 ГГц и лежат на 20–50 дБ выше, чем уровень окружающего электромагнитного шума.

В этом примере мы оцениваем уровень помех в полосе 30 МГц – 1,5 ГГц, что позволяет в целом охарактеризовать профиль спектра излучений нескольких встроенных DC/DC-преобразователей. Они оба потенциально могут вызвать помехи для функционирования устройств сотовой связи, действующих в области частот 700–950 МГц. Как можно видеть, преобразователь с фиолетовой трассой дает помеху в полосе работы мобильных телефонов в среднем на 30 дБ выше уровня окружающего шума.

Рекомендации по решению проблемы

Для того чтобы снизить риск возникновения помех для приемников мобильных телефонов и других беспроводных систем передачи информации, конструкция проектируемого изделия должна начинаться с оценки рисков в части ЭМС еще до возникновения этой проблемы. Итак, необходимо учитывать следующее:

- уделить максимальное внимание компоновке печатной платы;
- использовать фильтрацию по входу и выходу DC/DC-преобразователей;
- использовать фильтрацию в цепи питания любого высокочастотного устройства;
- использовать отдельную фильтрацию в цепи питания радиомодуля;
- использовать локальную защиту вокруг областей с высоким уровнем высокочастотных помех;
- оценить возможность применения экранирования всего продукта;
- оптимизировать размещение антенны.

Конструкция печатной платы имеет здесь решающее значение, и поэтому большинство усилий разработчика должно быть сосредоточено именно в данной области. Компоновка платы из восьми или десяти слоев даст максимальную гибкость при разделении цепей источников питания, аналоговых, цифровых и радиочастотных каскадов. Это обеспечит несколько плоскостей для возврата токов высокочастотной помехи на «землю», которые могут быть сшиты вокруг по краям платы, что позволит сформировать своеобразную клетку Фарадея. Необходимо также соблюдать известную осторожность, чтобы избежать загрязнение соседних каскадов помехами от обратных токов, особенно в точках подключения к плоскостям их возврата на «землю». Для беспроводных продуктов плоскость раздачи питания для радиопередающей секции должна быть изолирована (за исключением узкого моста) от плоскости питания и зазем-

ления цифровой части. Все печатные проводники на изолированной плоскости должны проходить через мост, соединяющий два слоя. Все это может обеспечить разделение между цифровой схемой и радиоприемной частью на уровне до 40 дБ.

Очень важно, чтобы слои платы, используемые для раздачи питания и возврата обратного тока на «землю», находились рядом, и в идеале расстояние между ними не превышало 3–4 мил. Такой подход благодаря наличию между слоями распределенной емкости связи обеспечит наилучшее подавление высокочастотных помех. Все сигнальные слои должны быть смежными, по меньшей мере с одной сплошной заземленной плоскостью. Трассы с сигналами тактовой частоты или с другими высокоскоростными сигналами не должны иметь переходных отверстий для передачи сигналов между каскадами устройства и не переходить с одного слоя платы на другой, то есть находиться на одной плоскости.

Секции формирования электропитания необходимо хорошо изолировать от чувствительной аналоговой или радиочастотной части (включая антенны). Следует помнить о первичных и вторичных токовых петлях и их возвратных токах, которые не должны использовать одни и те же траектории прокладки, что и трассы для цифровых, аналоговых или радиочастотных секций. Кстати, возвратные токи высокой частоты нужно вернуть к источнику непосредственно под местом его размещения. Для получения дополнительной информации об устранении проблем с особенностями использования и компоновки DC/DC-преобразователей для беспроводных радиоустройств обратитесь к [2].

Паразитные резонансы на платах ПК и проблемы излучения ЭМП

Распространение шума в отдельно рассматриваемой системе может быть представлено совокупностью трех элементов: стабилизаторами напряжения, проводниками печатной

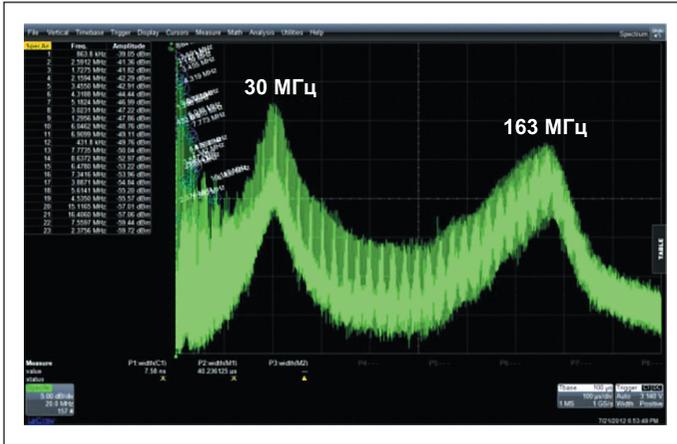


Рис. 6. На экране анализатора спектра представлены паразитные резонансы на частотах 30 МГц и 160 МГц, обнаруженные вблизи входа DC/DC-преобразователя, выполненного на базе контроллера LTC3880

платы с развязывающими конденсаторами на цепях питания и линиями питания непосредственно частей самого устройства, которые выступают в качестве нагрузки.

Каждый из этих элементов состоит из резистивных, индуктивных и емкостных составляющих. Даже «бесшумные» стабилизаторы с низким собственным падением напряжения, так называемые LDO-стабилизаторы (от англ. low dropout), могут иметь явно выраженный эквивалентный индуктивный импеданс [3]. Резистивные, индуктивные и емкостные компоненты как распределенные составляющие способны на резонансных частотах усиливать сигналы помех, создаваемых источником питания при их распространении по цепям питания к нагрузке, что приводит к излучению ЭМП. Такие резонансы на линиях питания возбуждают гармоники рабочей частоты переключения и «звон» ключа, о чем мы говорили выше [4]. Эти помехи не только приводят к ухудшению ситуации в части ЭМП, провоцируя возникновение кондуктивных помех, но и оказывают прямое негативное влияние на встроенные беспроводные устройства обмена информацией.

Краткое видео по ссылке [5] помогает объяснить основные принципы проектирования трасс раздачи питания. В качестве примера на рис. 6 представлены измеренные Н-зондом излучаемые ЭМП вблизи входа DC/DC-преобразователя, выполненного на базе контроллера LTC3880 компании Linear Technology.

Пик на частоте 163 МГц объясняется «звоном» ключей, как это ясно видно из осциллограммы, показанной на рис. 7. Этот сигнал является следствием индуктивности проводников подключения МОП-транзистора — ключа верхнего плеча, его физических выводов и проводников печатной платы, вызывающих паразитные резонансы в цепи МОП-транзистора (ключа нижнего плеча и резонансов с емкостями на самой печатной плате).

Входной керамический конденсатор резонирует примерно на частоте 30 МГц, как показано на рис. 8, и, соответственно, приводит к большому выбросу ЭМП на этой частоте.

Участок входной цепи измеренного DC/DC-преобразователя (полученные результаты приведены на рис. 6) представлен на рис. 9 со схематическими изображениями компонентов, платы и внешних соединений.

Для иллюстрации эффектов паразитного резонанса можно предложить простой и наглядный пример с использованием компьютерного моделирования. Рассмотрим одиночный DC/DC-преобразователь так, как показано на рис. 10.

Разработчики печатных плат часто размещают ключи, выполненные на МОП-транзисторах, на одной стороне платы с вводом питания на противоположной стороне. Небольшая часть платы, используемая в этом примере, имеет вход питания через пару штырьков, так что для подключения питания к плате не добавляется индуктивность

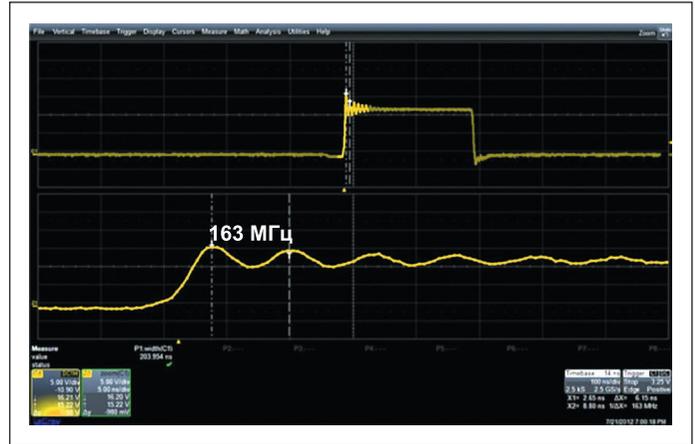


Рис. 7. Помеха на частоте 163 МГц легко объясняется «звоном» ключей DC/DC-преобразователя

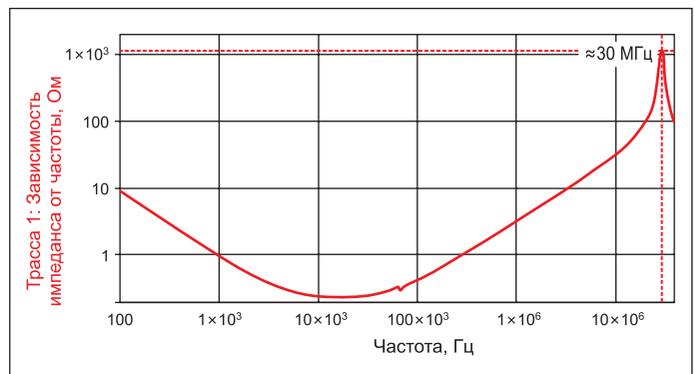


Рис. 8. Большой уровень излучения с частотой 30 МГц, выявленный с помощью Н-зонда, идентифицируется как резонанс печатной платы и подтверждается измерением импеданса входного конденсатора

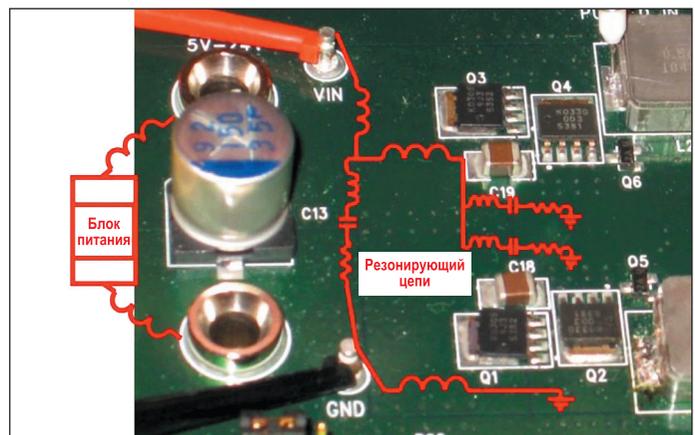


Рис. 9. Часть размещения цепи питания на базе DC/DC-преобразователя, на котором проводились измерения (рис. 6), со схематическими изображениями компонентов, платы и внешних соединений

связи. Большой керамический конденсатор емкостью 47 мкФ находится на верхней стороне платы, в то время как меньший керамический конденсатор емкостью 0,1 мкФ расположен очень близко к ключам на нижней стороне платы. Питание и «землю» с верхней стороны печатной платы на нижнюю сторону соединяют по две параллельные переходные линии связи (переходные отверстия), как показано на рис. 11.

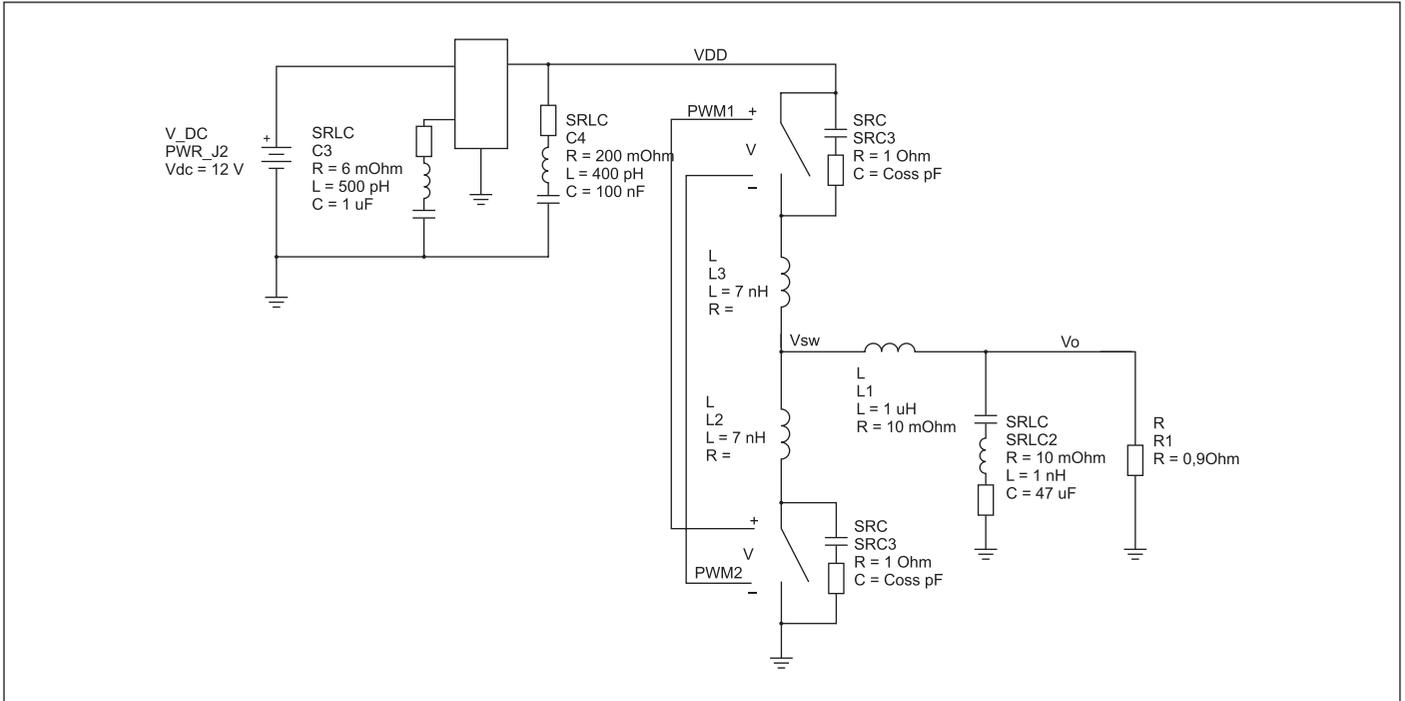


Рис. 10. Модель DC/DC-преобразователя, использованная для иллюстрации генерации ЭМП в цепях подключения питания. Ключи, обозначенные как FET, содержат индуктивность выводов и емкость стока (Coss). В составе модели также имеется небольшая плата и два керамических конденсатора

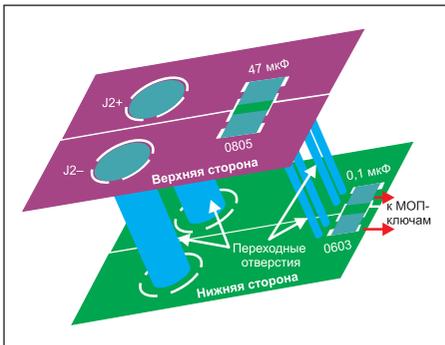


Рис. 11. Большие круглые контакты слева — это разъем подключения питания, J2. Большой конденсатор на верхней стороне типоразмера 0805 имеет емкость 47 мкФ, а меньший конденсатор на нижней стороне типоразмера 0603 имеет емкость 0,1 мкФ

Эта простая модель предназначена для моделирования гармонического тока на входном разъеме, который непосредственно связан с кондуктивными и излучаемыми ЭМП. Здесь выполнялось два варианта моделирования. Первый — с керамическим конденсатором, имеющим низкое ESR, а второй — с более низкой добротностью Q. Это достигается применением керамического конденсатора емкостью 0,1 мкФ со специально выбранным расчетным значением ESR, который был установлен взамен штатного конденсатора такой же емкости и тоже близко расположен к МОП-ключам. Оба результата моделирования показаны на рис. 12.

Моделируемый импеданс, измеренный на меньшем по емкости конденсаторе и при-

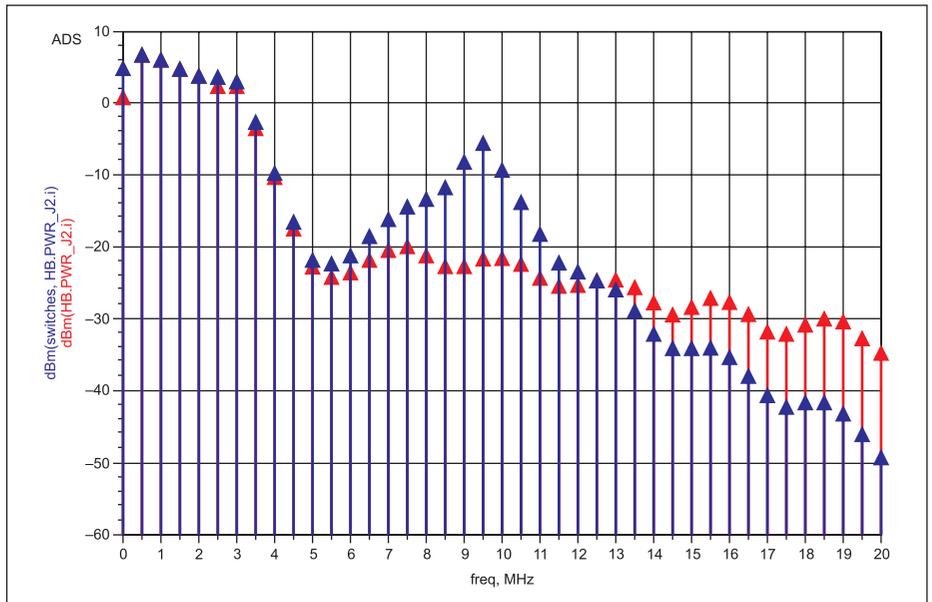


Рис. 12. Результат спектрального моделирования по входу DC/DC-преобразователя показывает, что высокودобротные керамические конденсаторы с ESR, равным 10 мОм (спектр обозначен синим цветом), имеют явный пик в районе 10 МГц, который исключается при использовании специально выбранного керамического конденсатора с низкой добротностью благодаря более высокому ESR, равному 200 мОм (спектр изображен красным цветом)

веденный на рис. 13, показывает соответствующее подавление резонанса с четким пиком 10 МГц, который был ярко выражен при использовании керамического конденсатора с высокой добротностью Q (показан синим цветом). Этот пик устраняется с помощью низкодобротного керамического конденсатора с более высоким значением ESR (изображен красным цветом).

Рекомендации по решению проблемы

Для минимизации резонансов в цепях передачи питания нужно тщательно сбалансировать полную систему — сам стабилизатор напряжения, линии подключения и нагрузку. В линии питания для устранения или минимизации добротности и подавления

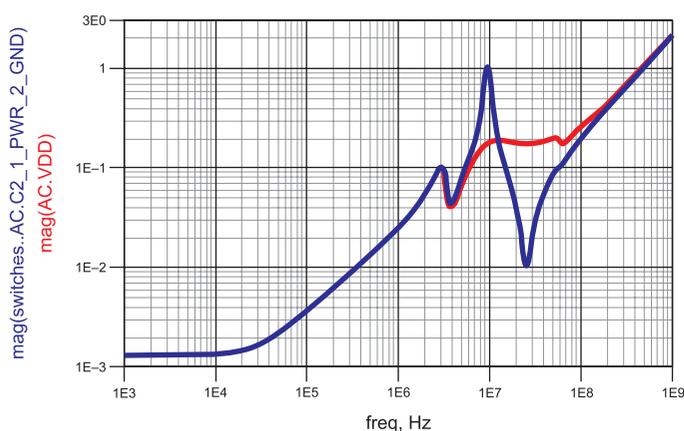


Рис. 13. Моделируемый импеданс на конденсаторе для конденсатора емкостью 0,1 мкФ с использованием высококачественного конденсатора с ESR, равным 10 мОм (показано синим цветом), и специально выбранного низкодобротного конденсатора с ESR, равным 200 мОм (показан красным цветом)

резонансов также должно быть включено демпфирующее сопротивление. Итак, необходимо учитывать следующее:

- Для трасс распределения питания использовать короткие, широкие проводники.
- Минимизировать площадь размещения DC/DC-преобразователя, что поможет свести к минимуму паразитные индуктивности.
- Применять как можно более тонкие слои диэлектрика между слоями на печатной плате.
- Включить в своей программе для разводки печатной платы инструмент или режим электромагнитного моделирования, что поможет заранее определить и минимизировать паразитные резонансы в цепях раздачи питания.
- Устанавливать конденсаторы по возможности на одной стороне платы, это уменьшит паразитную индуктивность их подключения.
- Помнить, что из-за более высокого значения ESR конденсаторы с низкой добротностью Q уменьшают общую добротность паразитных резонансных цепей и линий связи по питанию.
- Правильно выбирать стабилизаторы напряжения и их выходные конденсаторы. Это необходимо делать с учетом обеспечения стабильности контура регулирования выходного напряжения.
- Не размещать вырезы или отверстия в слоях заземления, лежащих ниже слоя раздачи питания.

- Хорошей практикой является правильное применение ферритовых помехоподавляющих элементов; при неправильном размещении они могут стать причиной возникновения паразитных резонансов.
- Помнить об индуктивном характере переходных отверстий, они также могут быть причиной резонансов и излучения ЭМП.

Конструкция печатной платы и хорошая развязка, несомненно, критически важны, но традиционные подходы обычно не работают в схемах с высокоскоростными сигналами. Конструкция печатной платы, выбор и размещение конденсаторов в шинах и цепях питания всегда являются следствием тех или иных компромиссов, но их воздействие на резонансы необходимо тщательно взвешивать. Для этой цели весьма полезен многочастотный генератор гармонических частот, который поможет быстро выделить все имеющиеся паразитные резонансы в цепях питания [3].

Заключение

Проектирование печатных плат с установленными на них DC/DC-преобразователями, LDO-стабилизаторами, а также организация раздачи питания для современных устройств с их высокоскоростными сигналами требует не только тщательной проработки схемы и соответствующей фильтрации, но и моделирования поведения трасс раздачи питания. Здесь необходим очень тщательный подход к ком-

поновке печатных плат и использованию фильтров с правильно выбранными конденсаторами в части значения их ESR. Помните, неправильно выполненные проекты могут привести к следующим проблемам:

- «Звону» в цепях питания от ключей DC/DC-преобразователей или какого-либо другого цифрового сигнала с крутыми фронтами, что приводит к недопустимо высокому уровню кондуктивных и излучаемых ЭМП, которые проявляются в виде пиков на основной частоте и гармониках такого паразитного колебания.
- Возникающий высокочастотный широкополосный шум может значительно превышать диапазон 1 ГГц, что вызывает нарушение работы интерфейсов беспроводной связи.
- Плохая стабильность и резонансы в недемпфированных трассах распределения питания приводят к нестабильности работы устройства, паразитным резонансам и связанным с ними кондуктивным и излучаемым ЭМП.

Все эти нарушения способны стать причиной того, что разработчик не сможет пройти сертификационные испытания [6] и вывести спроектированное устройство на рынок. ■

Литература

1. Wyatt K. GaN Technology and the Potential for EMI (EDN). www.edn.com/electronics-blogs/the-emc-blog/4439839/GaN-technology-and-the-potential-for-EMI
2. Wyatt K. Platform Interference (EDN). www.edn.com/electronics-blogs/the-emc-blog/4441086/Platform-interference
3. Wyatt, Review: Picotest J2150A Harmonic Comb Generator. www.edn.com/electronics-blogs/the-emc-blog/4440532/Review-Picotest-J2150A-harmonic-comb-generator
4. Sandler S. The Inductive Nature of Voltage Control Loops. www.edn.com/electronics-blogs/impedance-measurement-rescues/4438578/The-inductive-nature-of-voltage-control-loops
5. Sandler S. How to Design for Power Integrity: Finding Power Delivery Noise Problems (Video). www.youtube.com/watch?v=oL6qjhJH_m4&t=4s&list=PLtq84kH8xZ9HIYg-BYDsP7TbqBpftidzI8&index=4
6. Рентюк В. Что нужно знать об испытаниях на выполнение требований по ЭМС для изделий коммерческого назначения // Компоненты и технологии. 2017. № 7.

Первое универсальное интегрированное решение для различных приводов электродвигателей

Анатолий САВЕЛЬЕВ
anatoly.saveliev@eu.tdk.com

Олег ГНЕУШЕВ
oleg.gneushev@eu.tdk.com

Компании Infineon Technologies и TDK объединили свои усилия для разработки универсального интегрированного решения для инверторов, которые могут быть с успехом использованы в силовых агрегатах электромобилей и найти применение в широком спектре промышленных приложений. Предложенная конструкция позволяет разработчикам быстро и легко проверять и реализовывать концепции самых различных приводов электродвигателей.

В большинстве электрических приводов для промышленного применения обычно используются асинхронные двигатели, а в автомобильных — синхронные двигатели с постоянными магнитами. Во всех случаях производители, в соответствии с рекомендациями IEC 60034-18-41, ограничивают управление этими двигателями по максимально допустимой скорости нарастания напряжения dv/dt на клеммах инвертора значением порядка 5 кВ/мкс¹. Это связано с ограниченной диэлектрической изоляцией обмоток по пробивному напряжению. Кроме того, когда электродвигатели приводятся в действие инвертором, возникают большие токи утечки на землю, которые вызваны паразитной емкостью в обмотках в сочетании с dv/dt инвертора. Эти токи могут привести к искрению в подшипниках, вызвать их поверхностную эрозию и, следовательно, существенно ограничить их срок службы.

Для достижения высокой энергетической эффективности (КПД) силовые полупроводниковые приборы инверторов (как правило, это IGBT-модули) работают на частотах переключения в диапазоне 4–15 кГц. Из-за ограничения скорости нарастания и значения непосредственно самой рабочей частоты коммутации² это приводит к гармоникам с высокой амплитудой, лежащим в частотном диапазоне около 1 МГц. Таким образом, в частности в автомобильных приложениях, силовой привод вызывает значительные помехи в диапазоне вещания на средних волнах в диапазоне частот 526,5–1606,5 кГц (иногда по типу модуляции называемом АМ-диапазоном). Это делает невозможным прослушивание в автомобиле радиостанций, работающих на средних волнах.

Основные преимущества новой конструкции

Чтобы создать инвертор, который мог бы работать на двигатель с выполнением требований по электромагнитной совместимости, компании Infineon и TDK переработали основные компоненты системы, а также улучшили существующий модуль HybridPACK1, в результате чего добились их четкого согласования друг с другом.

Низкая паразитная индуктивность

Помимо использования последнего поколения чипов IGBT3 с диэлектрической прочностью изоляции в 705 В, новое решение имеет шесть терминалов для подключения шины постоянного тока на модуле HybridPACK вместо двух терминалов, имевшихся в предыдущем варианте (рис. 1). В сочетании с модифицированным DC-link конденсатором EPCOS это позволило на шине постоянного тока уменьшить почти вдвое эквивалентную последовательную индуктивность ESL (Equivalent Series Inductance) — от типичной в 30 до 15 нГн. Такое уменьшение паразитной индуктивности соответственно снижает перенапряжения, возникающие при выключении силовых ключей, выполненных на IGBT, рассчитанных на номинальный ток 400 А, в диапазоне рабочих напряжений 500–420 В (рис. 2).

Вместе с терминалами для подключения на DC-link конденсатора оставшиеся для подключения четыре дополнительные клеммы шины постоянного тока увеличивают возможности модуля HybridPACK в части рабочих токов. Таким образом, новое конструктивное решение модуля HybridPACK1-DC6 может использоваться для более эффек-

тивных перспективных IGBT-технологий с более высокими возможностями в части рабочей нагрузки. Силовые возможности существующих приложений, основанных на текущей версии модуля HybridPACK1 с двумя терминалами для шины постоянного тока, могут быть легко увеличены с помощью нового модуля HybridPACK1-DC6. Это связано с тем, что новый модуль имеет почти те же размеры, что и предшественник, и, тем самым, обеспечивает хорошую масштабируемость для различных xEV-приложений (электромобили и гибриды).

Модуль HybridPACK1 с двумя терминалами постоянного тока имеет очень компактную конструкцию благодаря встроенной шине. По соображениям совместимости эта функция была сохранена и в новом конструктивном решении модуля HybridPACK1-DC6. Внешняя шина к DC-link конденсатору EPCOS шины постоянного тока позволяет лучше распределять ток питания, обеспечивая тем самым и более эффективное использование непосредственно самого мо-



Рис. 1. IGBT-модуль HybridPACK1-DC6 рассчитан на напряжение 705 В и номинальный ток 400 А. Благодаря шести клеммам шины постоянного тока эта конструкция имеет очень низкую паразитную индуктивность

¹ В РФ действует аналогичный стандарт ГОСТ IEC/TS 60034-18-41-2014 «Машины электрические вращающиеся. Часть 18-41», определяющий время нарастания импульса на выходе инвертора в пределах 0,05–2,0 мкс. — Прим. перев.

² ГОСТ IEC/TS 60034-18-41-2014 «Машины электрические вращающиеся. Часть 18-41. Квалификационные и типовые испытания для систем электроизоляции типа I, используемых во вращающихся электрических машинах с питанием от преобразователей источника напряжения» регламентирует частоту коммутации пределами 0,1–20 кГц. — Прим. перев.

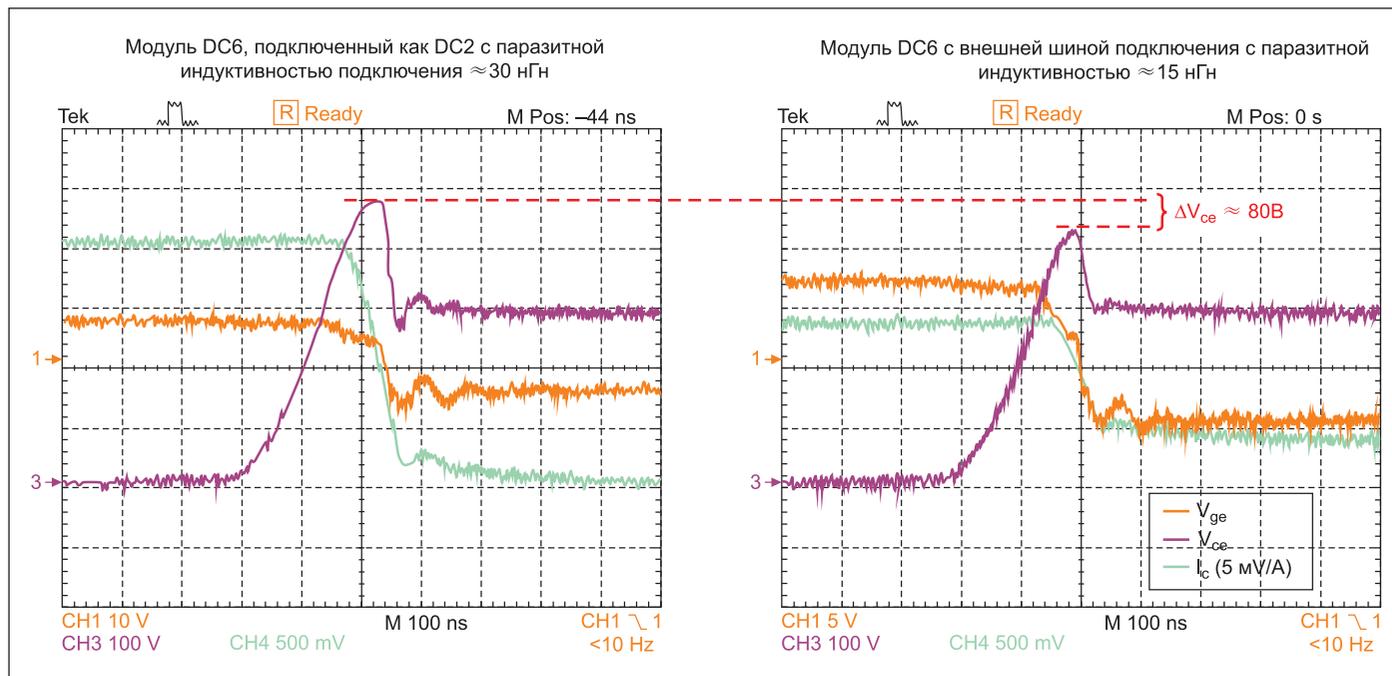


Рис. 2. Значительное снижение перенапряжения при коммутации

дуля. На рис. 2 (справа) показана форма тока через внутреннюю сборную шину при номинальном токе 400 А. Он представляет собой симметричное распределение тока между шиной DC-link конденсатора EPCOS и током модуля.

Предотвращение генерации помех на шине постоянного тока

Еще одной новой разработкой в этом направлении является DC-link конденсатор EPCOS B25655P4607J. Его клеммы спроектированы так, чтобы точно соответствовать клеммам шины звена постоянного тока IGBT-модуля. Это дальнейший шаг в развитии существующих DC-link конденсаторов EPCOS, которые были разработаны для серии модулей Infineon HybridPACK. Новый конденсатор имеет емкость 600 мкФ и доступен с номинальным напряжением 450 В постоянного тока. Его габариты всего 140×72×50 мм. В основе этой компактной конструкции лежит технология PCC (Power Capacitor Chip), в которой для достижения коэффициента заполнения объема, равно-

го единице относительно корпуса конденсатора, используется специальная стержневая намотка. Существует также вариант с плоской конструкцией, имеющий емкость 470 мкФ (B25655P4477J), который является наиболее экономичным типом DC-link конденсатора (рис. 3). Оба типа конденсаторов доступны с прямым подключением к фильтру подавления электромагнитных помех или для использования без него.

Высокие характеристики по ЭМС без использования экранированного кабеля

С учетом требований к электроприводам для транспортных средств, компания TDK также разработала серию специальных, адаптированных для данной области применения двухпроводных высоковольтных фильтров шины постоянного тока — EPCOS DC HV EMC filter. Их использование обеспечивает выполнение всех требований в части электромагнитной совместимости (ЭМС) в соответствии с требованиями UN ECE³ (Regulation No. 10, Rev. 55).

Серия высоковольтных DC-фильтров EPCOS P100316* (рис. 4) рассчитана на максимальное рабочее напряжение 600 В постоянного тока и, таким образом, соответствует типовым напряжениям, которые обеспечиваются от высоковольтных батарей транспортных средств. Фильтры рассчитаны на рабочие токи 150 или 350 А. Это означает, что они могут использоваться даже в системах привода с мощностью до 100 кВт. Сопротивление по постоянному току для всех типов фильтров составляет всего 0,05 мОм, что означает, что оно не вносит значительные потери даже в случае прохождения через такой фильтр предельных рабочих токов. Терминалы для подключения версии P001 сформированы таким образом, что они могут быть подключены непосредственно к DC-link конденсатору EPCOS. Помимо компактной конструкции, они также обладают такими электрическими преимуществами, как низкая паразитная индуктивность и малое контактное сопротивление.

Эффективность данных фильтров настолько велика, что при их использовании более не возникает необходимости в применении для организации связи между батареями и инвертором экранированных кабелей (рис. 5). Это не только дает неоспоримые преимущества с точки зрения стоимости и веса, но также обеспечивает большую долговременную стабильность подключения, поскольку здесь можно обойтись без дорогого и уязвимого экранированного соединения.

³ В РФ следует использовать ГОСТ Р 51524-2012 «Совместимость технических средств электромагнитная. Системы электрического привода с регулируемой скоростью. Часть 3. Требования ЭМС и специальные методы испытаний». — Прим. перев.



Рис. 3. Компактный экономичный DC-link конденсатор B25655P4477J



Рис. 4. Высоковольтные фильтры EPCOS (EPCOS DC HV EMC filter) для шин постоянного тока автомобильных инверторов

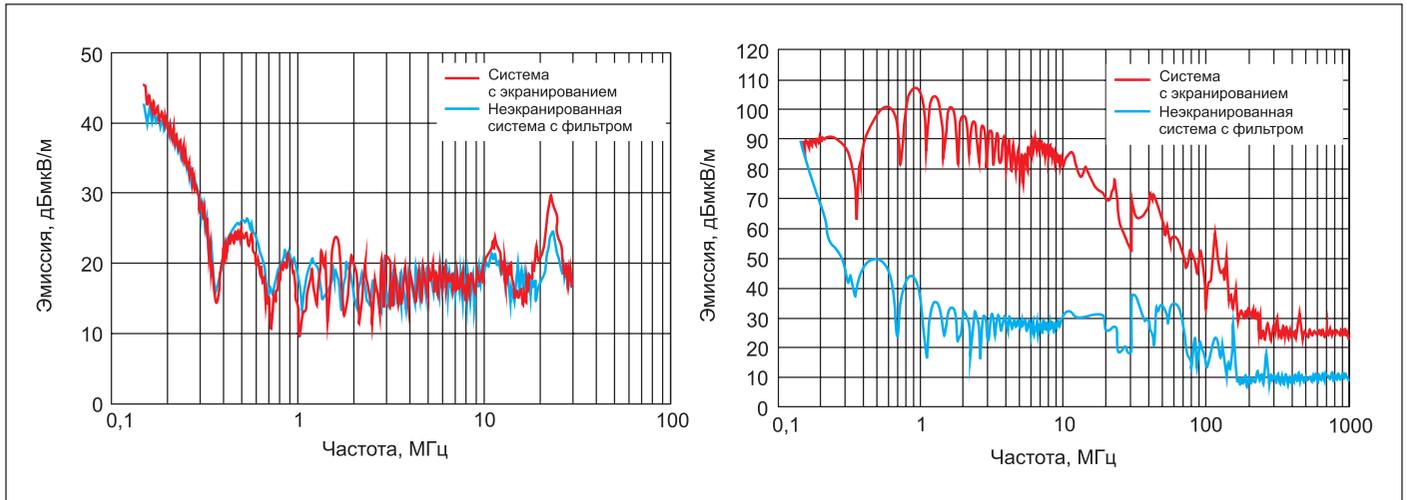


Рис. 5. Эмиссия электромагнитных помех при использовании в шинах напряжения постоянного тока помехоподавляющего фильтра EPCOS для высокого напряжения

Несмотря на использование неэкранированного кабеля в цепях постоянного тока, применение фильтра EPCOS для высокого напряжения снижает уровень кондуктивных (т. е. наводимых по цепям питания) помех до 70 дБ, что эквивалентно коэффициенту их ослабления в 3000 раз. И это не единственное преимущество: новые фильтры также снижают количество мер, которые ранее необходимо было предпринимать в отношении отдельных компонентов системы для решения вопросов электромагнитной совместимости.

Помимо превосходных электрических характеристик, рассматриваемые фильтры также впечатляют своим малым весом и компактными размерами, то есть именно теми техническими параметрами, которые необходимы для их использования в транспортных средствах. В зависимости от конкретного типа фильтра, размеры, как правило, находятся в диапазоне между 186×65×65 и 121×52×52 мм. Помимо версий с обычным решением в части подавления синфазных помех, имеются также типы фильтров с особенно высоким подавлением в длинноволновом

спектре радиоволн, а именно — в диапазоне частот 150 и 300 кГц.

Ферритовые сердечники EPCOS

Если на выходе инвертора имеются импульсы с высокой крутизной фронтов, они, как известно, вызывают всплески напряжения, которые могут быть дополнительно усилены паразитными индуктивностями кабелей подключения двигателя и резонансными явлениями. При неблагоприятном раскладе такие выбросы напряжения

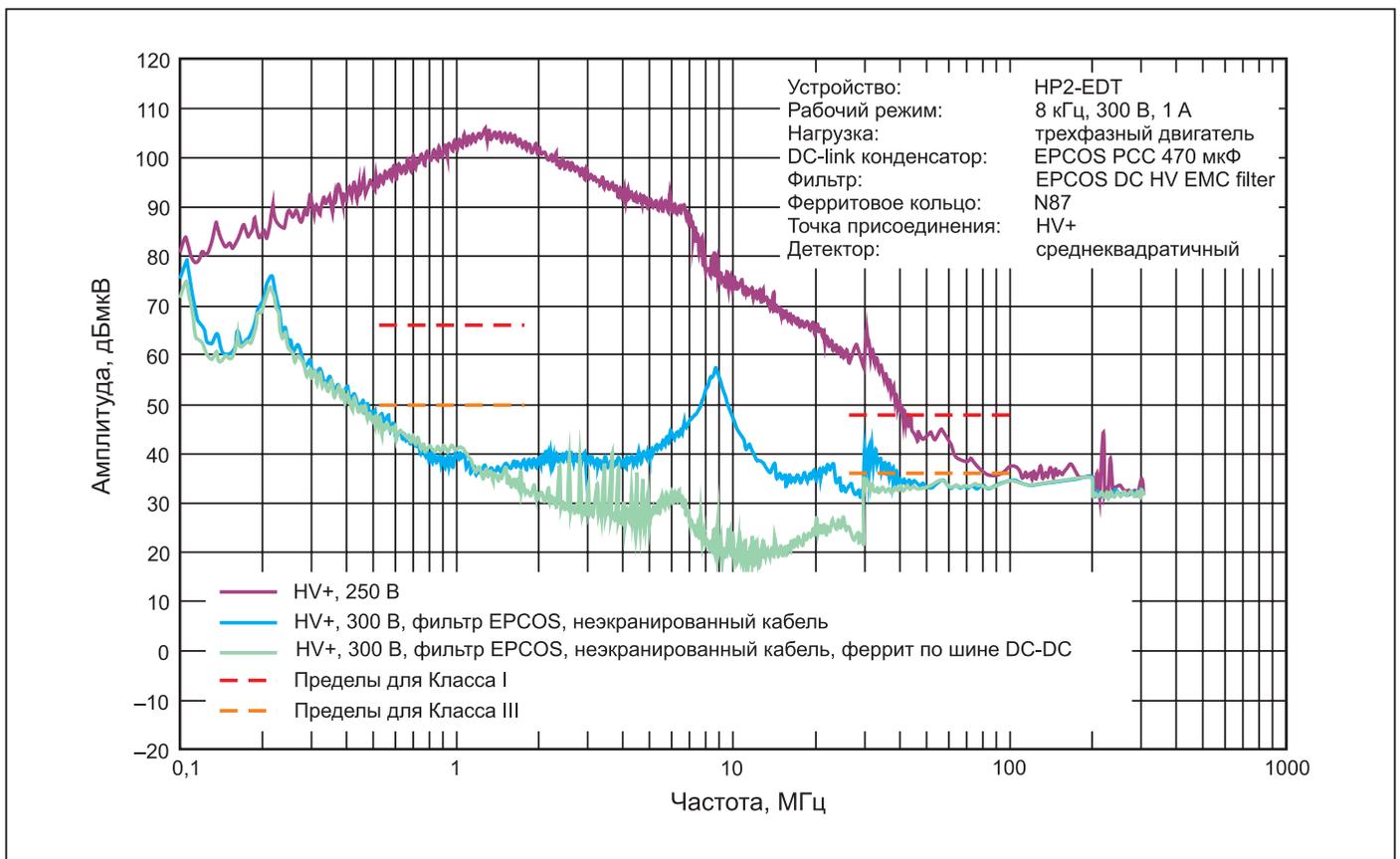


Рис. 6. Ослабление синфазных помех

могут привести к образованию электрической дуги, способной разрушить изоляцию обмоток двигателя. В то же время высокая частота переключения инвертора при наличии паразитной емкостной связи между обмотками двигателя и его корпуса (потенциала земли) вызывает рост токов утечки, которые могут протекать через подшипник двигателя и, следовательно, вызывать искрообразование. Это приводит не только к ускоренному изнашиванию самого подшипника, но и к генерации и излучению радиопомех.

Одним из средств устранения описанных выше негативных явлений является применение ферритовых колец, которые надеваются непосредственно на кабели двигателя в точке их подключения непосредственно на выходе инвертора. Благодаря более интенсивному снижению скорости нарастания импульса напряжения dv/dt , это решение также может значительно уменьшить помехи синфазного режима и снизить ток утечки до не критического уровня, что гарантирует соблюдение существующих ограничений по уровню электромагнитных помех до уровня Классов I–III (рис. 6). Для этой цели компания TDK предлагает широкий спектр кольцевых сердечников серии B64290L*. Они доступны с различными типоразмерами и изготовлены из фер-

Таблица. Перечень элементов для инвертор

Наименование	Тип/характеристика	Код для заказа	Изготовитель
IGBT-модуль HybridPACK1-DC6	705 В/400 А	FS400R07A3E3	Infineon
Драйвер затвора		1ED020112FA2	Infineon
DC-link конденсатор	470 мкФ/450 В или 380 мкФ/450 В	B25655P4477J B25655P4387J	EPCOS
ЭМП-фильтр	600 В/150 А	P100316-P001	EPCOS
Ферритовые сердечники	Кольцевые	Серия B64290*	EPCOS
Индуктивности	Синфазный дроссель 0,7 мГн/4 А	B82721A2402N020	EPCOS
Трансформатор драйвера затвора		B78307A2276A003	EPCOS
Конденсаторы	Несколько керамических многослойных конденсаторов (MLCC)		TDK

ритовых материалов, оптимизированных для определенных частотных диапазонов и рабочих температур, и могут быть использованы в любой системе привода. Здесь следует обратить внимание на такие ферритовые материалы, как T65, N30, N87, которые также используются и для помехоподавляющих дросселей EPCOS и прошли проверку временем.

Новая плата драйвера от Infineon

Кроме того, компания Infineon разработала еще и новую плату драйвера для модуля HybridPACK1 DC6, которая основана на проверенной и хорошо себя заре-

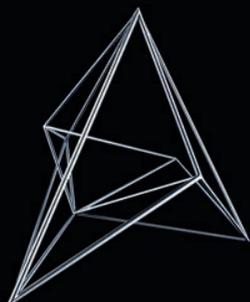
комендовавшей серии драйверов Infineon 1ED020112FA2. Плата обеспечивает эффективную работу, полное выполнение требований по ЭМС и позволяет легко реализовать преимущества рассмотренной в настоящей статье улучшенной конфигурации модуля. Результатом является первый комплексный выходной силовой каскад, состоящий из IGBT-модуля, DC-link конденсатора шины постоянного тока, фильтра подавления ЭМП и драйвера затвора IGBT, плюс все рассмотренные ранее дополнительные элементы, необходимые для выполнения жестких требований по обеспечению электромагнитной совместимости. Перечень элементов такого инвертора приведен в таблице. ■

Статья опубликована в журнале «Силовая электроника» № 2'2017

Надёжные поставки исключительно надёжных КОМПОНЕНТОВ

Силовые DC-LINK керамические конденсаторы CeraLink,
силовые плёночные конденсаторы MPK-DC, силовые плёночные конденсаторы PCC-HP, PCC-LP,
силовые электролитические конденсаторы, силовые блочные варисторы,
газонаполненные контакторы HVC.

Весь ассортимент компонентов
для силовой электроники
TDK (EPCOS)



Symmetron

МОСКВА
Ленинградское шоссе, д. 69, к. 1
Тел.: +7 495 961-20-20
moscow@symmetron.ru

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
ул. Таллинская, д. 7
Тел.: +7 812 449-40-00
spb@symmetron.ru

НОВОСИБИРСК
ул. Блюжера, д. 716
Тел. +7 383 361-34-24
sibir@symmetron.ru

МИНСК
ул. В. Хоружей, д. 1а, оф. 507
Тел. +375 17 336-06-06
minsk@symmetron.ru

www.symmetron.ru

Базовые проблемы силовой электроники: EMI и EMC

Для соединения силовых полупроводниковых ключей и пассивных компонентов (L, C и т. д.) могут использоваться дорожки на печатных платах, а также медные или алюминиевые кабели и шины, в зависимости от уровней рабочих токов и напряжений. Кроме общих технических требований, например по изоляционным зазорам, плотности тока или тепловыделению, важной проблемой является обеспечение электромагнитной совместимости (EMC) приборов, коммутирующих большие токи с высокой скоростью. В этой связи особое значение приобретают характеристики цепей переключения, обладающих паразитными индуктивностями и емкостями и оказывающих решающее влияние на общее поведение системы. Современные быстрые силовые ключи (MOSFET, IGBT, SiC) неизбежно становятся источником электромагнитных помех (Electro Magnetic Interference, EMI). В статье описаны механизмы возникновения EMI и пути решения проблемы ЭМС.

Андрей КОЛПАКОВ
Andrey.Kolpakov@semikron.com

В импульсных преобразователях средней и высокой мощности чаще всего используются IGBT — «рабочая лошадка» современной силовой электроники. Высокая блокирующая способность, большая плотность тока, хорошее сочетание статических и динамических параметров — вот основные преимущества IGBT, делающие эти компоненты незаменимыми в таких применениях, как источники питания, частотные преобразователи, промышленные приводы и т. д. Как правило, в данных схемах силовые ключи работают в режиме «жесткого переключения» на частоте коммутации до 20 кГц. Стремление к обеспечению оптимальных динамических характеристик и снижению уровня потерь требует увеличения скорости переключения по напряжению до 15 кВ/мкс и до 2 кА/мкс по току. Соответственно, возрастает и уровень электромагнитных помех (EMI), причем наибольшее влияние

на работу электронных устройств оказывают т. н. кондуктивные помехи, возникающие при коммутации тока.

Импульсные процессы, происходящие в мощных преобразователях, неизбежно приводят к возникновению высокочастотных шумов. Их диапазон простирается от несущей частоты ШИМ (5–20 кГц) до радиочастот (30 МГц). Низкочастотные помехи проникают в питающую сеть, высокочастотные составляющие создают мощные радиопомехи. Сетевые помехи обычно характеризуются дискретными гармониками на частотах примерно до 2 кГц. Гармонические составляющие с частотами выше 10 кГц, уровень которых измеряется в дБ/мкВ, называются радиочастотными шумами. Эквивалентная схема, объясняющая механизм их возникновения, и спектральный анализ периодического импульсного сигнала представлены на рис. 1.

Кондуктивные помехи, в зависимости от их характера и происхождения, могут быть симметричными и несимметричными, а также дифференциальными и синфазными. Основные европейские стандарты, регламентирующие уровень радиопомех, а также производственные стандарты EMI приведены в таблицах 1 и 2.

Паразитные индуктивности и емкости

Для анализа индивидуального и взаимного влияния паразитных индуктивностей и емкостей на работу импульсного преобразователя используется эквивалентная схема полумостового каскада IGBT (рис. 2). Она содержит звено постоянного тока C_d с напряжением V_d (соответствующим напряжению коммутации V_K), основные паразитные компоненты, а также два транзистора T1 и T2

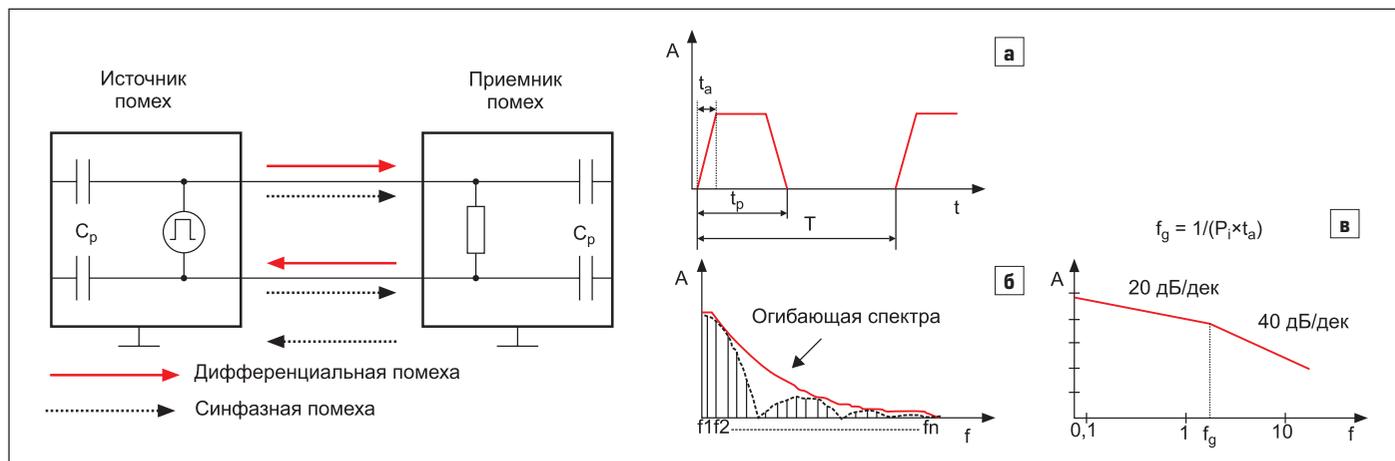


Рис. 1. Эквивалентная схема и спектральный анализ периодического импульсного сигнала: а) временная диаграмма; б) линейная частотная характеристика; в) ЛАХ

с драйверами и антипараллельными диодами. Ток i_L проходит из цепи коммутации в нагрузку.

Влияние паразитных элементов на процесс переключения

Индуктивность цепи коммутации

Общая индуктивность цепи коммутации ключей T1 и T2 образована элементами L_{11} , L_{61} , L_{31} , L_{41} , L_{72} , L_{52} и L_{12} . Аналогично сумма L_{11} , L_{71} , L_{51} , L_{62} , L_{32} , L_{42} и L_{12} участвует в работе цепи, содержащей D1 и T2.

При открывании IGBT T1 или T2 наличие паразитной индуктивности снижает потери мощности включения (E_{on}). Однако во время выключения T1 и T2, а также в процессе обратного восстановления диодов D1 и D2 влияние паразитной индуктивности выражается в появлении перенапряжений, генерируемых транзисторами и диодами из-за высокой скорости коммутации тока. Это увеличивает потери выключения E_{off} и создает дополнительную нагрузку на силовые полупроводники. Данный эффект особенно критичен при перегрузках и отключении токов короткого замыкания из-за очень высоких значений di/dt . Кроме того, наличие паразитных элементов приводит к генерации нежелательных высокочастотных колебаний в мегагерцевом диапазоне.

В преобразователях, работающих в режиме жесткого переключения, необходимо свести к минимуму паразитные распределенные элементы в цепях коммутации. За исключением L_{11} и L_{12} , они входят в состав силовых ключей и не могут быть изменены пользователем. Поэтому производители модулей ведут непрерывную работу по минимизации внутренних индуктивностей L_{CE} за счет улучшения конструкций и технологий корпусирования.

В технических спецификациях SEMIKRON указывается величина L_{CE} , измеренная на выходных терминалах модуля (например, SKM300GB12T4: $L_{CE} = t_{yp}$, 15 нГн; SEMiX252GB126HDs: $L_{CE} = t_{yp}$, 18 нГн). Соединение одиночных ключей в полумостовом каскаде должно выполняться шинами минимальной длины, имеющими низкую паразитную индуктивность L_S цепи коммутации.

Особенно важно уменьшить до предела значение L_S в звене постоянного тока (DC-шине). Лучшим решением является использование ламинированных шин (единая конструкция с запрессованными токопроводящими слоями и изоляторами), адаптированных к дизайну преобразователя. Такие копланарные конструкции, получившие широкое распространение на практике, имеют индуктивность в диапазоне 20–50 нГн.

Влияние элементов $L_{11} + L_{12}$ может быть снижено путем подключения C-, RC- или RCD-снабберных цепей непосредственно к DC-терминалам силовых модулей [1].

Таблица 1. Стандарты, регламентирующие уровень радиопомех

GENERIC	Технические стандарты	Применения	Параметры
EN 50 082/1	VDE 0839, 82-1	Коммерческие, бытовая техника	Стойкость к EMI
EN 50 081/1	VDE 0839, 81-1		Уровень излучения
EN 50 082/2	VDE 0839, 82-2	Промышленные, электроэнергетика	Стойкость к EMI
EN 50 081/2	VDE 0839, 81-2		Уровень излучения

Таблица 2. Производственные стандарты

Тип оборудования	Стандарт	Параметры
Промышленное, научное и медицинское ВЧ-оборудование	EN 55 011	Уровень излучения
	Generic EN 50 082-1/2	Стойкость к EMI
Радио, ТВ-приемники и соединители	EN 55 013	Уровень излучения
	EN 55 020	Стойкость к EMI
Бытовая техника	EN 55 014	Уровень излучения
	Generic EN 50 082-1	Стойкость к EMI
Люминесцентные осветители	EN 55 015	Уровень излучения
	Generic EN 50 082-1	Стойкость к EMI
Системы обработки данных	EN 55 022	Уровень излучения
	EN 55 101, EN 55 024	Стойкость к EMI

В большинстве случаев для этой цели используется простой снаббер на основе пленочного конденсатора 0,1–2 мкФ [2]. В низковольтных силовых приложениях более эффективно работают RC-цепи.

Индуктивности эмиттера / истока

Индуктивности эмиттера/истока (L_{31} или L_{32}) влияют на работу силовой цепи в такой же степени, как и пассивные элементы схемы управления затвором. Высокая скорость изменения тока транзистора di/dt

создает перепады напряжения на паразитных элементах, что эквивалентно эффекту обратной связи в цепи драйвера (отрицательная обратная связь по эмиттеру/истоку). В результате замедляется процесс заряда эмиттерной емкости при включении или процесс ее разряда при отключении, что увеличивает время коммутации и динамические потери. Эффект отрицательной обратной связи по эмиттеру может быть использован для ограничения di/dt в случае короткого замыкания вблизи модуля. Для

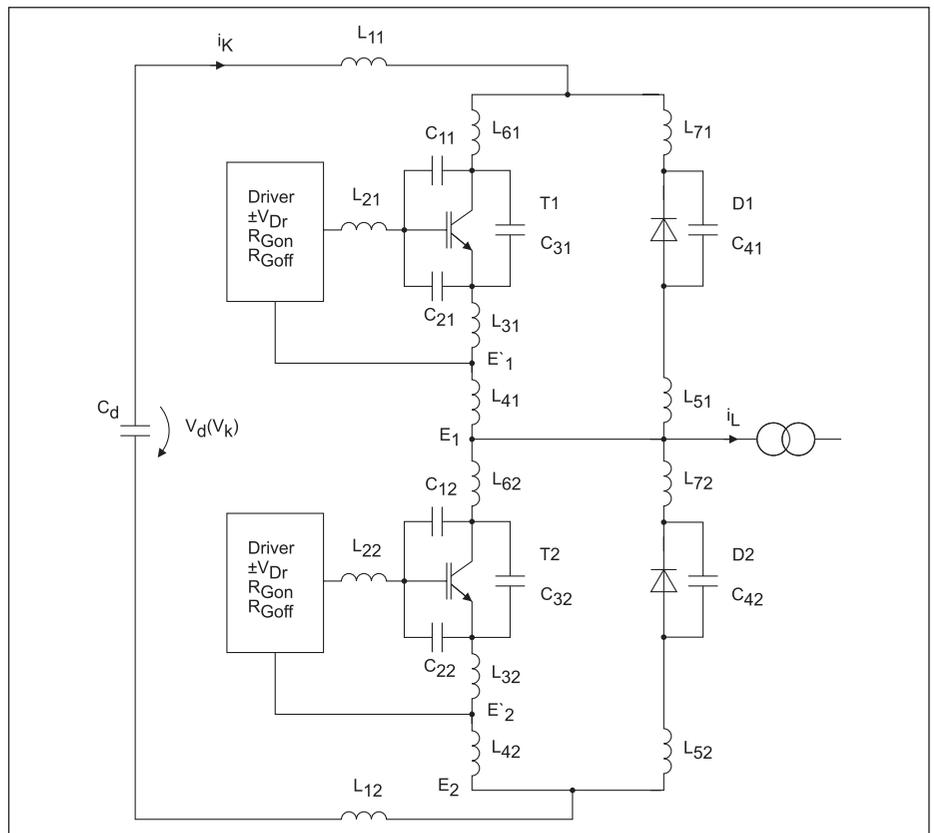


Рис. 2. Эквивалентная схема полумоста с распределенными индуктивностями и емкостями

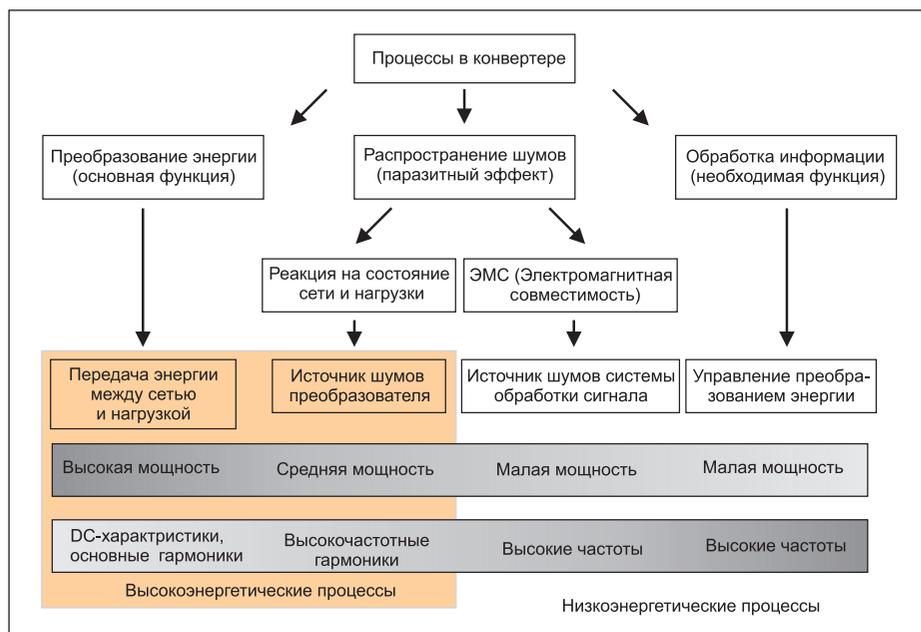


Рис. 3. Энергетические процессы в конвертерах [4]

минимизации влияния L_{31} и L_{32} силовые модули, как правило, имеют отдельные сигнальные выводы эмиттера.

Если несколько драйверов нижнего плеча (BOT) питаются от общего источника питания, связанного с шиной DC, наличие паразитных индуктивностей между цепью заземления платы управления и отрицательным потенциалом звена постоянного тока может вызвать нежелательные осцилляции в контуре заземления. Эта проблема решается за счет высокочастотной стабилизации напряжения питания выходного каскада драйвера или, в мощных преобразователях, путем гальванической развязки плат управления каскадами BOT IGBT.

Индуктивности L_{21} и L_{22}

Индуктивности L_{21} и L_{22} находятся в цепи затвора IGBT. Помимо увеличения импеданса выходной цепи драйвера, их наличие может привести к паразитным осцилляциям на входной емкости транзистора. Для исключения этого эффекта связь между драйвером и IGBT должна иметь минимальную длину и быть низкоиндуктивной (например, выполняться витой парой). Увеличение сопротивления затвора позволяет демпфировать колебания, однако это приводит к увеличению динамических потерь в транзисторе. Более подробную информацию можно найти в [3].

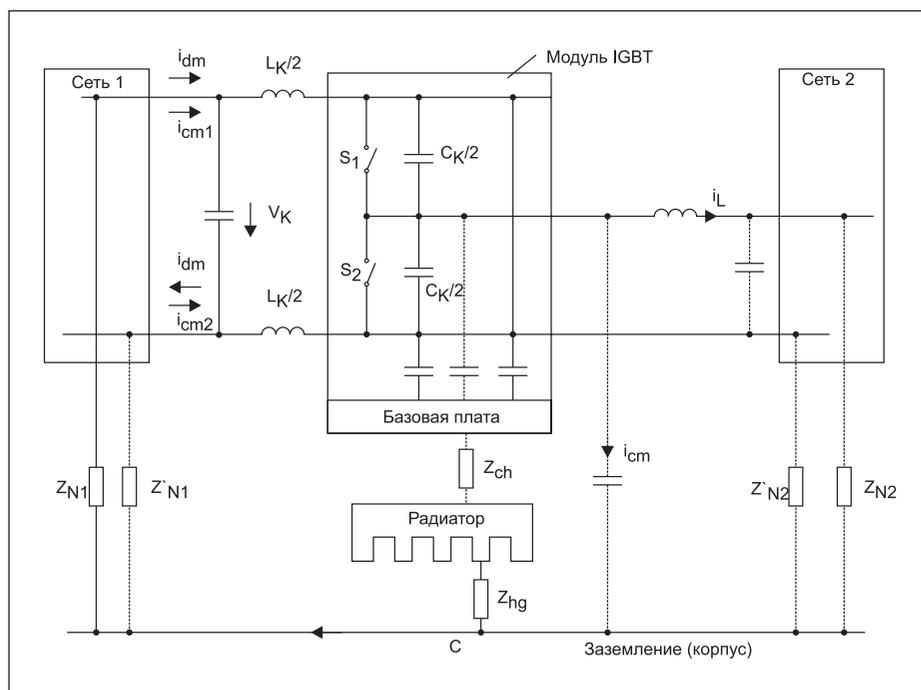


Рис. 4. Эквивалентная схема для анализа шумовых характеристик полумостового каскада

Емкости

Емкости C_{XX} (нелинейные, зависящие от напряжения), показанные на рис. 1, являются паразитными компонентами силовых полупроводников, поэтому не могут быть изменены пользователем. Они определяют минимальную емкость коммутации C_K и обеспечивают некоторое снижение рассеиваемой мощности при выключении.

Дополнительные потери генерируются в процессе включения из-за перезарядки паразитных емкостей; при использовании высокочастотных MOSFET этот факт необходимо учитывать на частотах свыше 100 кГц. Емкости C_{11} и C_{12} формируют т. н. эффект Миллера и динамическую dv/dt обратную связь «коллектор–затвор», являющуюся причиной образования «плато Миллера» и замедляющую процесс переключения.

Преобразователь следует проектировать таким образом, чтобы исключить сильные емкостные связи между цепями затвора и коллектора (стока), а также затвора и эмиттера (истока) вне модуля, которые способны создать высокочастотные паразитные колебания. Этот аспект является наиболее важным при использовании быстрых высоковольтных ключей MOSFET и SiC-MOSFET.

Проблемы ЕМИ

Энергетические процессы в преобразователях

Процессы, происходящие в импульсных преобразовательных системах, обеспечивают передачу энергии под контролем устройства управления и одновременно создают нежелательные шумы при коммутации силовых полупроводников (рис. 3).

Эти процессы можно разделить на высокоэнергетические, способные генерировать помехи в питающей сети и нагрузке в диапазоне частот от основной до ~ 9 кГц, и низкоэнергетические на частотах от 9 кГц до 30 МГц, где происходит формирование и распространение шумов и непроводящих токов. В низкочастотном диапазоне такие эффекты можно назвать обратной связью «конвертер–сеть», они характеризуются дискретными гармоническими колебаниями тока на частотах примерно до 2 кГц. В ВЧ-диапазоне эти осцилляции создают радиочастотные помехи, их спектр измеряется в дБ/МВ.

Такие понятия, как нулевой ток, ток утечки или несимметричное напряжение помех, отличаются только с точки зрения их влияния в разных частотных диапазонах и по их зависимости от динамических характеристик ключей.

Причины возникновения шумовых токов

Компания SEMIKRON уделяет большое внимание проблемам обеспечения ЭМС. Для анализа процесса генерации и распространения помех используется эквивалентная схема, приведенная на рис. 4, где ключи S_1 и S_2 ими-

тируют работу транзисторов полумостового каскада. В режиме «жесткого переключения» на индуктивную нагрузку, когда значения L_K (индуктивность шин питания) и C_K (эквивалентные коммутационные емкости) минимальны, ток полумоста коммутируется со скоростью di/dt , определяемой характеристиками силовых транзисторов. При открытии одного из ключей происходит обратное восстановление оппозитного диода, который до этого был в состоянии проводимости. В этот момент, кроме тока нагрузки I_L , через транзистор течет ток обратного восстановления i_{RR} , скорость изменения которого di_{RR}/dt зависит от характеристик диода, а также значений I_L , V_K и C_K .

Общая эффективная емкость включает в себя все составляющие C_{Σ} , расположенные относительно нейтрали. В процессе генерации шумов участвуют импедансы цепей между точками коммутации напряжения и нулевым потенциалом, а также параллельные импедансы емкостей.

Переключение транзистора S_1 приводит к появлению симметричного (дифференциального) тока i_{dm} в параллельном ему контуре питания (Сеть 1). При завершении коммутационного цикла процесс обратного восстановления диода ключа S_2 создает перенапряжение dv/dt на индуктивности шины L_K , амплитуда которого пропорциональна скорости восстановления di_{RR}/dt и величине L_K . Результирующий синфазный ток i_{cm} асимметрично протекает через шину заземления и цепи, параллельные коммутационным емкостям C_K .

Использование режима «мягкого включения» ZCS (Zero Current Switch — коммутация при нулевом токе) за счет увеличения L_K позволяет снизить значение di/dt и, следовательно, уровень помех, вызываемых дифференциальными токами. В то же время с ростом индуктивности будут возрастать перенапряжения, асимметричные токи и создаваемые ими синфазные помехи.

В начале процесса коммутации величина dv/dt определяется динамическими характеристиками транзистора S_1 . Скачок напряжения в конце цикла переключения зависит от параметров обратного восстановления диода S_2 . Использование режима ZCS уменьшает симметричный ток помехи и изменяет диапазон частот асимметричных токов без значительного их снижения.

Коммутация емкости C_K начинается после активного выключения S_1 . Закрывание ключа S_2 приводит к появлению «емкостного» переходного процесса. В режиме «жесткого переключения» ток синфазной помехи определяется параметрами S_1 и импедансами цепей, связанных с земляной шиной и параллельных коммутационным емкостям C_K . Характер переходного процесса и, соответственно, уровень шумовых токов в данном случае зависят от характеристик выключения S_1 и включения S_2 .

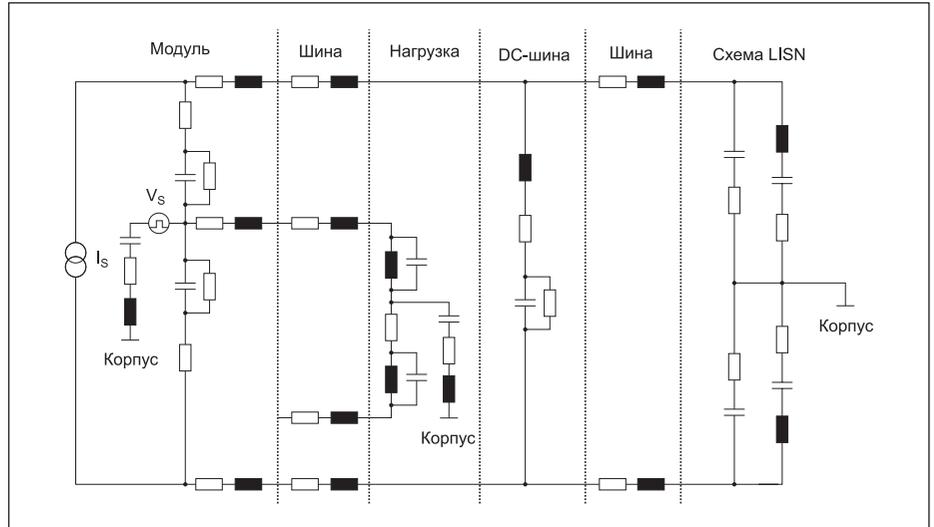


Рис. 5. Эквивалентная схема понижающего DC/DC-конвертера

Для обеспечения режима «мягкого включения», или ZVS (Zero Voltage Switch — коммутация при нулевом напряжении), необходимо увеличить значение C_K . Замедление процесса нарастания напряжения dv/dt уменьшает уровень асимметричных токов.

После завершения цикла процесс начинается с начальной стадии включения тока со скоростью di/dt , определяемой свойствами S_1 при пониженном напряжении. Задержка фронта dv/dt позволяет снизить уровень асимметричных токов при коммутации напряжения. Пассивное включение S_2 определяет значение dv/dt во второй фазе переключения тока.

Асимметричная токовая помеха снижается в режиме ZVS без заметного изменения симметричного тока. Тем не менее увеличение C_K приведет к уменьшению симметричного тока в контуре питания (сеть 1) пропорционально соотношению емкостей, образующих токовый делитель. Таким образом, инвертор, работающий с «мягкой коммутацией» и контролем фазового сдвига при включении или выключении (резонансный или

квазирезонансный), имеет низкий уровень дифференциальных или синфазных помех в зависимости от того, какой режим используется (ZCS или ZVS).

В преобразователях с «дополнительными» импульсными каскадами, где режимы ZVS и ZCS включаются поочередно, токи помех не будут заметно снижаться по сравнению с вариантом «жесткой коммутации», поскольку высокие значения di/dt и dv/dt присутствуют в системе в течение рабочего цикла.

Пути распространения помех

Измерение уровней радиопомех, излучаемых конвертером в сеть, производится на сетевых клеммах относительно шины заземления. Для анализа спектра токов помех SEMIKRON использует более сложную эквивалентную схему, приведенную на рис. 5.

На схеме (функционально это понижающий DC/DC-конвертер) источник питания представлен в виде узла LISN (Line Impedance Stabilization Network — цепь стабилизации импеданса сети), а контур нагрузки заменен эквивалентной схемой «Нагрузка».

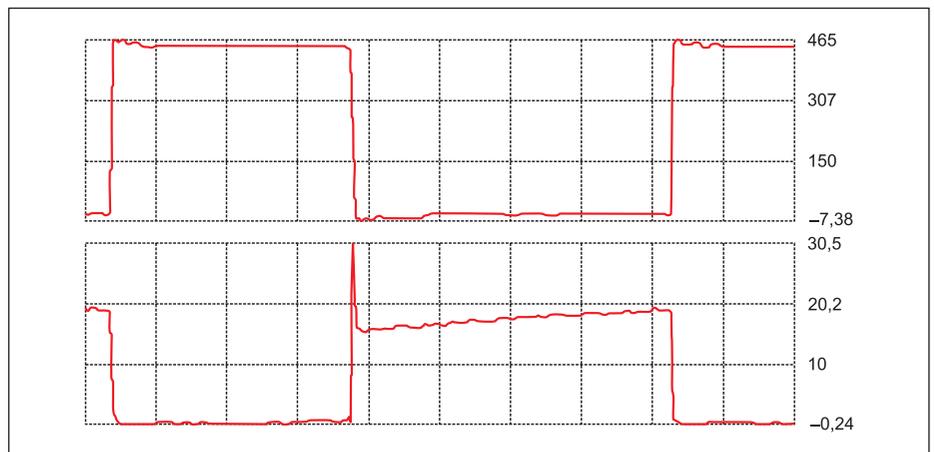


Рис. 6. Типовые кривые переключения IGBT: напряжение (В, сверху), ток (А, снизу) [5]

пользуется при проведении стандартных тестов ЕМИ/ЕМС, ее структура определена международной электротехнической комиссией IEC. Она представляет собой НЧ-фильтр, как правило размещаемый между АС- или DC-источником и тестируемым оборудованием и имеющий заданный импеданс, необходимый для измерения уровня радиочастотных шумов. Узел LISN изолирует нежелательные RF-сигналы от источника питания, кроме того, он может использоваться для прогнозирования уровня кондуктивных помех при диагностике и предварительной проверке на соответствие требованиям стандартов.

Паразитные параметры силового модуля имитируются эквивалентной RLC-схемой «Модуль». Источники помех заданы генера-

тором импульсного тока I_S для дифференциальных токов помех и генератором импульсного напряжения V_S (в его состав также входит полумост IGBT) для синфазных токов помех. Характеристики полупроводниковых приборов являются времязависимыми, типовые кривые переключения IGBT представлены на рис. 6. Параметры эквивалентных RLC-цепей подобраны таким образом, чтобы отобразить частотные свойства компонентов схемы.

Детектирование сигналов радиопомех производится путем селективных измерений флуктуаций напряжения на клеммах подключения сети к инвертору и выводах заземления.

Все низкочастотные импульсные элементы имеют распределенные индуктивности,

сопротивления и емкости, которые при моделировании показывают четкую частотную зависимость. Для анализа процесса образования асимметричных помех были разработаны специальные SPICE-модели силовых ключей и антипараллельных диодов, особое внимание в которых уделялось корректному отображению временных характеристик тока коллектора и напряжения «коллектор–эмиттер». Подобные модели достоверно имитируют процессы включения и выключения транзисторов с учетом эффектов обратного восстановления оппозитного диода и токового «хвоста» IGBT.

Данные, полученные при моделировании эквивалентной схемы, показывают практически полное совпадение с результатами из-

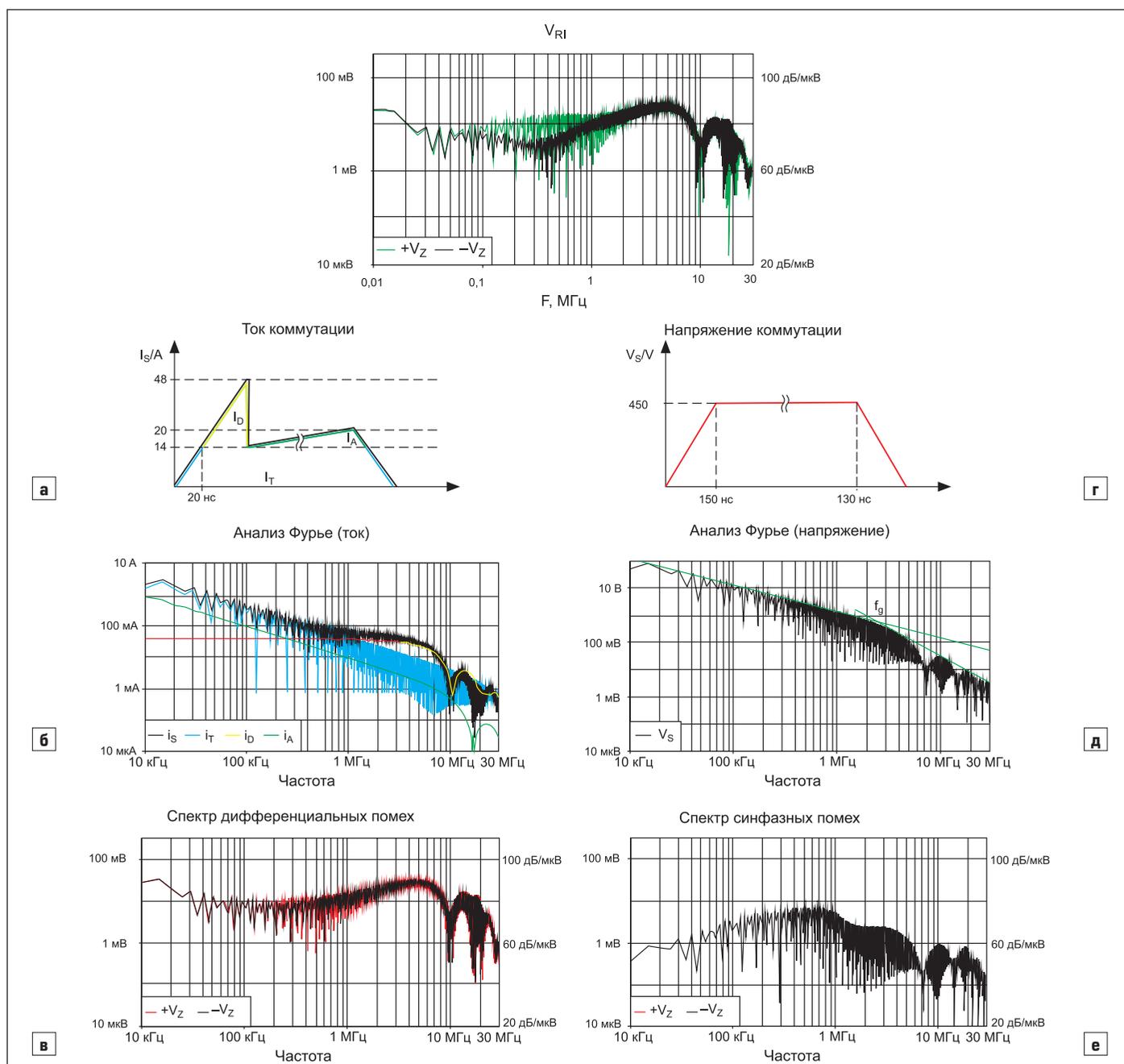


Рис. 7. Результаты моделирования режимов работы модуля NPT IGBT (50 А, 1200 В)

мерений, проведенных на реальных устройствах.

На рис. 7 показаны спектры сигналов помех, полученные при моделировании эквивалентной схемы (рис. 5). Исследования производились при следующих условиях: напряжение питания 450 В, выходной ток 20 А, частота коммутации 5 кГц. При анализе использовались усовершенствованные модели NPT IGBT-кристаллов, применяемых в полумостовом модуле SKM75GB125.

Эквивалентная схема, позволяющая исследовать пути возникновения и распространения помех, дает возможность оптимизировать конструкцию модуля с точки зрения снижения EMI. Задача состоит в повышении импеданса контуров, в которых наводятся токи помех, или создании короткозамкнутых цепей для источников шумов с помощью селективных подавляющих фильтров.

Дифференциальные токи помех замыкаются через емкости источника питания и коммутационные емкости. Идеальные конденсаторы, подключенные к транзисторам S_1 и S_2 , могли бы создать требуемые короткозамкнутые контуры. Синфазные токи проходят через шину заземления и паразитные емкости заземления. Соответственно, для их подавления необходимо обеспечить высокий импеданс во всех коммутируемых цепях, имеющих значительные перепады напряжения относительно корпуса. На схеме, приведенной на рис. 4, снижение уровня помех может достигаться за счет уменьшения распределенных емкостей, связывающих силовой модуль с базовой платой и радиатором.

Одним из путей подавления паразитных элементов является гальваническая изоляция источника питания схемы управления затворами. Если драйвер не связан по питанию с нулевой шиной, то в модуле не возникают дополнительные токи смещения, являющиеся источником синфазных шумов. Излучение, вызванное токами, проходящими через паразитные емкости заземления, может быть снижено за счет применения специальных изолирующих и экранирующих материалов. Пути распространения помех по энергетическим и сигнальным цепям устройств управления IGBT рассмотрены в [4].

Другие источники EMI

Циклические режимы работы силовых полупроводниковых приборов с крутыми фронтами, а также высокие частоты переключения тока и напряжения рассматриваются как основные причины возникновения электромагнитных помех. Кроме этого, в [9] анализируются дополнительные компоненты и паразитные колебания, которые определены в качестве причин EMI, не связанных с работой схемы (частоты в диапазоне 100 Гц...30 МГц). Их описание, причины и применяемые контрмеры представлены таблице 3.

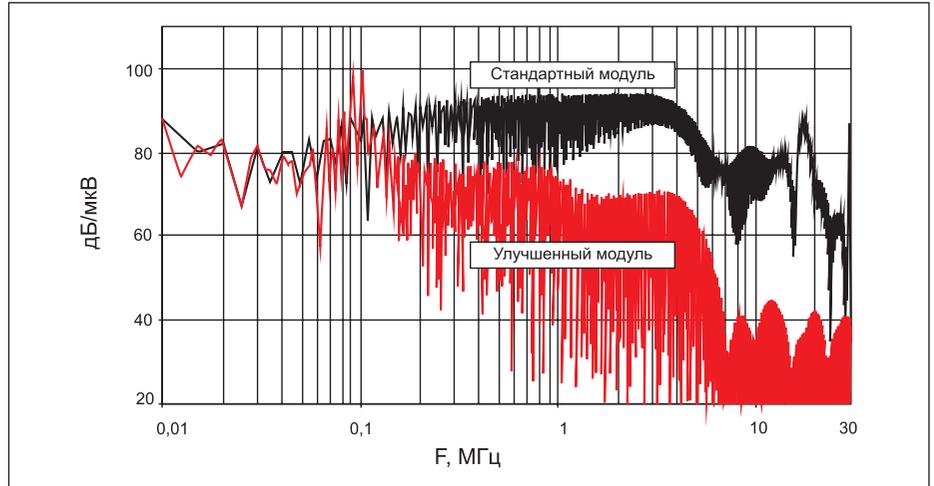


Рис. 8. Спектр помех стандартного и оптимизированного модуля IGBT [38]. Режимы измерения: $V_{DC} = 450$ В, $I_{load} = 20$ А, $f_{sw} = 5$ кГц

Способы подавления EMI

Обычные способы подавления кондуктивных помех основаны на использовании специализированных или стандартных EMI-фильтров, которые устанавливаются в цепях питания и нагрузки. В соответствии с заданными ограничениями характеристик для определенного типа устройств или приложений (определяются в терминах стойкости к EMI национальными и международными стандартами для кондуктивных и излучаемых электромагнитных помех) используются различные типы фильтров. Они должны обеспечивать стабилизацию импеданса в системе, включающей сеть и стандартизованную тестовую сборку, и гарантировать работу в пределах заданных лимитов во всех частотных диапазонах.

При подобном эмпирическом подходе используемые фильтры часто оказываются сложными и дорогостоящими. Независимо от того, было ли использовано моделирование для оптимизации EMC всей системы или нет, показатели EMC должны быть проверены индивидуально для каждого приложения, поскольку генерирование модели и параметризация процессов занимают довольно много времени. Таким образом, при проектировании системы следует с самого начала анализировать возможное воздействие электромагнитных помех и оптимизировать пути их распространения, начиная от источников EMI с учетом доступных точек контроля. Оптимизация подразумевает либо обеспечение высокоимпедансных путей распространения шумовых токов за счет избирательно блокирующих цепей, либо соз-

Таблица 3. Паразитные колебания, являющиеся причинами электромагнитных помех

Вид	Описание	Причины возникновения	Контрмеры
LC-осцилляции	Колебания, возникающие при переключении силовых полупроводниковых приборов (IGBT, MOSFET, диодов)	Возбуждение резонансных контуров, состоящих из нелинейных полупроводниковых емкостей и паразитных элементов (L, C). Диапазон частот 10–100 МГц.	Оптимизация топологии схемы, уменьшение скорости переключения, ограничение di/dt , dv/dt с помощью внешних цепей.
	Колебания между параллельно или последовательно соединенными чипами или модулями IGBT/MOSFET/FWD	Разброс параметров чипов; асимметрия параллельных/последовательных цепей (относится к кристаллам и модулям). Диапазон частот 10–30 МГц.	Оптимизация топологии схемы (балансировка цепей), выбор резисторов затворов, оптимизация топологии размещения чипов, снижение скорости коммутации, ограничение di/dt , dv/dt с помощью внешних цепей.
Осцилляции при переносе заряда	PETT-осцилляции (Plasma Extraction Transit Time)	Колебания возникают в фазе «хвостового» тока при выключении «биполярной составляющей» IGBT и диодов с плавным восстановлением; зона пространственного заряда сталкивается с массой свободных носителей заряда, в результате формируется «хвост» тока. PETT-колебания проявляются в виде излучаемых электромагнитных помех. Диапазон частот 200–800 МГц.	Подавление в конструкции модуля LC колебательных контуров с резонансными частотами в диапазоне PETT.
	IMPATT-осцилляции (Impact Ionisation (Avalanche) Transit Time)	Динамический процесс при выключении диода; электрическое поле взаимодействует с остаточной массой свободных носителей заряда; диод динамически переходит в состояние лавинного пробоя (электронная ударная ионизация). IMPATT-колебания проявляются в форме высокоэнергетических излучаемых электромагнитных помех. Диапазон частот 200–900 МГц.	Оптимизация конструкции чипа.

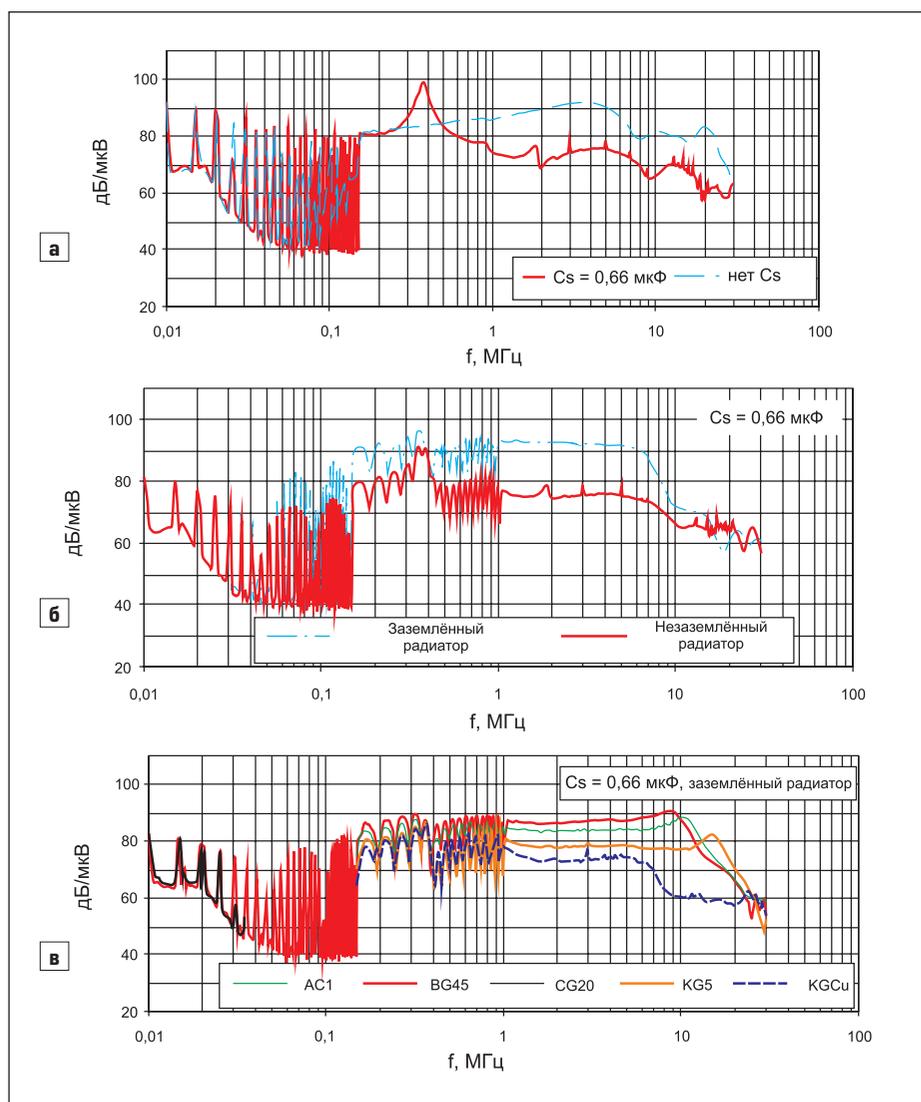


Рис. 9. Изменение спектрального состава ЕМИ при наличии снабберного конденсатора (а), заземлении теплоотвода (б), использовании различных изоляционных материалов (в)

дание низкоимпедансных цепей короткого замыкания шумовых токов с помощью селективных фильтрующих цепей.

Некоторые методы подавления помех описаны далее применительно к рис. 4. Симметричные шумовые токи должны шунтироваться емкостью коммутируемого источника напряжения. Для создания цепей короткого замыкания этих токов к транзисторам 1 и 2 подключаются идеальные емкости, при этом отсутствует влияние импедансов любых цепей.

Радиопомехи с измеряемым уровнем напряжения, обусловленные емкостными пульсациями напряжения, приводят к образованию токов в параллельных цепях. Поэтому все меры, которые принимаются для уменьшения симметричных токов, направлены на выбор соответствующих фильтров, подключаемых параллельно линиям коммутируемого напряжения. Чем ближе находятся идеальные емкости (с низким внутренним сопротивлением и индуктивностью) и чем ближе фильтрующая цепь подсоединяется к выводам силовых ключей, тем выше эффективность подавления ЕМИ.

Асимметричные токи помех преимущественно передаются через линии заземления. Для подавления шумов очень важно обеспечить высокий импеданс во всех точках, где наблюдаются крутые перепады напряжения относительно земли, что позволяет одновременно ограничить потенциальные всплески и в недоступных узлах коммутации. В примере с эквивалентной схемой на рис. 4 подавление помех изначально реализовано за счет снижения паразитных емкостей изолированных компонентов драйверов, а также емкостей силовых модулей относительно базовой платы и радиатора.

Если отсутствует информация о паразитных коммутационных параметрах драйвера или дополнительной энергии относительно потенциала нейтрали, это значит, что токи смещения не проходят в цепь заземления, т. е. она замкнута внутри устройства. Соответственно, отсутствуют и асимметричные токи помех. Поскольку в силовых модулях они распространяются через базовую плату, то уровень помех может быть уменьшен путем оптимизации

компоновки модуля и соответствующего выбора материалов [5].

Меры подавления ЕМИ, реализуемые вблизи полупроводниковых чипов, могут значительно улучшить ситуацию, как показано на рис. 8 на примере модифицированного модуля IGBT SEMIKRON [5]. Уровень генерируемых им ЕМИ на 15–25 дБ ниже, чем у стандартного силового ключа. Несколько образцов модифицированных модулей были испытаны в составе резонансного преобразователя в режиме ZVS. Отсутствие влияния токов обратного восстановления и меньший уровень dv/dt , свойственные данным применениям, приводят к значительному снижению излучения помех, что иллюстрирует рис. 9б. Дополнительного улучшения спектрального состава удается достичь при использовании снабберных конденсаторов.

Рекомендация по подключению к сети 2 через дроссель, как показано на рис. 4, остается в силе. Снижение величины паразитной емкости достигается только за счет уменьшения длины соединения до минимума. В идеале LC-фильтр должен быть подключен непосредственно к точкам с динамически меняющимся напряжением: благодаря индуктивности фильтра потенциальные скачки ослабляются до такой степени, что все другие связанные емкости в сети 2 (рис. 4) не смогут создавать заметных асимметричных шумовых токов. Если сеть 2 рассматривается как точка подключения источника питания, где производятся стандартные измерения LISN, то это абсолютно необходимо, т. е. LC-цепь должна быть частью ЕМИ-фильтра. В дополнение к фильтрации ЕМИ на практике используются дополнительные меры по заземлению и экранированию, улучшающие ситуацию с ними.

На частотах выше 200 кГц рост электромагнитного излучения дифференциальных помех обусловлен, прежде всего, влиянием паразитной индуктивности конденсаторов DC-шины. Графики, показанные на рис. 9, демонстрируют эффект от применения снабберных конденсаторов C_S , устанавливаемых непосредственно на DC-терминалах модуля. Причиной снижения уровня ЕМИ является шунтирующее действие снаббера по отношению к высокочастотному сигналу помехи. Резонанс, наблюдаемый на графике в районе 400 кГц (рис. 9а), вызывается параллельным контуром, состоящим из C_S и паразитной индуктивности шин и конденсаторов звена постоянного тока. Выше этой точки уровень излучения падает, характер кривой при наличии C_S определяется собственной индуктивностью и сопротивлением снабберного конденсатора на частотах свыше 2 МГц.

На рис. 9б приведены спектры помех, полученные при заземленном и незаземленном радиаторе. В условиях заземленного теплоотвода уровень ЕМИ возрастает с 75 дБ/мкВ до примерно 92 дБ/мкВ в диапазоне частот 0,2–8 МГц. В данном случае речь идет о синфазных помехах, наводимых

высокочастотными токами, текущими через паразитные емкости заземления C_p . Эти емкости образуются изолирующими материалами, находящимися между коллекторами IGBT (или катодами антипараллельных диодов) и теплоотводом. Величина C_p зависит от площади A , толщины d и диэлектрической проницаемости ϵ изолирующего материала: $C_p = \epsilon \cdot A/d$.

Графики на рис. 9в показывают, что параметры изолирующего слоя сильнее всего влияют на спектр синфазных помех на частотах 0,5–8 МГц, их уровень изменяется в диапазоне 72–88 дБ/мкВ. Наихудшая ситуация наблюдается при использовании в качестве изолятора кремнийорганического (силиконового) каучука. Керамические материалы, такие как оксид алюминия Al_2O_3 , позволяют получить лучшие результаты, однако минимальный уровень ЕМІ обеспечивается при использовании силиконового каучука с медным экранирующим слоем, соединенным с одним из выводов ДС-шины.

Спектральный состав ЕМІ практически не зависит от температуры, с ее ростом незначительно увеличивается уровень излучения, что связано с изменением характера обратного восстановления диодов.

Заключение

Чтобы наметить наилучшие способы борьбы с помехами и обеспечить требуемый уровень ЕМС, следует проанализировать источники и пути распространения электромагнитного излучения. Основными факторами, влияющими на уровень дифференциальных помех, являются ток обратного восстановления антипараллельных диодов и наличие распределенных индуктивностей

у конденсаторов и соединительных цепей, участвующих в процессе коммутации мощных токов. Паразитные компоненты схемы образуют контуры, инициирующие появление резонансных пиков. Соответственно, для снижения уровня ЕМІ необходимо уменьшать токи обратного восстановления диодов и паразитные индуктивности элементов звена постоянного тока. ■

Литература

1. AN-7006: IGBT Peak Voltage Measurement and Snubber Capacitor Specification; www.semikron.com
2. Колпаков А. И. Снабберы и перенапряжения // Компоненты и технологии. 2006. № 5.
3. AN-7002: Connection of Gate Drivers; www.semikron.com
4. Zverev I. Untersuchungen energiearmer Prozesse in Stromrichtern. Diss. University of Rostock. 1999. ISLE Verlag, Ilmenau.
5. Klotz F. Leitungsgebundene elektrische Storemissionen von Leistungshalbleitertopologien. Diss. TU Ilmenau. 1997. ISLE Verlag.
6. Ralph Annacker, Markus Hermwille. 1200V Modules with Optimised IGBT and Diode Chips. Semikron Elektronik GmbH.
7. Application Manual Power Modules. Semikron International.
8. Experimental and Simulative Investigations of Conducted EMI Performance of IGBTs for 5-10kVA Converters. EUPEC Application Hints.
9. Lutz J. Halbleiter-Leistungsbaulemente: Physik, Eigenschaften, Zuverlässigkeit. Springer Verlag Berlin Heidelberg. 2006.
10. Колпаков А. И. Проблемы электромагнитной совместимости мощных импульсных преобразователей // Силовая электроника. 2006. № 2.

Статья опубликована в журнале «Силовая электроника» № 6'2017

Как уменьшить излучение с помощью полностью интегрированной развязки по шинам данных и питания

Александр ПОЛИКАРПОВ

В большинстве случаев требуется обеспечить гальваническое разделение источников питания и данных разных подсистем. Источники питания традиционно реализуются с помощью обратных, изолированных понижающих или двухтактных (пушпульных) DC/DC-преобразователей с трансформатором, который установлен после выпрямительной цепи во вторичной стороне. Однако к настоящему времени на рынке появились компактные, эффективные и полностью интегрированные кристаллы, в которых комбинируется изоляция данных и питания. На рисунках 1–2 показана структурная схема такого устройства.

Как правило, трансформатор с драйвером применяется для преобразования напряжения питания. Использование трансформатора в одной ИС позволяет интегрировать изолированный силовой преобразователь

в небольшой корпус. У этих очень компактных трансформаторов всего несколько витков (что позволяет уменьшить последовательное сопротивление), а магнитный сердечник часто отсутствует. Таким образом, DC/DC-преобразователь работает на очень высокой частоте величиной в несколько десятков МГц и выше.

В то же время, поскольку первичная и вторичная обмотки таких трансформаторов расположены очень близко друг к другу внутри корпуса, между двумя катушками возникает большая паразитная емкость, через которую на вторичную сторону проникают импульсы с крутыми фронтами (рис. 3). Поскольку две стороны трансформатора полностью развязаны, синфазный ток образует большой обратный контур через паразитные емкости платы. Этот ток является причиной излучения помех в изолированных системах. Две изолированных

части платы можно рассматривать как передающую дипольную антенну.

В дискретных реализациях излучаемые помехи ниже благодаря применению высокоиндуктивных трансформаторов с магнитными сердечниками и намного меньших коммутационных частот.

Мы обсудим несколько методов, позволяющих уменьшить излучаемые помехи в системах с помощью полностью интегрированных решений по развязке цепей передачи данных и питания.

Выбор интегрального устройства

Предлагаемые на рынке интегральные устройства для развязки цепей передачи данных и питания различаются по излучаемым электромагнитным помехам. Хорошо продуманная схема и цепь по управлению тактовыми сигналами позволяют уменьшить эти помехи на уровне устройства. На рисунке 4 представлен пример излучаемых помех установленным на оценочную плату изолятором ISOW7841, который отвечает требованиям стандарта CISPR22 Class B, и устройством, которое этим требованиям не отвечает. Сравнения выполнены на уровне кристалла.

Работа при меньшем входном напряжении

Изолированные силовые устройства работают в относительно широком диапазоне входного напряжения (как правило, в пределах 3,3–5,5 В), обеспечивая совместимость со стандартными источниками питания. По сравнению с устройствами, работающими от 5 В, у устройств с входным напряжением 3,3 В скорость нарастания напряжения встроенного DC/DC-

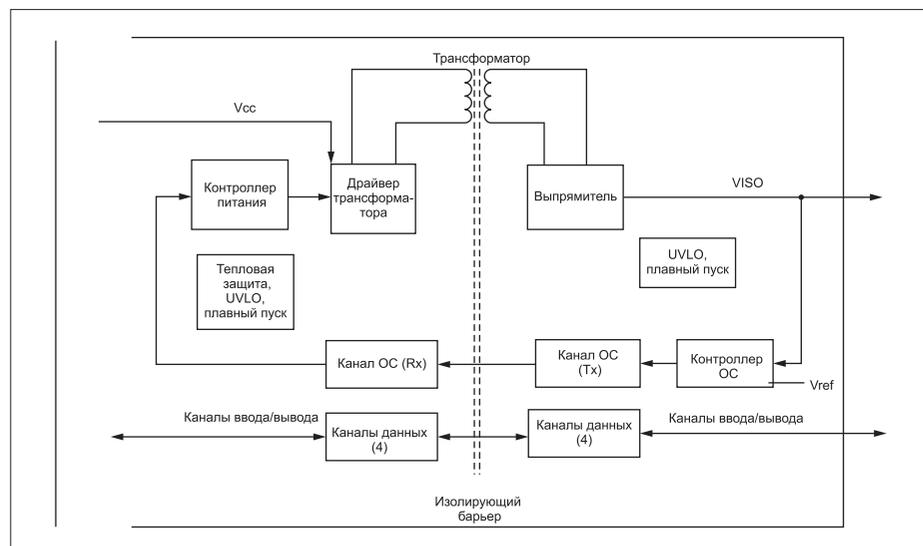


Рис. 1. Полностью интегрированное решение с изоляцией шин данных и питания

преобразователя меньше благодаря более низкому управляющему напряжению силовых транзисторов. В результате уменьшается синфазный ток через изолирующий барьер, что, в свою очередь, позволяет сократить уровень излучения. Из рисунка 5 видно, что излучение при использовании питающего напряжения величиной 3,3 В намного меньше, чем при 5 В.

Развязывающие конденсаторы, балластный резистор, ферритовые бусины

Как уже упоминалось, в устройствах с полностью интегрированной изолированной цепью питания используются высокие коммутационные частоты. В этих устройствах регулирование выходного напряжения осуществляется с помощью коэффициента заполнения. При включенном преобразователе потребляется большой ток с вывода питания V_{CC} (рис. 6). У этого тока имеется низкочастотная составляющая, которая, грубо говоря, прямо пропорциональна регулировочной полосе пропускания с обратной связью, и ВЧ-составляющая на коммутационной частоте и гармониках DC/DC-преобразователя.

Входные конденсаторы разной емкости ($C1 = 100$ нФ, $C2 = 1$ мкФ, $C3 = 100$ нФ) на входе микросхемы фильтруют ВЧ-составляющие и предупреждают их распространение по цепям питания основной платы. Необходимо установить эти конденсаторы как можно ближе к ИС, чтобы ограничить площадь контура 1. Непосредственно с этой микросхемой следует также установить конденсатор с наименьшей емкостью. Схожий банк конденсаторов, установленный в выходной части схемы, фильтрует переключающий ток во вторичной стороне DC/DC-преобразователя. Необходимо минимизировать площадь контура 2.

Несмотря на развязывающие конденсаторы, цепи питания основной платы по-прежнему потребляют некоторое количество ВЧ- и НЧ-тока (импульсы пикового тока величиной 100–500 мА продолжительностью в несколько микросекунд) в зависимости от выходного импеданса питающей сети. Если длина проводников входного источника питания велика, балластный резистор R_S и дополнительный конденсатор большей емкости C_F позволяют предотвратить протекание тока в цепь входного источника питания, что уменьшает уровень излучаемых помех. При этом уменьшается и ток в контуре 3.

Рекомендуемые значения резистора R_S находятся в диапазоне от 1 Ом при полной нагрузке (130 мА) до 5 Ом при малых нагрузках (<10 мА) на выводе V_{ISO} . Рекомендуемое значение емкости C_F составляет 100 мкФ. Эти значения можно скорректировать или удалить второстепенные компоненты с учетом уровня излучаемых помех. Установка в схе-

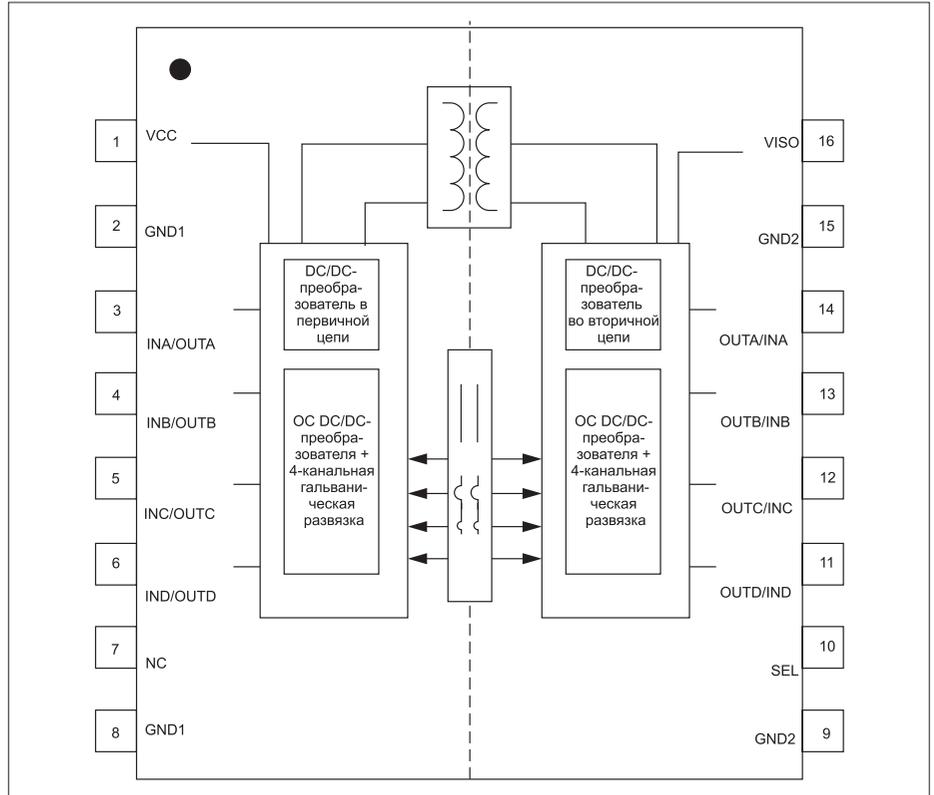


Рис. 2. Однокристальное решение с развязкой цепей данных и питания

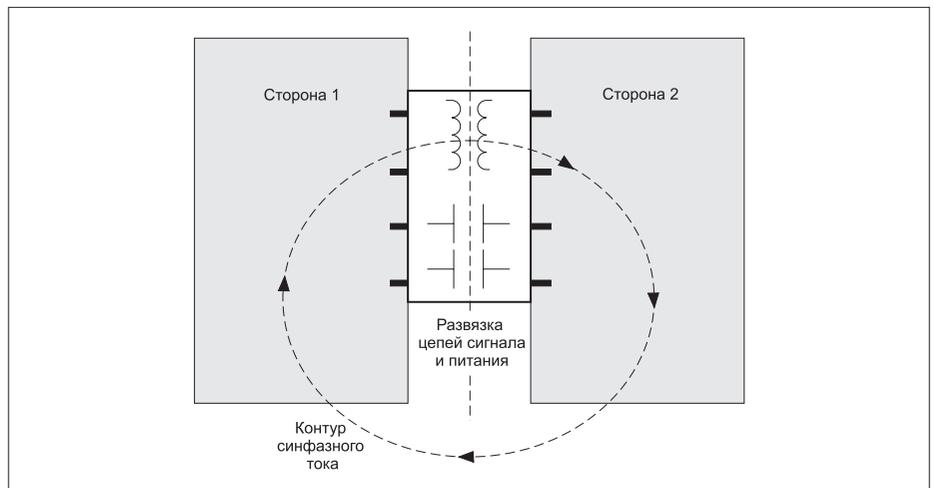


Рис. 3. Синфазные токи через изолирующий барьер образуют большой обратный контур

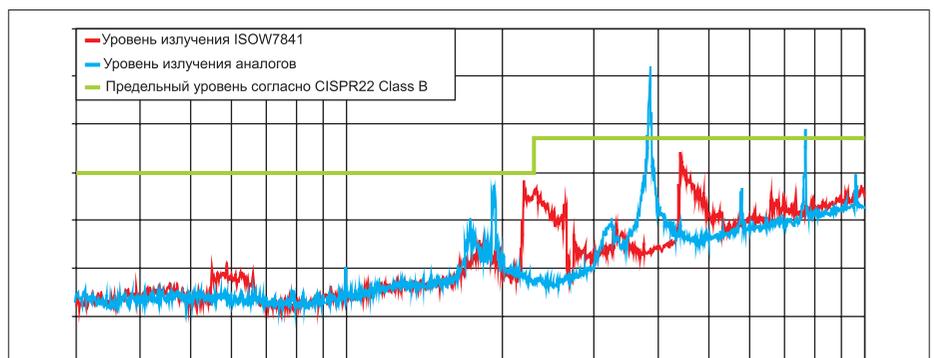


Рис. 4. Уровень излучения изолятора ISOW7841 и конкурирующих устройств при входном напряжении 5 В и нагрузке 80 мА



Рис. 5. Уровень излучения устройства ISOW7841 при входном напряжении величиной 5 и 3,3 В

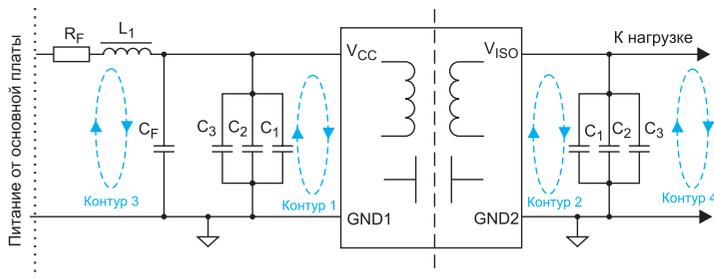


Рис. 6. Развязывающие конденсаторы и входной балластный резистор в цепи питания



Рис. 7. Оценочный модуль для изолятора ISOW7841

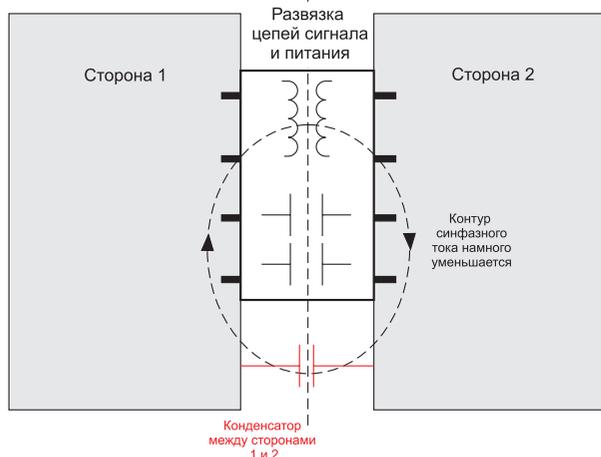


Рис. 8. Высоковольтный конденсатор между сторонами 1 и 2 уменьшает площадь контура синфазного тока

му ферритовой бусины L_1 предотвращает поступление ВЧ-шума в основную плату.

На рисунке 7 показана топология платы с развязывающими конденсаторами. В такой компоновке массив переходных отверстий по краям платы, предназначенных для объединения полигонов земли на разных слоях, создает экран Фарадея. В результате предотвращается воздействие излучаемых помех от внутренних шумящих проводников или плоскостей.

Использование межслоевого конденсатора

Как уже упоминалось, синфазный ток между первичной и вторичной сторонами, а также большой обратный контур — главные причины излучаемых помех в изолированных системах. Один из способов минимизировать токовый контур состоит в использовании высоковольтного конденсатора между сторонами 1 и 2. При этом конденсатор устанавливается как можно ближе к ИС (рис. 8).

К конденсаторам, которые используются в источниках питания в таких случаях, относятся высоковольтные компоненты Y2 (для поверхностного монтажа или с выводами с соответствующими значениями длины пути утечки и воздушных зазоров). Из-за индуктивности выводов и собственной паразитной индуктивности конденсаторы Y2 оказываются неэффективными на частотах выше 200 МГц. Чтобы обеспечить малоиндуктивную емкость, внутренние слои печатной платы должны перекрывать друг друга.

Рассмотрим пример с четырехслойной платой, у которой верхний слой является сигнальным, второй — заземляющим, третий слой используется для питания V_{CC} , четвертый — тоже сигнальный. Поскольку система изолирована, слои печатной платы разделены на две группы: слои стороны 1 ($Signal_1$, GND_1 и V_{CC1}) и слои стороны 2 ($Signal_2$, GND_2 и V_{CC2}). При увеличении длины внутренних слоев GND и V_{CC} в направлении другой стороны изолирующего барьера возникает перекрытие между слоями (рис. 9).

Стеклотекстолитовая область перекрытия, образованная в результате удлинения слоев GND_1 и V_{CC2} , обладает свойствами диэлектрика, создавая емкость между этими слоями. В быстрых переходных процессах, когда протекают синфазные токи, слои GND и V_{CC} рассматриваются как опорные. Следовательно, между опорными слоями стороны 1 и 2 возникает межслойная емкость. На рисунке 10 иллюстрируется объемное представление межслойной емкости, образованной в четырехслойной печатной плате.

С помощью уравнения (1) рассчитывается эквивалентная емкость, образованная между сторонами 1 и 2:

$$C_i = \epsilon \frac{A}{d}$$

где $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$; C_i — межслойная емкость; ϵ_0 — абсолютная диэлектрическая проницаемость воздуха равная 8,854 пФ/м; ϵ_r — относительная диэлектрическая проницаемость стеклотекстолита равная 4,2; A — величина области перекрытия; d — расстояние между слоями GND и V_{CC} .

Из уравнения (1) выходит, что величина межслойной емкости C_i для печатной платы, изображенной на рисунке 9, составляет около 30 пФ (см. исходные значения в таблице).

Межслойная емкость между двумя сторонами изолирующего барьера при соответствующем зазоре позволяет реализовать требования, предъявляемые к развязке системы. Стандарты электробезопасности, действующие в отношении конечного оборудования, и требования к рабочему напряжению определяют величину этого зазора. Большинство стандартов, определяющих требования к функциональной или базовой изоляции, не устанавливают значения минимального зазора между слоями сторон 1 и 2 одной плоскости или для разных плоскостей. В таких случаях целесообразно задавать наименьший зазор между перекрывающимися слоями, чтобы обеспечить наибольшее значение образованной емкости. Кроме того, необходимо учесть величину приложенного к барьеру рабочего напряжения и электрическую прочность изолирующего материала.

При необходимости обеспечить усиленную изоляцию при минимальном расстоянии между слоями сторон 1 и 2, находящимися на одной или разных плоскостях, в большинстве случаев допускается зазор величиной 0,4 мм в системах, работающих с напряжениями меньше 300 В_{СКЗ} и расстояние 0,6 мм для диапазона напряжения 300–600 В_{СКЗ}. Помимо требований к минимальному зазору регламентируется и величина выбросов напряжения. Например, в соответствии со стандартом IEC 66010-1 изделия должны выдержать испытание напряжением 3510 В_{СКЗ} в течение 5 с и импульсное испытание напряжением 6400 В для эксплуатации в системах с усиленной изоляцией в диапазоне сетевого напряжения 300–600 В_{СКЗ}. Чтобы устройства успешно прошли эти испытания, необходимо предусмотреть соответствующий межслойный зазор с учетом диэлектрической прочности изоляции. Например, у стеклотекстолита ее величина составляет 20 кВ/мм.

На рисунке 11 показано, как уменьшаются излучаемые помехи при использовании межслойной емкости. Если ее величина между двумя сторонами составляет 30 пФ, уровень помех падает до 10–20 дБ в зависимости от их частоты. При более высоких значениях емкости это ослабление увеличивается в еще большей мере.

Следует не только предусмотреть необходимый зазор для изолирующего барьера, но и уделить должное внимание краям печатной платы, где проходят проводники с разными напряжениями, которые в иных случа-

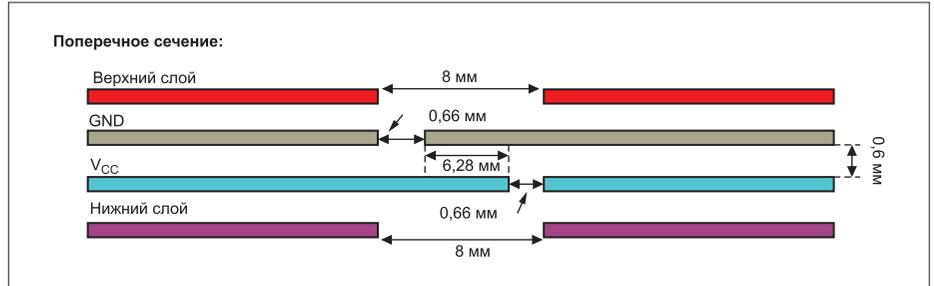


Рис. 9. Поперечное сечение слоев печатной платы с межслойной емкостью

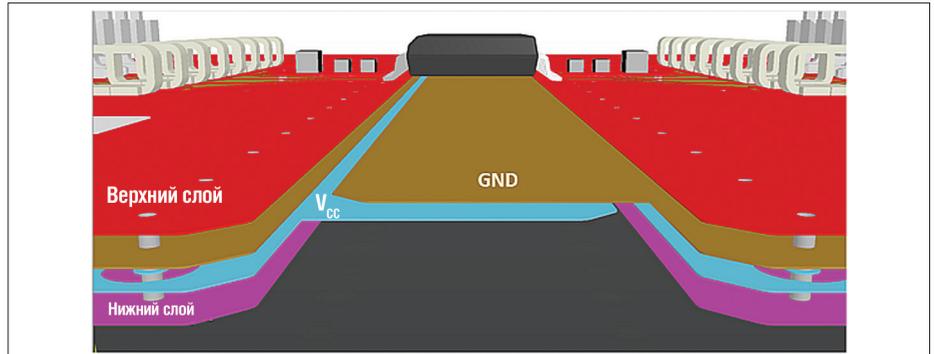


Рис. 10. Объемное представление слоев печатной платы с межслойной емкостью

Таблица. Исходные значения для расчета емкости в рассматриваемом случае

	ϵ_{FR4}	$\epsilon_0 \Phi / \text{м}$	Расстояние между слоями (d), мм	Длина проводника, мм	Ширина перекрытия, мм	C_i , пФ
Печатная плата	4,2	$8,85 \cdot 10^{-12}$	0,6	77,3	6,28	30,09

х имеют разную полярность. Острые углы и края проводников могут способствовать ионизации воздуха, поскольку они увеличивают напряженность электрического поля и становятся причиной появления канала пробоя при высоком напряжении. Во избежание этих нежелательных явлений на краю платы следует располагать внутренние слои, а вместо острых краев использовать края треугольной формы, на которых плотность заряда распределена более равномерно (рис. 12–14). Закругление углов и краев плоскостей позволяет улучшить конечное решение.

Несмотря на то, что внутренние слои печатной платы, полностью окруженные диэлектриком, допускают относительно малый зазор (что было установлено выше), верхний

и нижний сигнальные слои должны поддерживать использование намного больших зазоров. При расчете величины зазора необходимо учитывать возникающее перенапряжение, импульсы напряжения, а также условия эксплуатации, к которым относятся высота над уровнем моря и степень загрязнения воздуха.

Прямое соединение с защитным заземлением и соединение через конденсатор

Контроллер, или «холодная сторона» большинства изолированных систем, подключается к системному шасси, которое, в свою очередь, соединено с защитным за-

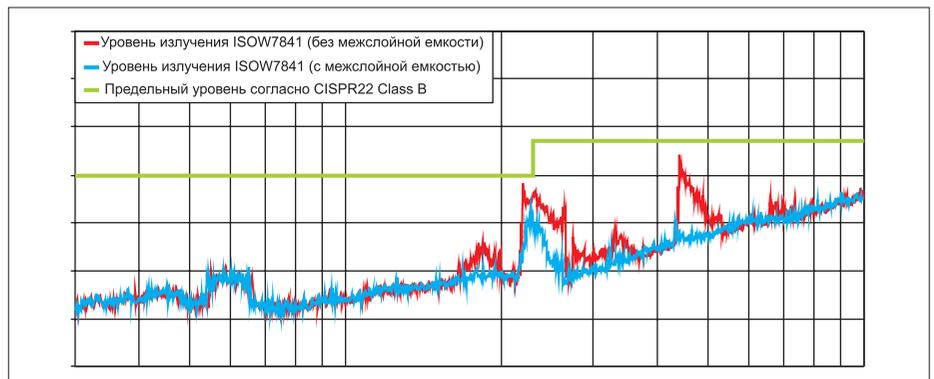


Рис. 11. Уровень помех устройства ISOW7841 при использовании межслойной емкости 30 пФ и без нее при входном напряжении 5 В и нагрузке 80 мА

землением. Благодаря этому соединению обеспечивается устойчивость заземления контроллерной стороны и уменьшается доля преобразования синфазного шума

в электромагнитное излучение. Таким образом, контроллерная сторона изолированной системы должна быть прочно соединена с защитным заземлением.

Изолированное заземление таких интерфейсов, как аналоговые и цифровые модули ввода/вывода, изолированный интерфейс RS-485 и CAN, может соединяться по переменному току с защитной землей через высоковольтные конденсаторы. Такая связь через емкость применяется, чтобы обеспечить возвратный тракт к защитному заземлению в случае электростатического разряда, бросков и кратковременных выбросов напряжения на шине и в кабелях системы ввода/вывода. Кроме того, это соединение позволяет уменьшить синфазный шум на изолированном заземлении, сократив, таким образом, излучаемые помехи, которые распространяются через интерфейс и кабели ввода/вывода.

На рисунке 15 приведен пример изолированной системы с интерфейсом RS-485, в которой применяется интегрированное устройство для развязки шин питания и сигнальных цепей. Заземление микроконтроллера напрямую подключено к земле, а вторичная сторона — к защитному заземлению через емкость, что минимизирует электромагнитное излучение от кабелей входного электропитания, а также от шины RS-485.

Синфазные дроссели

Длинные кабели или провода, подключенные к системе с DC/DC-преобразователем, могут собирать ВЧ-помехи при коммутации преобразователя и работать как антенны передатчиков. Таким образом, использование длинных кабелей приводит к появлению излучаемых помех высокого уровня. Во избежание этого следует делать контур синфазного тока как можно меньше, а кабели — как можно короче. Если же кабели по какой-то причине должны быть длинными и нельзя обеспечить хорошее подключение шасси и заземляющего контакта источника питания к заземлению, рекомендуется использовать дроссели (рис. 16) для ослабления синфазного шума. В случае применения силовых интегрированных изолированных решений дроссели уменьшают синфазный ток, а также уровень излучаемых помех. Синфазные дроссели устанавливаются на вход и выход источников питания или кабелей, подключенных к оборудованию.

Измерения с помощью испытательной установки

При измерении уровня излучаемых помех следует убедиться в том, что измеряется только излучение от испытуемого оборудования, а не от других частей испытательной установки.

Главной причиной излучения является появление антенн на печатной плате. Длинные кабели, которые применяются для питания системы, или зонды для измерения параметров могут работать как излучающие антенны. Во избежание этого нежелательного явления

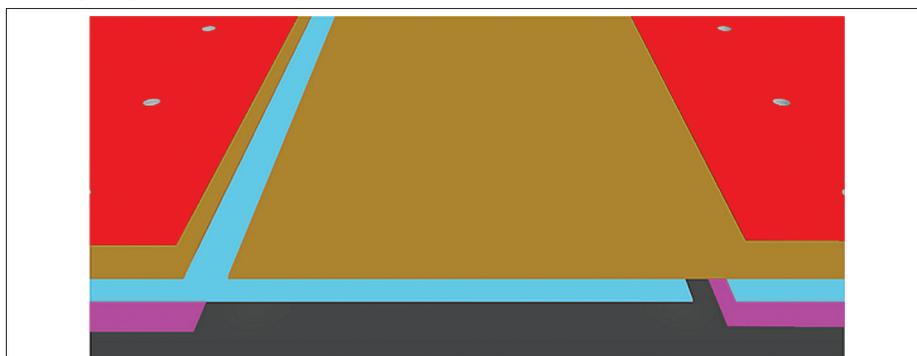


Рис. 12. Острые края проводников у края платы

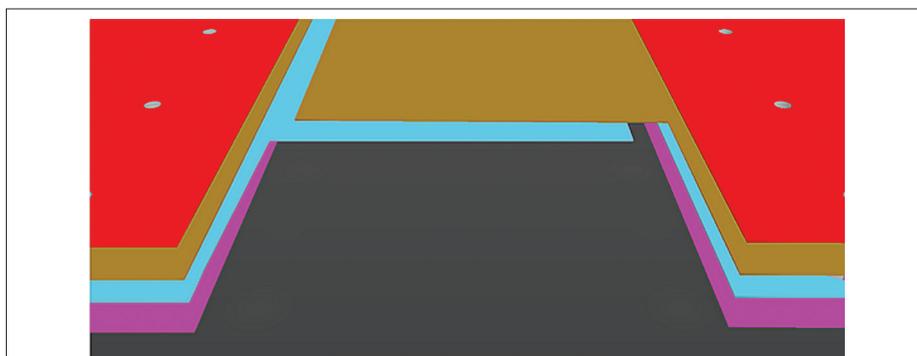


Рис. 13. Объединяющая плоскость удалена от краев платы



Рис. 14. Края треугольной формы позволяют улучшить работу платы при высоких напряжениях

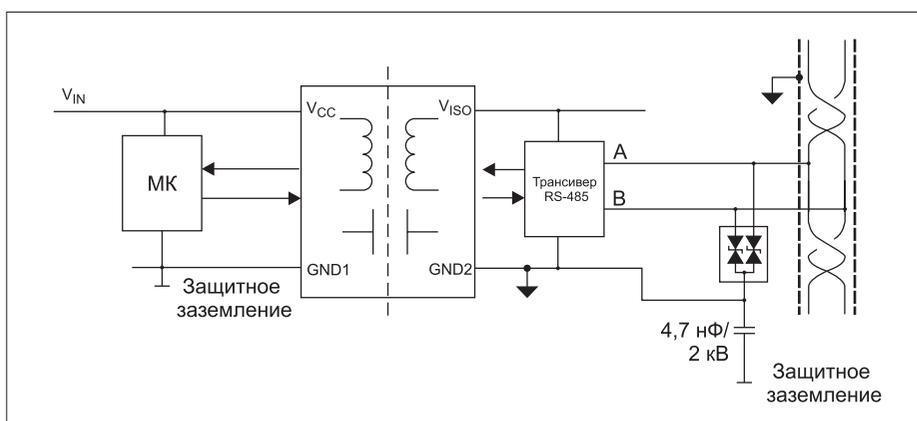


Рис. 15. Прямое и емкостное подключение к защитному заземлению в изолированной системе RS-485

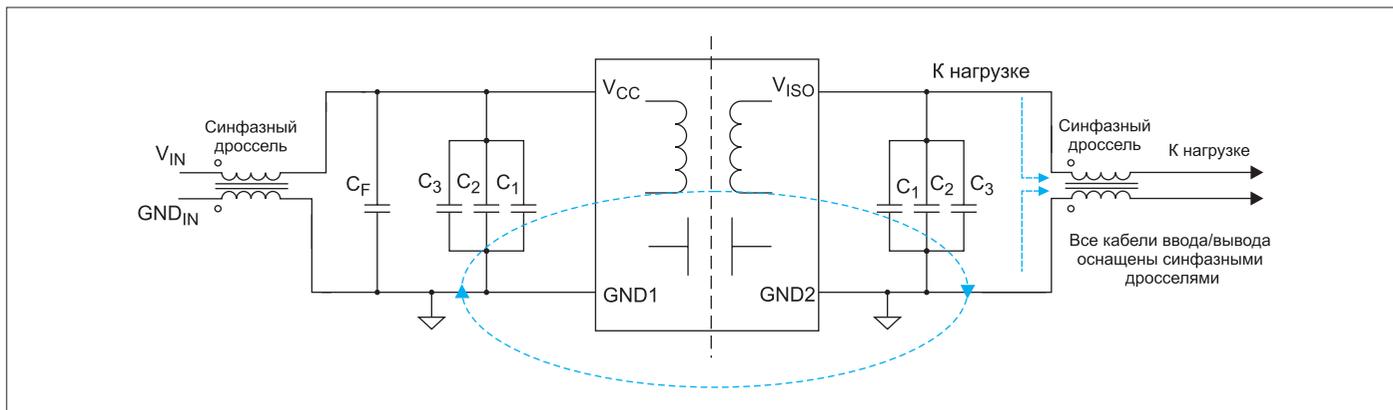


Рис. 16. Синфазные дроссели уменьшают излучаемые помехи на входе и выходе источника питания, а также в линиях ввода/вывода

испытательная установка должна как можно точнее моделировать условия эксплуатации системы. Необходимо с помощью экрана Фарадея защитить от излучения все вспомогательные средства, кроме испытываемой системы. Все контейнеры должны быть отделаны проводящим металлом — медью или алюминием. Подключаемые к системе кабели должны быть как можно короче, а модуль, с которым они соединены, должен находиться в клетке Фарадея.

Если силовые кабели должны быть достаточно длинными, рекомендуется устанавливать синфазные дроссели рядом с испытываемым устройством. При этом измеренный уровень излучения испытательной установки показывает, как нивелируется влияние

длинных кабелей. При необходимости модифицировать плату при тестировании, например при добавлении в нее компонентов, их следует устанавливать непосредственно на плату, а не подключать к ней с помощью длинных проводов.

Согласно стандартам, уровень излучаемых помех указывается как предельное квазипиковое значение, хотя можно использовать квазипиковый детектор для оперативного получения результатов.

Выводы

Применение устройств, изолирующих цепи данных и питания, упрощает проек-

тирование системы и позволяет сократить занимаемое на плате место. Использование встроенных трансформаторов с малой индуктивностью в этих устройствах приводит к необходимости задействовать высокие коммутационные частоты, что приводит к росту излучаемых помех по сравнению с системами на дискретных трансформаторах. Для уменьшения этих помех на системном уровне применяется меньшее напряжение питания, межслойные объединяющие емкости, фильтры и синфазные дроссели. При измерении уровня излучения необходимо убедиться в том, что испытываемое устройство или система не защищены, а входные кабели и кабели зонда полностью экранированы. ■

Статья опубликована в журнале «Электронные компоненты» № 5'2017



ООО НТЦ «Северо-Западная Лаборатория»

- Разработка и изготовление силовых фильтров радиопомех мощностью от 100 Вт до 300 кВт.
- Разработка и изготовление силовых фильтров для подавления промышленных помех для испытательных стендов и безэховых камер.
- Срочное решение проблем ЭМС на объекте.
- Заказныемоточные изделия (трансформаторы, дроссели, катушки индуктивности) по ТЗ или документации заказчика, на основе всех современных типов магнитопроводов (отечественных и импортных).
- С 2018 года предприятие производит продукцию категории качества «ВП»



196084, Санкт-Петербург, Варшавская ул. д.5а; e.pavlov@szlab.ru (812)369-38-97, 369-89-20, www.szlab.ru

Использование гальванического разделения цепей для улучшения электромагнитной совместимости

Борис ЛАРЧЕНКО
Borlarch160263@gmail.com

В статье рассматриваются способы использования гальванической развязки, позволяющей улучшить электромагнитную совместимость. Кратко описаны три технологии производства гальванических развязок и их основные отличия.

Введение

Электронные системы часто работают в условиях сложной электромагнитной обстановки. Причем это обстоятельство не всегда очевидно: например, проложенный рядом с оборудованием силовой кабель, о наличии которого никто не догадывается, может доставить серьезные неприятности. Прикосновение человека к прибору с плохо обеспеченным защитным заземлением может привести к электростатическому разряду. Сильный грозовой разряд способен вывести из строя входные каскады устройства, если провода, соединяющие компоненты системы, имеют достаточно большую длину.

Стандартные способы защиты устройства от таких нежелательных случаев хорошо известны. К ним относится применение TVS-диодов во всех входных каскадах, в т. ч.

на вводе шин питания, экранирование и заземление корпуса, экранирование сигнальных проводов. Мы рассмотрим влияние гальванического разделения цепей на электромагнитную совместимость (ЭМС). Этот способ защиты не так хорошо известен, и им нередко незаслуженно пренебрегают.

Гальваническое разделение цепей

На рисунке 1 показана упрощенная структурная схема электронного устройства без гальванического разделения цепей. На входах и на шине питания установлены защитные TVS-диоды, корпус заземлен. Поскольку современные TVS-диоды имеют очень малую паразитную емкость, их можно подключать к сигнальным линиям с высокоскоростными сигналами. Они способны защитить систему от импульсов мощностью несколько

киловатт и длительностью всего несколько пикосекунд.

Другими словами, эти диоды при превышении порогового напряжения замыкают входную цепь накоротко на землю, удерживая на входе безопасное напряжение. При этом они могут в течение короткого времени длительно несколько микросекунд (напомним, что стандартный испытательный импульс имеет форму 8/20 или 10/1000) проводить токи величиной несколько сотен ампер. Такие замечательные свойства диодов позволяют хорошо защищать схему от повреждения, но в то же время создают проблемы для помехоустойчивости из-за протекания большого импульсного тока по общей земле.

В значительной степени решить эту проблему можно за счет гальванического разделения цепей. Упрощенная структурная

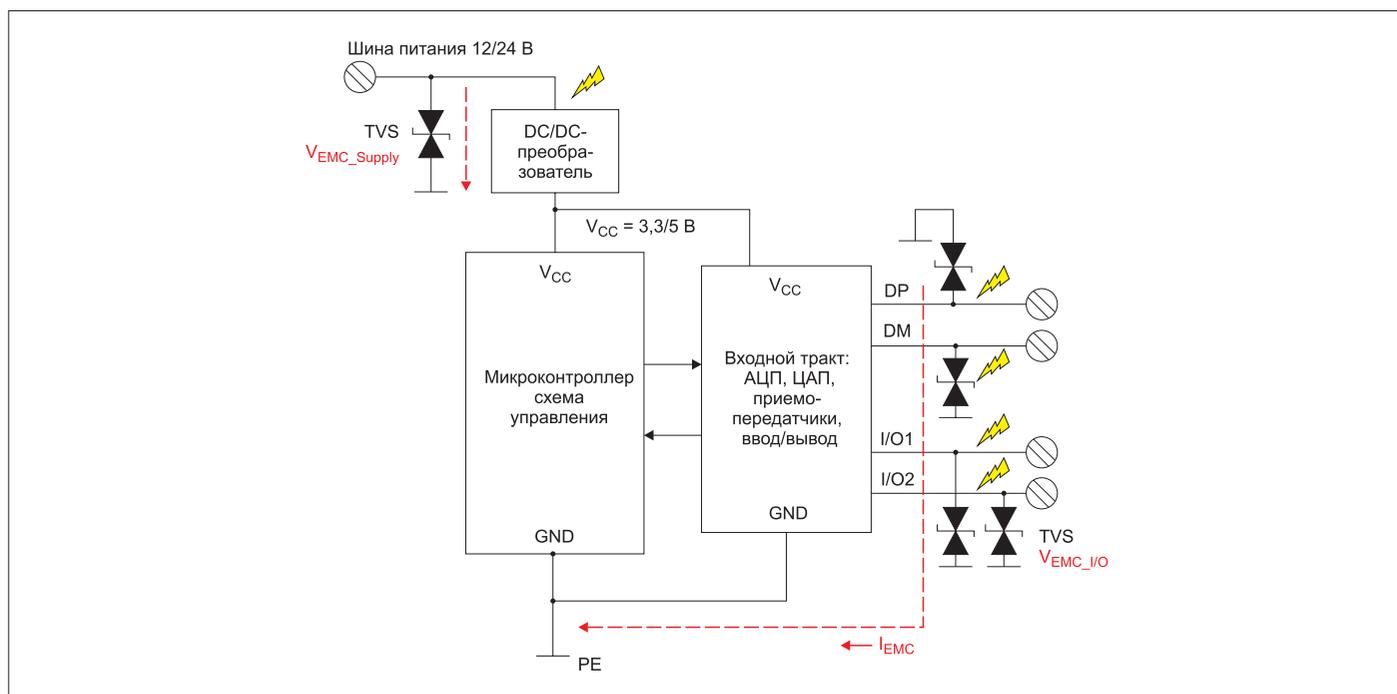


Рис. 1. Упрощенная структурная схема электронного устройства без гальванического разделения цепей

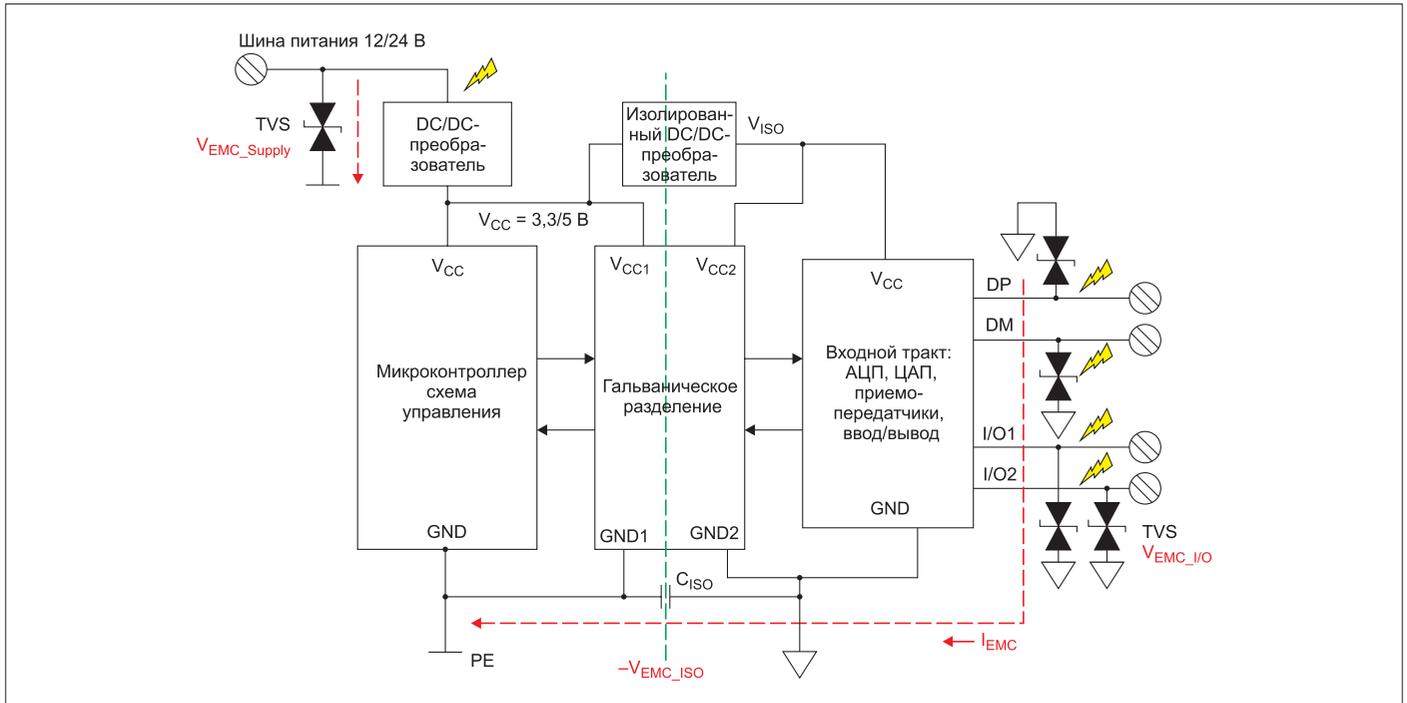


Рис. 2. Упрощенная структурная схема устройства с гальваническим разделением цепей

делением цепей показана на рисунке 2. В данном случае входные тракты системы и ее питание отделены от центральной части системы гальваническим барьером. Обе части системы имеют разное заземление. Входная часть системы использует «плавающее» заземление ISO GND. Между этими землями существует паразитная емкость, представляющая собой сумму всех паразитных емкостей между изолированными частями.

При воздействии всплесков напряжения на входную часть системы это напряжение прикладывается и к изолирующему барьеру. Через проходную емкость этого барьера и паразитную емкость между землями короткие пики напряжения и тока проходят в изолированную часть системы. Избавиться от этого эффекта нельзя, но уменьшить его вполне возможно. Для этого между землями необходимо включить высоковольтный конденсатор C_{ISO} как это показано на рисунке 2.

Эффект от включения конденсатора C_{ISO} иллюстрируется на рисунке 3, на котором показаны результаты симулирования в случае приложения к входу электростатических разрядов с формой импульса 10/100 и амплитудой 8 кВ (рис. 4а) и амплитудой 4 кВ (рис. 4б). Как и следовало ожидать, дополнительный конденсатор уменьшает амплитуду импульса и «заваливает» его фронт. Причем чем больше емкость этого конденсатора, тем более выражен данный эффект.

Не менее интересны и результаты сравнения неизолированной и изолированной системы при протекании быстрого переходного процесса во входной линии. Результаты моделирования для этого случая при импульсе напряжения 1 кВ показаны на рисунке 4. В этом случае эффект применения конденсатора C_{ISO} также предскажем — заметно уменьшается амплитуда тока и длительность его протекания. Более подробно ознакомить-

ся с результатами испытаний и с обсуждением того, как влияет емкость и сопротивление изоляционного барьера, можно, например, в [1–2].

В любом случае следует иметь в виду, что использование гальванического разделения входных цепей системы от ее центральной части заметно снижает влияние всплесков перенапряжений, возникающих на входе из-за быстрых переходных процессов, электростатических разрядов и мощных помех. Причем чем меньше значение проходной емкости, тем больше эффект от применения гальванической развязки.

Введение дополнительного конденсатора C_{ISO} помогает уменьшить влияние внешних воздействий. Выбор величины емкости зависит от условий эксплуатации. В рассмотренных выше случаях (рис. 3–4) емкость конденсатора C_{ISO} по-разному влияла на изменение во времени токов и напряжений, протекающих через TVS-диоды, что

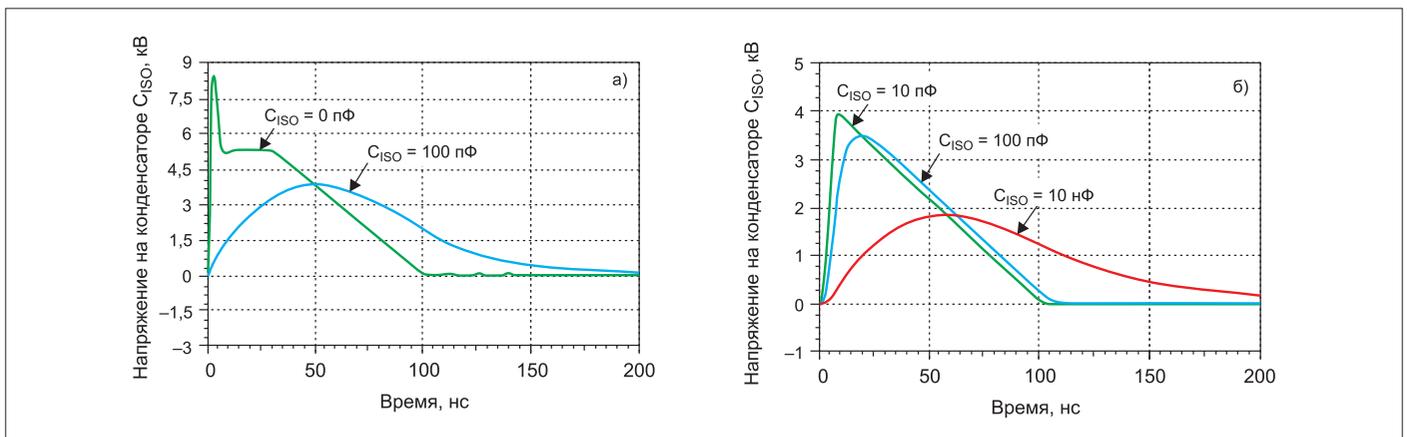


Рис. 3. Эффект от включения конденсатора C_{ISO}

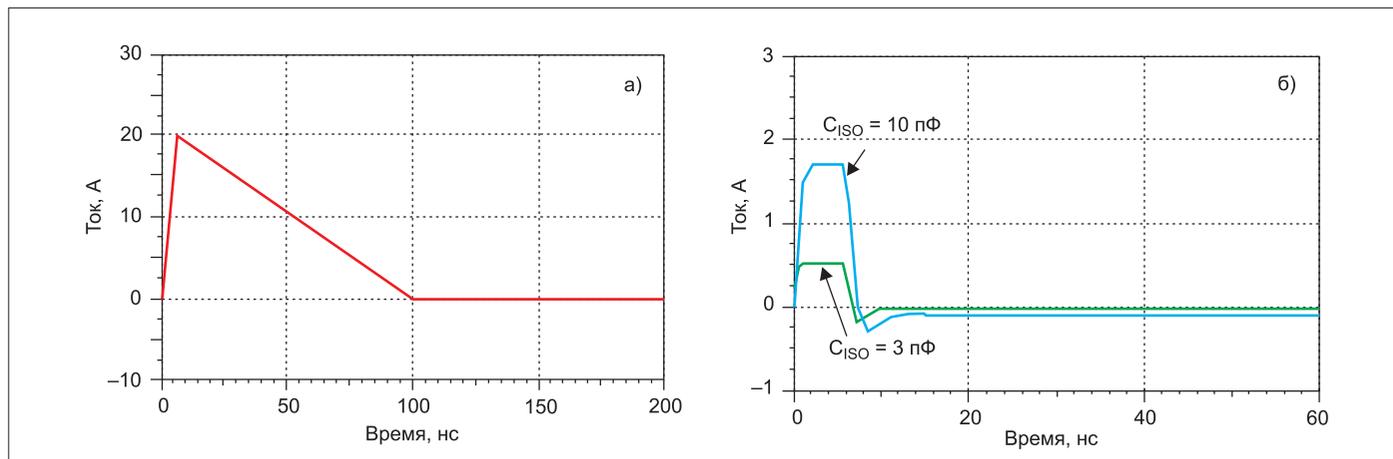


Рис. 4. Результаты моделирования при импульсе напряжения 1 кВ

объясняется разными условиями проведения испытаний на стойкость к электростатическому разряду и к переходным процессам на входных сигнальных линиях.

Практическое использование гальванического разделения цепей

Рассмотрим практический пример использования гальванического разделения цепей. Многие компании производят гальванические развязки сигнальных цепей, но далеко не всегда они содержат встроенные DC/DC-преобразователи для разделения цепей питания. Насколько известно автору, среди работающих на нашем рынке компаний гальванические развязки с разделением цепей питания производят Analog Devices, Texas Instruments, Mornsun. К ним можно причислить и компанию SiLabs, но следует учесть, что ее компоненты содержат ключи силового каскада, но не имеют встроенного трансформатора. Применение развязок с встроенными DC/DC-преобразователями позволяет сократить занимаемое на плате место, упрощает топологию и, как следствие, облегчает решение проблем электромагнитной совместимости.

В качестве примера рассмотрим гальваническую развязку ISOW784x компании Texas Instruments. Ее структурная схема показана на рисунке 5. Приведем основные параметры ISOW784x:

- напряжение питания: 3,3–5 В;
- выходная мощность встроенного DC/DC-преобразователя: 0,65 Вт;
- выходной ток встроенного DC/DC-преобразователя (max): 130 мА;
- скорость передачи данных (max): 100 Мбит/с;
- стойкость к изменению синфазного напряжения: 100 кВ/мкс;
- электрическая прочность изолирующего барьера: 5 кВ (СКЗ) и 7,071 кВ в пике;
- диапазон рабочей температуры: $-40 \dots 125$ °С;
- корпус: 16-выводной SOIC размером 10,3×7,5 мм.

Максимального выходного тока 130 мА встроенного DC/DC-преобразователя, как правило, вполне достаточно для того, чтобы организовать питание четырех трактов входных сигналов. В качестве диэлектрика в развязке используется диоксид кремния SiO_2 . Его диэлектрическая прочность достигает 500 В (СКЗ)/мкм, благодаря чему и достигается высокая электрическая прочность изоляции, позволяющая с запасом удовлетворить требования стандартов электробезопасности.

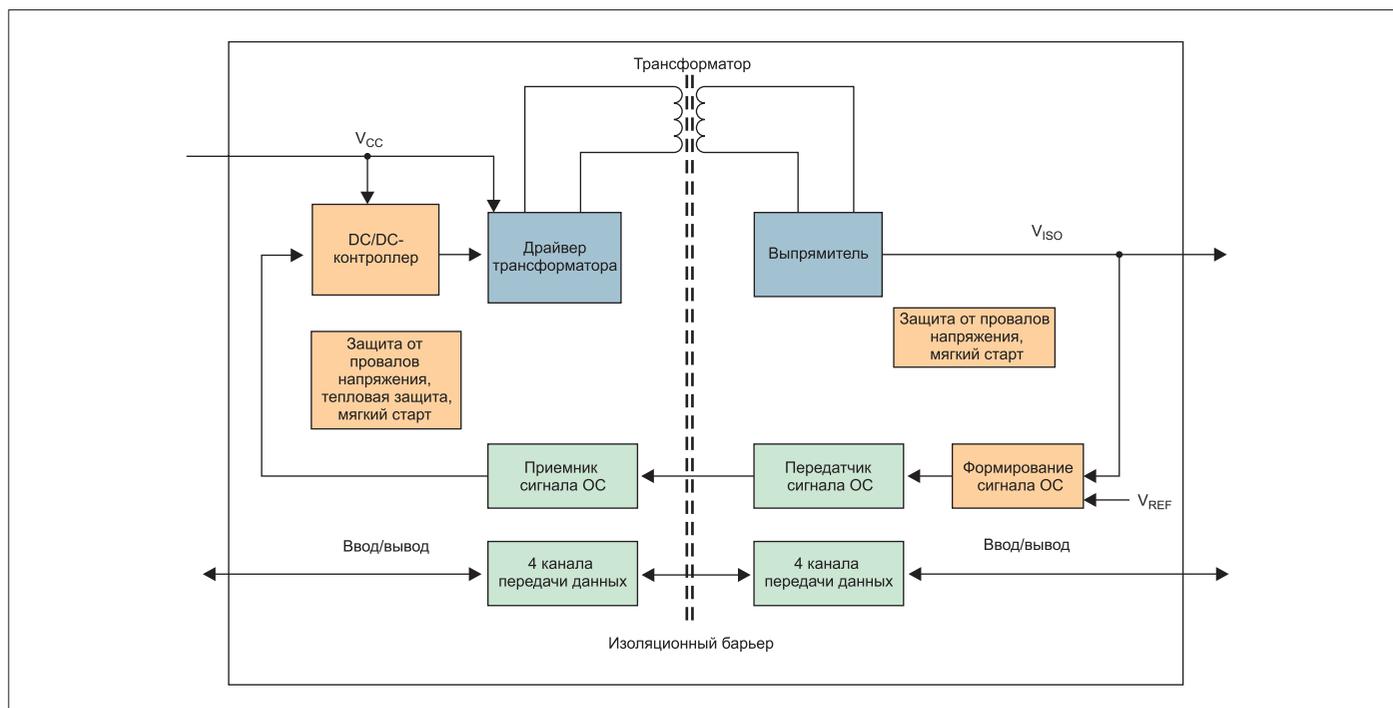


Рис. 5. Структурная схема ISOW784x

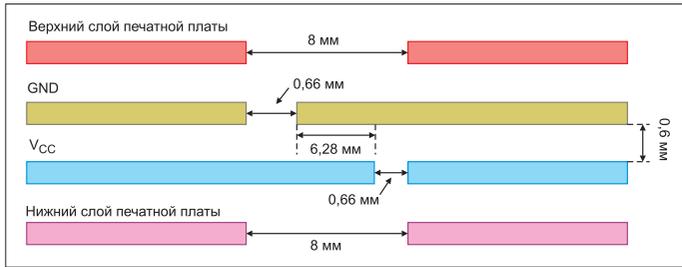


Рис. 6. Конденсатор, образованный слоями печатной платы (stitching capacitance)

Заметим, что никакое гальваническое разделение цепей не означает полного разделения частей. Прходные емкости собственно развязки, особенно малогабаритного встроенного трансформатора DC/DC-преобразователя, и паразитные емкости платы создают токовый контур, который представляет собой антенну, излучающую помехи. Причем чем выше скорость передачи данных и больше площадь токовой петли из паразитных емкостей, тем больше величина излучаемых помех. На эти обстоятельства следует обратить внимание при разработке топологии платы и постараться уменьшить паразитные емкости между двумя частями системы.

Уменьшить величину токовой петли может Y2-конденсатор C_{ISO} (рис. 2). Напомним, что по требованиям стандарта IEC60384-1 максимально допустимое напряжение Y2-конденсатора должно находиться в диапазоне 150–300 В (АС). Этот конденсатор должен выдерживать пиковое напряжение 5 кВ. Но, к сожалению, такой конденсатор имеет и паразитную индуктивность выводов, которая снижает эффективность его использования в полосе частот выше 200–300 МГц.

Решением этой проблемы может стать емкость, образованная слоями печатной платы (stitching capacitance). На рисунке 6 показан пример формирования такой емкости на четырехслойной печатной плате. Изолированные части системы размещаются на верхнем и нижнем слоях, емкость образуется с помощью слоев земли и питания. В данном случае величина емкости составила 30 пФ. Подробный расчет, создаваемой таким образом емкости, изложен в [4].

Виды гальванической развязки

В микросхемах гальванической развязки используются, в основном, три способа гальванического разделения: оптронная развязка; трансформаторная развязка; КМОП.

Оптронная развязка известна очень давно. Пожалуй, наибольших успехов в производстве гальванических оптронных развязок достигли компании Avago (ныне Broadcom) и Toshiba. Основными ограничивающими факторами в использовании оптронных развязок являются температурная зависимость, временные задержки, из-за которых может происходить рассинхронизация тактовых сигналов и данных, ограничение скорости передачи и довольно большое энергопотребление. В высокоскоростных интерфейсах оптронная развязка не находит широкого применения.

Трансформаторная развязка наилучшим способом реализована в технологии iCoupler компании Analog Devices, а развязка с использованием КМОП-технологии — в технологиях компаний Texas Instruments и SiLabs. Обе эти технологии позволяют увеличить электрическую прочность изоляции до более чем 5 кВ (АС).

В технологии iCoupler планарный микротрансформатор формируется на кристалле кремния. Первичная и вторичная части этого трансформатора разделены полиимидом с высокой электрической прочностью. В КМОП-технологии кристаллы, образующие первичную и вторичную часть развязки, разделены дифференциальным емкостным изолирующим барьером. С точки зрения автора, трансформаторная развязка и емкостная развязка КМОП-технологии практически равноценны при использовании в сетях передачи данных. Ни одна из них не имеет явных преимуществ над другой.

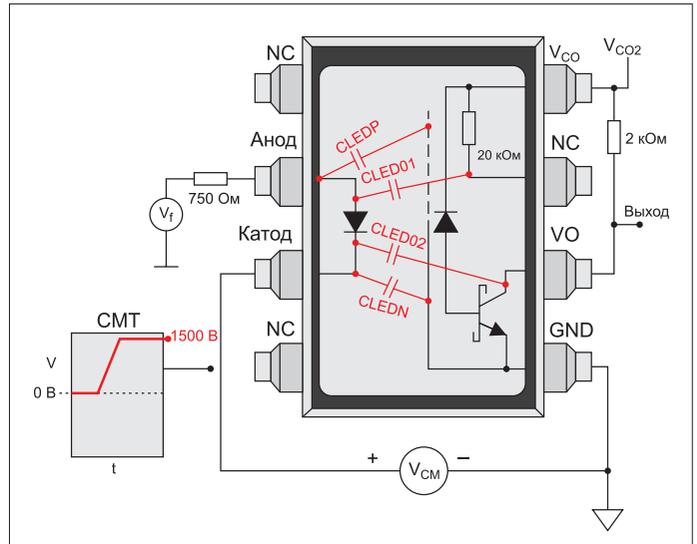


Рис. 7. Схема HCPL-450 с паразитными емкостями

Несмотря на отмеченные выше недостатки оптронных развязок, следует сказать несколько слов в их защиту. Нередко в специализированных СМИ высказывается мнение о том, что этот вид развязки якобы устарел и она во всех отношениях уступает конкурентам. В качестве доказательства приводятся результаты сравнительных испытаний или моделирования.

Например, в [4] среди прочих характеристик рассматривается важный параметр — стойкость к изменению синфазного напряжения (common-mode immunity, CMTI). Сравняется реакция на изменение синфазного напряжения оптронной развязки HCPL-4506 (с CMTI = 20 кВ/мкс) и развязки Si8712A (с CMTI свыше 50 кВ/мкс), производимой по КМОП-технологии. Как и следовало ожидать, результаты сравнительных испытаний показали, что Si8712A значительно меньше реагирует на изменение синфазного напряжения, чем HCPL-4506.

Результат объясняется наличием паразитных емкостей и несовершенством схемы HCPL-4506 (рис. 7). Действительно, как уже упоминалось, паразитные проходные емкости ухудшают характеристики развязки, но дело в том, что для испытаний был отобран далеко не лучший вариант оптронной развязки. Например, оптронная развязка ACNW3410 от Avago (Broadcom) в драйвере затвора использует улучшенную схему и ее величина CMTI = 100 кВ/мкс та же, что у развязок, производимых по двум другим технологиям.

В заключение отметим, что оптронные развязки имеют свою нишу применения. Прежде всего, это одноканальные развязки сигнальных линий и драйверы затворов. Из-за относительно больших задержек распространения сигналов и возможных рассогласований этих задержек между каналами не рекомендуется использовать их в многоканальных системах передачи данных и в драйверах затвора силовых каскадов с двумя и более силовыми ключами. ■

Литература

1. How to use isolation to improve ESD, EFT and surge immunity in industrial systems // www.ti.com
2. High-voltage reinforced isolation: Definitions and test methodologies // www.ti.com
3. Have Your Cake and Eat It, Too: Overcoming Conflicting Isolation and EMC Standards // www.electronicdesign.com
4. Low-Emission Designs with ISOW7841 Integrated Signal and Power Isolator // www.electronicdesign.com
5. Isolator vs. Optocoupler Technology // www.silabs.com

Обеспечение ЭМС Ethernet-приложений в жестких условиях эксплуатации

Джейсон ТОЛЛЕФСОН (Jason TOLLEFSON)

В этой публикации рассматривается, как технология Quiet-WIRE от компании Microchip обеспечивает помехозащищенность Ethernet-приложений в жестких условиях эксплуатации.

Внешние электрические помехи являются губительными для работы проводных сетей. Например, под влиянием электромагнитного излучения и наводок теряются пакеты данных. Даже те приложения, в которых применяется устойчивая к сбоям технология Ethernet, страдают от шума, если они эксплуатируются в жестких условиях, например в автотранспорте или в промышленном оборудовании.

Однако в настоящее время на рынке появляются технологии, которые позволяют подавить шум и ограничить восприимчивость Ethernet-приложений даже в условиях сильной зашумленности.

Для начала мы определим те факторы, которые влияют на Ethernet-системы.

Электромагнитная совместимость

При передаче данных на большие расстояния на провода сети воздействуют помехи и наводки. Электромагнитная совместимость (ЭМС) является той мерой, которая определяет влияние этих эффектов на рабочие характеристики устройств в конкретных условиях эксплуатации.

Электромагнитные помехи возникают при передаче данных по проводам. Эти провода играют роль антенны, которая излучает помехи в окружающее пространство. В США допустимые уровни помех регламентируются Федеральной комиссией по связи (FCC). Два класса (А и В) определяют эти уровни для приложений, исполь-

зующихся в быту и коммерции, благодаря чему рядом расположенные устройства и системы получают возможность нормально функционировать.

Уровень наводок определяется путем анализа электромагнитной совместимости. Шум, проникающий в проводные соединения от близко находящихся источников, вызывает помехи, которые ухудшают пропускную способность системы, или отказы.

Цель анализа ЭМС изделия состоит в таком уменьшении влияния шума от разных систем, при котором не нарушаются их рабочие характеристики.

Обеспечение ЭМС с помощью витой пары

Для уменьшения уровня помех в Ethernet-приложениях применяется дифференциальная передача сигнала и кабели «витая пара» (рис. 1).

При прохождении сигналов по дифференциальной паре уровень электромагнитных помех снижается благодаря тому, что шумы от сигналов разной полярности взаимоуничтожаются. Кроме того, такая связь является более устойчивой к помехам за счет того, что дифференциальный приемник отличает сигнал от шума с большей эффективностью.

При использовании балансного подключения один и тот же сигнал проходит по двум разным проводам, но в одном из них он инвертирован (рис. 2). При этом на каждый из сигналов в равной мере действует синфаз-

ный шум, который исключается в приемном устройстве с помощью трансформаторной связи.

Эти простые, но эффективные меры по улучшению ЭМС позволили Ethernet-технологии завоевать огромную популярность в домашних и офисных приложениях. В настоящее время, по мере все большего применения Ethernet в жестких условиях эксплуатации в сетях с достаточно длинными кабелями в промышленных установках, электрораспределительных системах и автомобильной электронике, ужесточились требования к обеспечению ЭМС.

Технология Quiet-WIRE

Чтобы в еще большей мере повысить ЭМС Ethernet-сетей, была разработана технология Quiet-WIRE, расширившая возможности приемопередатчика Ethernet. В передатчик интегрирована схема активной фильтрации, которая подавляет шум выше 60 МГц, а шумоподавление приемника стало выше благодаря использованию технологии цифровой обработки сигналов (DSP). Оба этих технологических усовершенствования в значительной мере улучшают помехозащищенность системы в жестких условиях эксплуатации.

На рисунке 3 представлены результаты лабораторных испытаний с помощью метода инъекции объемного тока (Bulk Current Injection, BCI), который применяется для тестирования электромагнитной

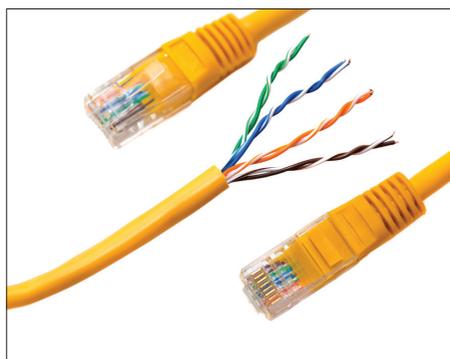


Рис. 1. Конструкция Ethernet-кабеля

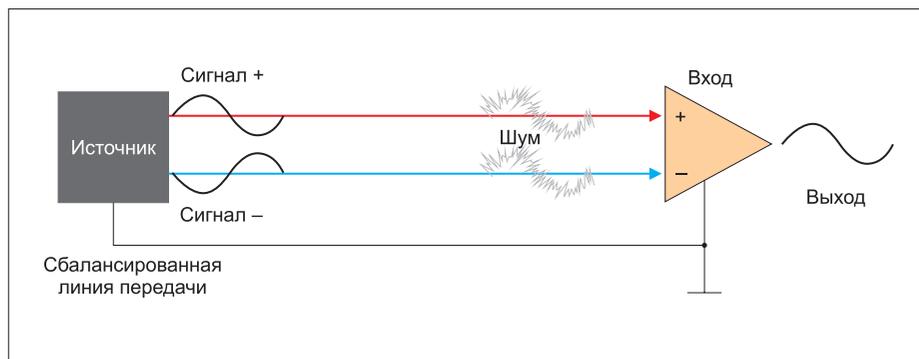


Рис. 2. Балансный сигнал

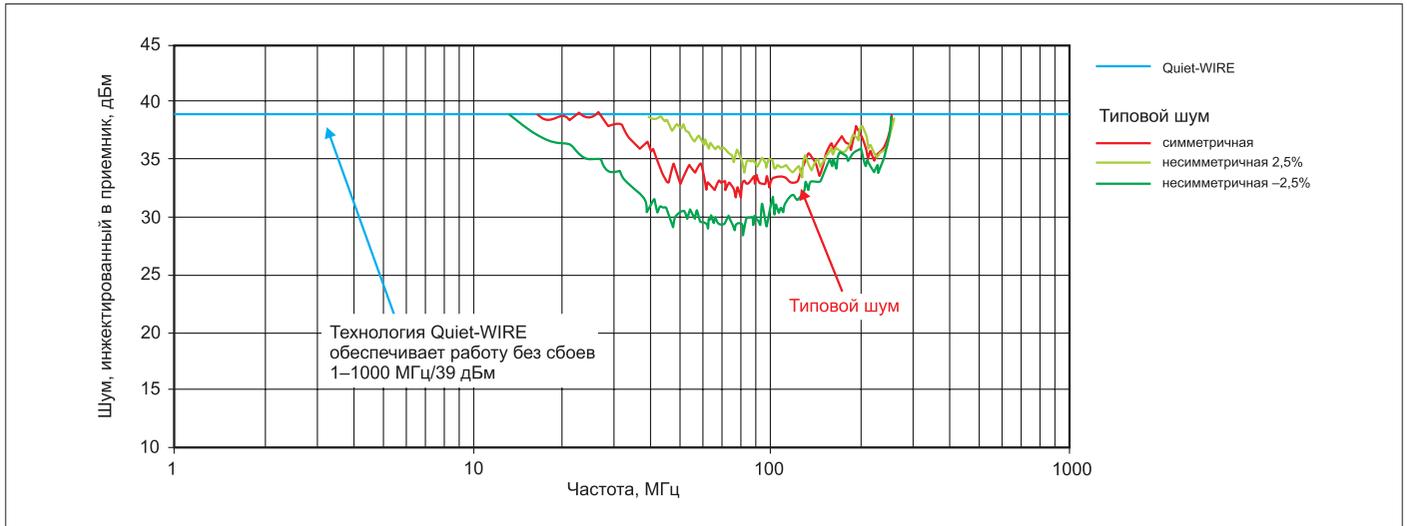


Рис. 3. Сравнение производительности Quiet-WIRE

совместимости. Полученные данные показывают, что у трансиверов, реализованных с помощью технологии Quiet-WIRE, отсутствуют ошибки при передаче сигнала под воздействием шумового тока 200 мА в диапазоне частот 1–400 МГц. Таким образом, эти устройства отвечают требованиям самых строгих стандартов для автомобильных электронных систем.

В то же время у приемника, который не использует технологию Quiet-WIRE, деградация сигнала составляет около 9 дБм, что в 10 раз хуже того же показателя приемника с этой технологией.

В технологии Quiet-WIRE применяется индикатор качества сигнала, который аппроксимирует отношение сигнала к шуму и по показаниям которого можно судить о величине шума от окружающей среды. Главное преимущество этого индикатора за-

ключается в сокращении времени монтажа системы. По показаниям индикатора монтажник в режиме реального времени узнает состояние окружающей среды, которая воздействует на систему. При высоких уровнях внешнего шума индикатор предупреждает о необходимости уменьшить помехи от источника или иначе проложить кабели, что обеспечивает существенную экономию за счет отказа от привлечения специалистов для диагностики системы.

Изделия с технологией Quiet-WIRE

Компания Microchip Technology выпускает целый ряд изделий для жестких условий эксплуатации, в которых используется технология Quiet-WIRE. На рисунке 4 показана типовая структурная схема автомобильной Ethernet-сети, в которой применяются

эти изделия. KSZ8061 PHY и переключатель KSZ8567 Switch оснащаются функциями Quiet-WIRE на этапе производства с помощью выводов. При этом программное обеспечение не используется.

Компания Microchip предлагает 24 изделия с функцией Quiet-WIRE для Ethernet-сетей, в т. ч. продукцию, сертифицированную согласно требованиям стандарта AEC-Q100 и работающую в расширенном диапазоне температуры до 105 °С. Благодаря этим изделиям Ethernet-приложения получают возможность безопасно функционировать в зашумленных средах. Используемая в них технология Quiet-WIRE обеспечивает связь с высокой надежностью при соблюдении самых строгих требований к ЭМС и дает уверенность, что системы выполнят возложенные на них задачи в течение всего срока службы.

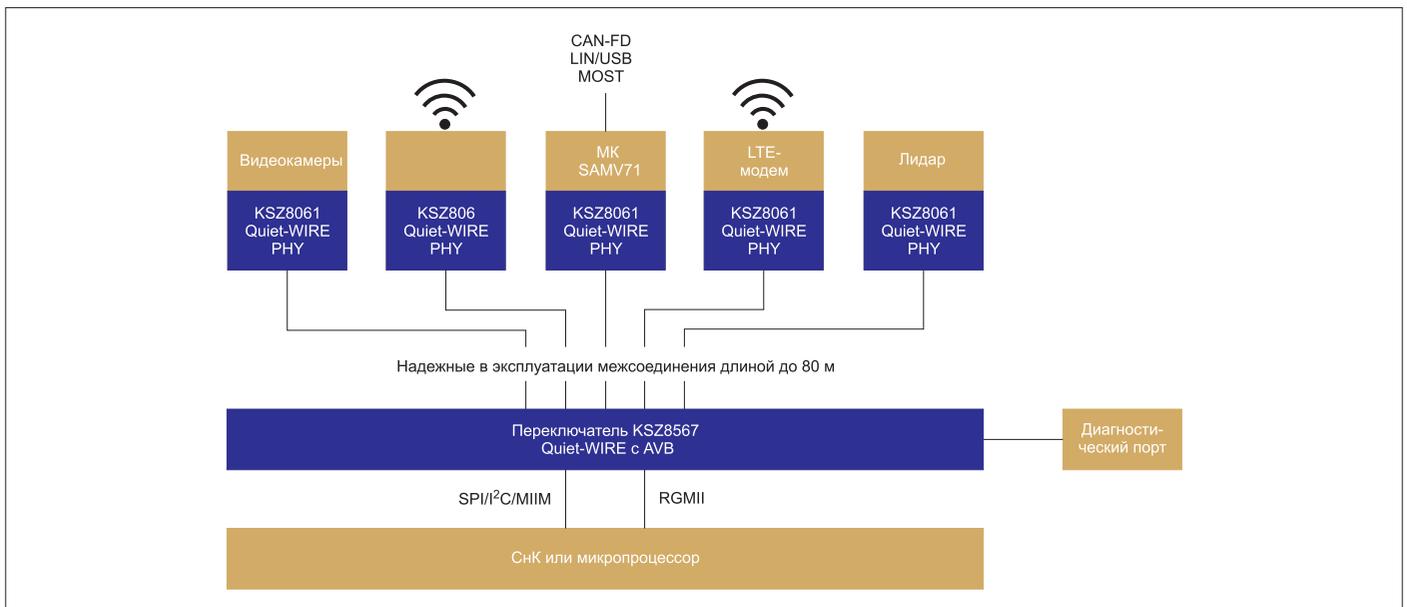


Рис. 4. Структурная схема автомобильной сети

Что нужно знать об испытаниях на выполнение требований по ЭМС для изделий коммерческого назначения

Владимир РЕНТЮК
Rvk.modul@gmail.com

Испытания изделий на выполнение требований по электромагнитной совместимости (ЭМС) охватывают широкий спектр разнообразного электрического и электронного оборудования коммерческого назначения. Основные ограничения накладываются как на уровни электромагнитного излучения в зависимости от типа электромагнитных помех, так и на уровни устойчивости к их воздействию. В основу статьи положен материал [2] из публикации [1] с комментариями, дополнениями, уточнениями и пояснениями в соответствии с действующими международными стандартами и стандартами, используемыми на территории Российской Федерации.

В рамках первой из анонсированных в [3] статей нас будут интересовать общие требования по электромагнитной совместимости (ЭМС) для продуктов коммерческого рынка. То есть для изделий массового применения, таких как оборудование информационных технологий (компьютеры и их периферийные устройства), бытовая техника, светильники, электроинструменты и широкий спектр других изделий чисто коммерческого направления. Особое место в этом ряду занимают приборы медицинского назначения и электронное оборудование для автомобилей, что связано с повышенными потенциальными рисками при некорректном функционировании подобных продуктов.

Стандарты, регламентирующие требования по ЭМС на конкретный тип оборудования, включают ограничения на предельные уровни промышленных радиопомех, содержат методы испытаний и нормативы для испытательного оборудования. Требования могут различаться, например для медицинского и автомобильного оборудования они предельно ужесточены. Тем не менее все стандарты в части испытаний на выполнение требований по ЭМС коммерческого назначения имеют несколько общих черт и подпадают под международные стандарты серии IEC 61000 и CISPR [3]. У большинства данных стандартов есть национальные аналоги либо в аутентичном переводе, либо с учетом национальных требований. Соответствие изделий коммерческого направления требованиям стандартов по ЭМС, как и стандартов по безопасности, является обязательным, предусматривает необходимую сертификацию и контролируется специальными органами.

Испытания на ЭМС подразумевают проверку на уровни промышленных радиопомех (и связанные с ними ограничения) и применяются для коммерческого оборудования, в первую очередь для обеспечения защиты каналов радио- и телевещания и других служб радиосвязи. Несмотря на то, что до широкого выхода на рынок персональных компьютеров существовало некоторое ограниченное число стандартов, регламентировавших уровни электромагнитного излучения, именно распространение цифрового электронного оборудования стимулировало дальнейшую разработку подобных стандартов и правил. Это было связано с большим числом жалоб на помехи, непосредственной причиной которых стали как раз новые для рынка устройства.

Первые персональные компьютеры были спроектированы и построены без учета уровня их собственного радиочастотного излучения и, как следствие, генерировали электромагнитные поля высокого уровня и в широком частотном диапазоне. В общем смысле можно утверждать, что первые персональные компьютеры служили своеобразными широкополосными радиопередатчиками, маскирующимися под компьютеры. Компьютеры в стойках также имеют аналогичные недостатки, но, как правило, они не устанавливаются в жилых районах, так что их негативное воздействие ощущается меньше. Здесь необходимо учитывать, что под промышленными радиопомехами подразумевается электромагнитная помеха, формируемая техническими средствами. Причем к промышленным помехам не относятся помехи, создаваемые излучениями выходных трактов радиопередатчиков.

Промышленные помехи могут быть в виде наведенных или излучаемых электромагнитных помех. Поэтому испытания на уровни электромагнитных помех обычно содержат два вида тестов: кондуктивные электромагнитные помехи, которые наводятся и присутствуют на линиях подключения питания и телекоммуникационных портах устройства, и помехи, излучаемые самим устройством. Граничная точка между этими двумя видами электромагнитных помех в стандартах на оборудование коммерческого назначения установлена равной 30 МГц. Эта частота выбрана исходя из того, что на типичных расстояниях для измерения уровней электромагнитного излучения (в настоящее время 3 и 10 м) частоты выше 30 МГц обеспечивают излучение в виде плоской волны. Это так называемое условие дальнего поля, или поле дальней зоны (*англ. far field*), — область, в которой плотность потока мощности излучения приблизительно обратно пропорциональна квадрату расстояния от антенны. Это позволяет проводить довольно точно повторяемые измерения, не имеющие критической зависимости от оборудования конкретной лаборатории, в которой они проводятся, и условий испытаний. Таким образом, мы достигаем высокой повторяемости результатов, а не имеем набор неких случайных измерений. Ниже частоты 30 МГц это может быть труднодостижимо, и измеряются только кондуктивные помехи.

Уровни кондуктивных помех на линиях питания устанавливаются на основе совместной проверки источника таких помех и их приемника, подключенных к одной и той же линии электропитания. Максимально допустимые уровни кондуктивных помех на телекоммуникационных

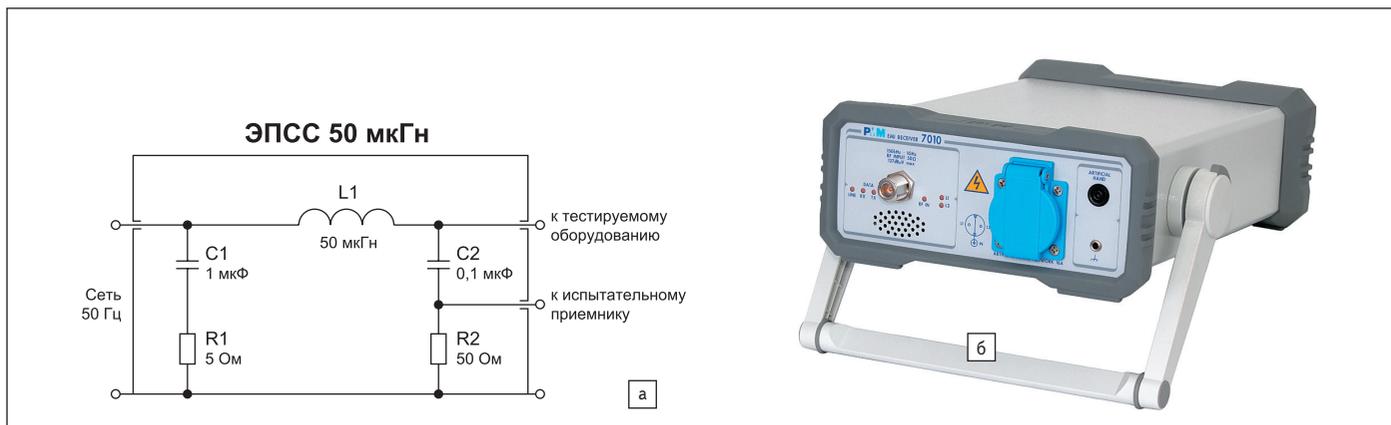


Рис. 1. Часто используемый вариант ЭПСС:

а) принципиальная схема однопроводного V-образного эквивалента сети типа 4 (50 Ом/50 мкГн) на полосу частот 0,009–30 МГц ГОСТ Р 5 1319-99;

б) внешний вид современного комплексного ЭПСС типа PMM 7010 компании Narda Safety Test Solutions Srl. (Италия) [7], соответствует требованиям CISPR 16-1-1

Примечание. В фильтре для полосы частот 150 кГц – 30 МГц R1 = 0 Ом.

портах устанавливаются с учетом преобразования дифференциальных сигналов (используемый для передачи сигнал) кабеля, частично преобразующихся в синфазный сигнал, который затем излучается. Это связано с неидеальностью характеристик линии передачи, в большей степени — кабеля, реже из-за рассогласования импеданса точек его подключения.

В стандартах под понятием «телекоммуникационный порт» подразумевают порт связи — место соединения, в котором осуществляется передача речи, данных и сигналов, обеспечивающих взаимосвязь широко разветвленных систем посредством подключения оборудования к многопользовательским телекоммуникационным сетям — например, коммутируемым телефонным сетям общего назначения (PSTN), цифровым сетям с интеграцией служб (ISDN), цифровым абонентским линиям типа x (xDSL), локальным вычислительным сетям (Ethernet, Token Ring и т. д.) и аналогичным сетям связи.

Однако если такой порт предназначен исключительно для связи между компонентами системы (например, интерфейс RS-232, универсальная последовательная шина USB и т. п.) и он используется в соответствии со своими функциональными характеристиками и с учетом максимально допустимой длины кабеля связи, то, согласно требованиям действующих в настоящее время стандартов по ЭМС, кондуктивные помехи на таких линиях связи не рассматриваются.

Кондуктивные электромагнитные помехи

Уровни кондуктивных помех, наведенных на линиях подключения электропитания, обычно измеряются с помощью эквивалента сети. В качестве такого эквивалента используется схема стабилизации полного импеданса линии, известная как LISN (*англ.* Line Impedance Stabilization Network), или эквивалента сети AMN (*англ.* Artificial

Mains Network). Это два названия одного и того же устройства, однако в русскоязычной технической литературе и стандартах ГОСТ Р чаще употребляется термин «эквивалент полного сопротивления сети» (ЭПСС) и реже LISN; один из наиболее часто применяемых вариантов ЭПСС приведен на рис. 1.

На рис. 2 показана обобщенная блок-схема испытательной установки. Для того чтобы обеспечить определенный импеданс линии электропередачи и точку соединения с приемником, эквивалент сети ЭПСС размещают между тестируемым оборудованием и входящей линией электропитания (сети). Эквивалент подключается непосредственно к входу подачи питания. В зависимости от предполагаемой установки испытуемого оборудования (стол или заземленная поверхность) изделие при испытаниях размещается

либо на горизонтальной заземленной плоскости на полу на изолирующей подставке, например поддоне высотой $0,1 \pm 25\%$, либо на непроводящем столе высотой 80 см (рис. 2). На практике испытательный приемник находится вне пределов камеры [8].

Необходимо учитывать, что в стандартах ГОСТ Р под термином «испытуемое оборудование» (ИО) подразумевают отдельно применяемое оборудование, а под термином «ОИТ» понимается функционально взаимодействующая группа образцов ОИ (система), которые содержат один или несколько основных блоков, и именно такая группа является объектом испытаний.

Уровень помех в интересующем диапазоне частот проверяется соответствующими детекторами с заданной полосой пропускания (обычно селективным вольтметром),

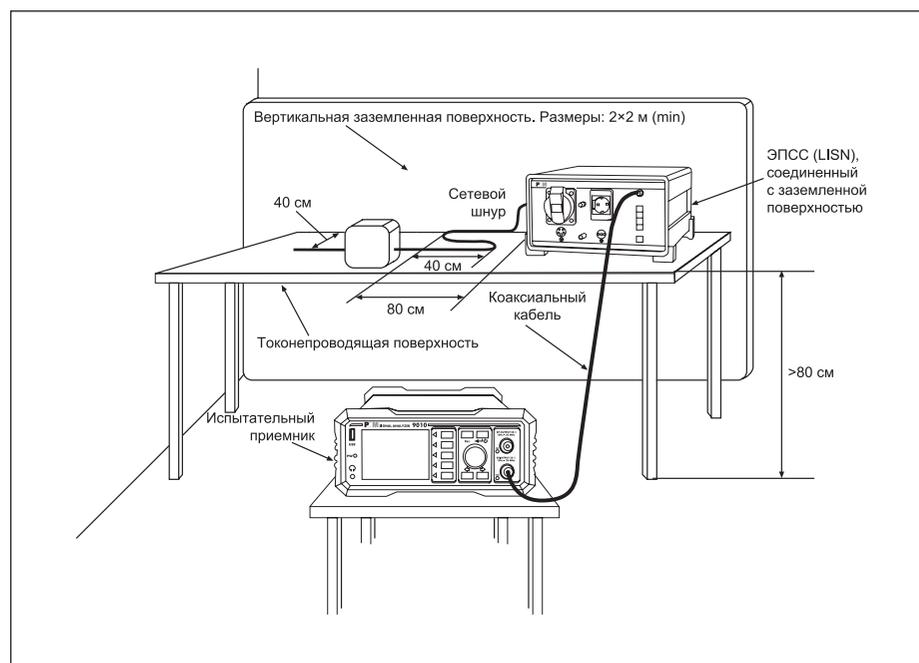


Рис. 2. Подключение испытательного оборудования для настольного оборудования при измерении кондуктивных помех в линиях электропитания

а результаты измерений фиксируются испытателем. Измерения проводятся на каждом проводнике линии электропитания отдельно. Большинство стандартов на соответствие требованиям ЭМС коммерческого оборудования предусматривают измерения, выполненные в диапазоне частот 150 кГц – 30 МГц, однако иногда этот диапазон расширяется до 9 кГц – 30 МГц (чаще для изделий специального назначения). При измерениях в качестве испытательного приемника используется селективный микровольтметр, для которого регламентирована величина отношения синусоидального напряжения к спектральной плотности напряжения импульсов на входе, которая вызывает одинаковое показание измерительного прибора, содержащего инерционные детекторы. В специальных лабораториях обычно используют приборы с автоматической фиксацией показаний в виде графика и выводом сопутствующих ему таблиц. Здесь измерения осуществляются без вмешательства персонала [8], что исключает влияние человеческого фактора. Сами измерения выполняются по так называемому принципу наилучшего случая.

Излучаемые электромагнитные помехи

Излучаемые электромагнитные помехи могут быть измерены либо на открытых измерительных площадках OATS (*англ.* Open Area Test Site), либо в экранированных полубезэховых радиочастотных камерах SAC (*англ.* RF Semi-Anechoic Chamber). Здесь необходимо уточнить следующее: под понятием «измерительная площадка» подразумевается площадка, пригодная для измерения помех, излучаемых испытуемым устройством, параметров и характеристик ЭМС технического средства и отвечающая регламентированным требованиям. Под понятием «экранированная камера» понимают помещение, обладающее свойствами экранирования для разделения внутренней электромагнитной обстановки от внешней. А понятие «полубезэховая камера» предполагает экранированное помещение, все внутренние поверхности которого покрыты безэховым материалом, за исключением пола (пластины заземления), который должен отражать электромагнитные волны (рис. 3). В отличие от полубезэховой камеры безэховая камера — это экранированная камера с поглощающим электромагнитные волны покрытием всех внутренних поверхностей. Такая камера может трансформироваться из полубезэховой с помощью установки напольных поглотителей электромагнитных волн, что, как правило, и используется на практике.

Идеальным решением является метод измерения в условиях открытого пространства OATS, который можно назвать золотым стандартом, однако и здесь не все так просто, как хотелось бы. Такая испытательная лаборатория представляет собой большую открытую площадку, свободную от объектов, способных отражать радиочастотную энергию, и оснащенную отражающей «землей». Размер

радиопрозрачной области определяется в различных стандартах как эллиптическая область, большая ось которой в два раза превышает расстояние измерения, а малая ось — квадратный корень от трехкратного расстояния до точки измерения.

Опыт показывает, что такие размеры недостаточны для измерений. Поэтому было опробовано их двукратное увеличение, но даже оно, как было выяснено впоследствии, имеет свои недостатки. Особенно ярко они выражены, когда для обеспечения безопасности площадка OATS окружена защитным токопроводящим ограждением.

На рис. 4 показана типичная лаборатория OATS. Измерительная зона этой площадки, как можно видеть, занимает ее большую часть. Она приподнята над поверхностью земли, а поворотный стол, на котором располагаются тестируемые устройства, защищен радиопрозрачной надстройкой. Для исключения влияния на результаты измерения все коммуникации, в том числе воздуховоды для кондиционирования воздуха, выполнены под землей, а сами вспомогательные установки расположены за пределами измерительной зоны.

Существенным недостатком технологии измерения с использованием OATS является то, что дополнительно фиксируется излучение от тестируемых устройств. Для обеспечения заданной точности площадки OATS должны располагаться в очень отдаленных местах. И даже это, в нынешней ситуации с электромагнитным загрязнением среды, не гарантирует, что уровень собственного электромагнитного излучения окружающей среды останется низким. Вот почему многим компаниям приходится использовать исключительно экранированные камеры с 10-метровым измерительным расстоянием (рис. 3). Впрочем, испытания на требования по ЭМС на открытых площадках еще не утратили своей актуальности и проводятся до сих пор.

Предприятие, где работал автор статьи, ввиду своей специфики также имело собственный испытательный полигон, но в 1980-х на нем выполняли лишь испытания антенн. Проводить испытания на уровень радиопомех было уже практически невозможно. Измерения проходили исключительно в экранированных и полубезэховых камерах. Тем не менее однажды у автора статьи возникла необходимость провести проверку уровня радиопомех от системы многоканальной проводной связи, развернутой на объекте. Измерения были выполнены передвижной лабораторией при помощи направленных антенн, а отдельные составляющие системы дополнительно тестировались в экранированных камерах испытательной лаборатории.

Независимо от того, проводятся ли измерения на открытых площадках OATS или в экранированных камерах SAC, блок-схема испытательной установки остается одной и той же. Электромагнитные помехи от испытуемого оборудования измеряются с помощью направленной антенны для конкретного частотного диапазона, предварительного усилителя (при необходимости) и измерительного приемника (обычно селективного вольтметра). Измерения проводятся в вертикальной и горизонтальной поляризации соответствующей

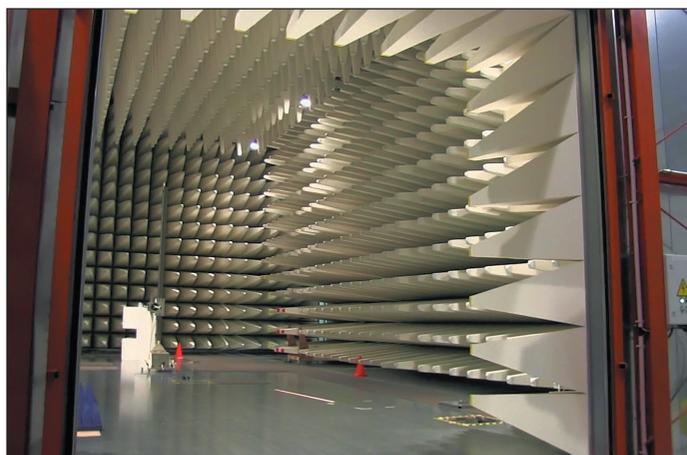


Рис. 3. Большая полубезэховая испытательная камера компании EMC Technologies (Виктория, Австралия)



Рис. 4. Лаборатория OATS компании Agilent Technologies для исследований аппаратуры на ЭМС

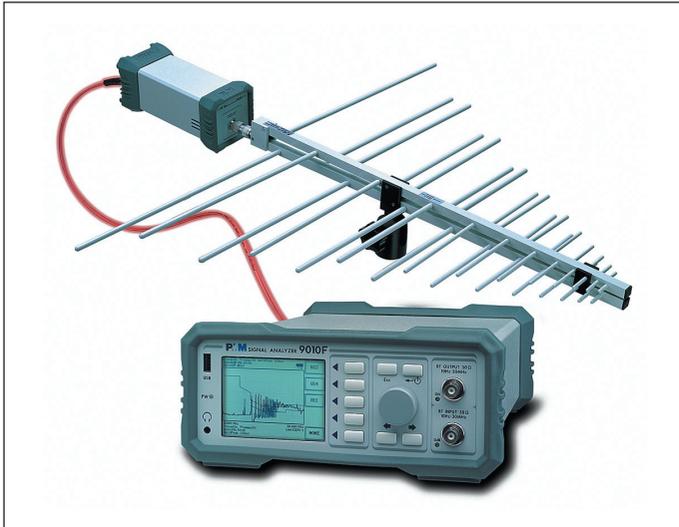


Рис. 5. Оборудование для оценки уровня излучения электромагнитных помех. Измерительный приемник с анализатором спектра PMM 9010F производства компании Narda Safety Test Solutions Srl. (Италия) [8] в комплекте с широкополосной логопериодической антенной LP-02 и согласующим устройством PMM 9030. Оборудование соответствует требованиям CISPR 16-1-1

установкой антенны. Пример современного комплекта данного оборудования показан на рис. 5.

При проведении измерений для оценки уровня излучаемых радиопомех может возникнуть необходимость в сканировании по высоте, как это показано на схеме, приведенной на рис. 6. Цель сканирования следующая: отрегулировать высоту антенны так, чтобы прямые и отраженные сигналы были максимальными. Пример мачты с подвижной антенной показан на фотографии площадки OATS компании Agilent Technologies (рис. 4).

Испытания на соответствие изделий требованиям по уровням промышленных радиопомех нужны во многих странах. Кроме того, в ряде стран проводятся и испытания коммерческих продуктов на устойчивость к воздействию внешнего электромагнитного излучения. Такие виды испытаний проводятся в основном в развитых странах, и производители коммерческого оборудования должны знать о подобных нюансах и учитывать их при проектировании и изготовлении продукции, предназначенной для экспорта.

Испытания коммерческого оборудования на устойчивость к электромагнитным воздействиям

Под электромагнитной совместимостью (ЭМС) технических средств подразумевают не только соответствие допустимым уровням промышленных радиопомех, но и способность технических средств функционировать в реальных условиях эксплуатации с требуемым качеством при воздействии на них непреднамеренных электромагнитных помех. Термин «ухудшение (качества функционирования)» предусматривает нежелательное изменение рабочих характеристик изделия в результате воздействия помех, причем такое понятие необязательно означает сбой или отказ в работе.

Если мы говорим о возможности должного функционирования изделий в реальных условиях эксплуатации при воздействии на них непреднамеренных электромагнитных помех, то в этом случае изделия коммерческого назначения обычно подвергаются следующим типам испытаний.

Испытание на невосприимчивость к электрическому разряду

Существует два типа испытаний на невосприимчивость к электрическому разряду (иногда это называют на устойчивость) — контактный разряд и разряд по воздуху. При тестировании технических средств на воздействие электростатических разрядов применяются генераторы (имитаторы) электростатических разрядов (ЭР). Они

программируются на точное воспроизведение ЭР в соответствии с требованиями стандартов. При проверке на устойчивость к контактному разряду наконечник имитатора ЭР помещается в выбранную точку и начинается разряд, который происходит внутри имитатора. Результаты таких испытаний имеют высокую степень достоверности и хорошо повторяемы. При испытаниях на воздушный разряд имитатор заряжается до указанного в стандарте напряжения, а затем приводится в контакт с испытуемым оборудованием. В этом случае разряд происходит еще до прямого контакта по воздушному зазору между наконечником имитатора и изделием.

Здесь важно учитывать, что электростатические разряды должны быть поданы только на такие точки и поверхности испытуемого оборудования, к которым предполагается прикосновение во время его обычной работы, в том числе пользователей, например при очистке или возобновлении расходных материалов при включенном оборудовании, в соответствии с руководством по эксплуатации. Электростатические разряды подаются в определенном количестве, причем как в положительной, так и в отрицательной полярности.

Насколько велик этот зазор, зависит от целого ряда факторов, среди них: уровень атмосферного давления, температура среды и оборудования, угла подноса щупа и относительная влажность. Зазор также зависит от того, насколько быстро оператор подносит электростатический пистолет к тестируемому устройству. Испытание на устойчивость к воздушному разряду не отличается высокой степенью повторяемости, но имитирует возможное неконтактное воздействие статического электричества. Испытания на воздушный разряд проводят для тех элементов оборудования, где нельзя выполнить тест методом контактного разряда. Если такая проверка необходима, то изделие должно быть исследовано для определения доступных пользователю мест, где может произойти данный пробой. Обычно следует выполнять оба типа испытаний. Для компьютерного оборудования согласно основному стандарту CISPR 24 “Information technology equipment — Immunity characteristics — Limits and methods of measurement” требуется испытание на контактный разряд при напряжении 4 кВ и воздушный разряд до 8 кВ (в РФ действует идентичный ГОСТ CISPR 24-2013 «Совместимость технических средств электромагнитная. Оборудование информационных технологий. Устойчивость к электромагнитным помехам. Требования и методы испытаний»). Испытания обычно выполняются с помощью оборудования и процедур, указанных в стандарте IEC 61000-4-2 (ГОСТ 30804.4.2-2013 «Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к электростатическим разрядам. Требования и методы испытаний» идентичен IEC 61000-4-2:2008). Испытуемое оборудование может реагировать на такие воздействия, но после испытания должно самовосстановиться. Классическим примером является компьютер, воспроизводящий музыку через акустическую систему. Во время электростатического разряда вы услышите щелчок, но музыка будет воспроизводиться далее. В этом случае тестирование прошло успешно. Если воспроизведение музыки прекратилось и потребовалось вмеша-

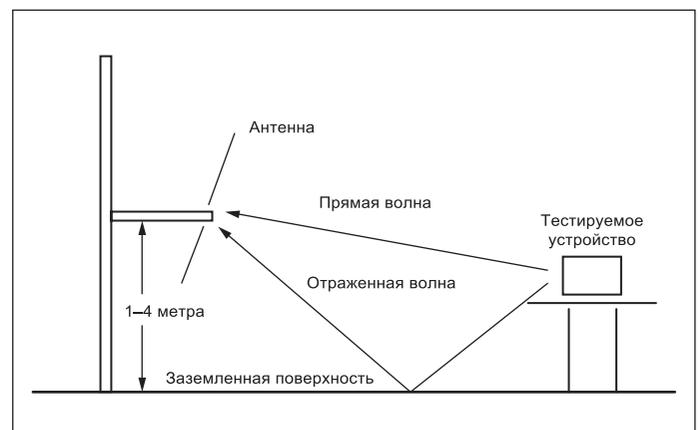


Рис. 6. Диаграмма, показывающая прямую и отраженную волны. Высота антенны настраивается для достижения максимального измерения

тельство оператора для ее повторного запуска или произошла потеря данных, это будет считаться отказом.

Для испытаний на воздействие электростатических разрядов может использоваться модель человеческого тела (*англ.* Human Body Model, HBM) и модель механического устройства (*англ.* Model of Mechanical Device, MOD), иногда ее называют «модель заряженного устройства». Названия моделей говорят сами за себя. Первая имитирует непосредственное прикосновение человека, несущего на себе накопленный заряд статического электричества, а вторая — контакт с оборудованием. Обе модели описаны в соответствующих стандартах, регламентирующих форму воздействующего электростатического импульса и уровни воздействия. Причем для одного и того же оборудования уровни устойчивости к воздействию импульсов разных моделей отличаются, для чего используется классификация устойчивости в зависимости от выбранной модели.

Испытание на устойчивость к излучаемому радиочастотному электромагнитному полю

Испытание на устойчивость к излучаемому радиочастотному электромагнитному полю устанавливает соответствие требованиям устойчивости электрического и электронного оборудования к излучаемой электромагнитной энергии. Цель данной проверки — установление общей основы для оценки устойчивости электрического и электронного оборудования к воздействию излучаемых радиочастотных электромагнитных полей.

Обычно процедура производится в диапазоне частот 80 МГц – 1 ГГц, хотя более новые стандарты предусматривают испытания вплоть до 6 ГГц, что вызвано широким распространением беспроводных технологий и новых стандартов сотовой связи. Так, цифровой стандарт мобильной связи GSM-1800 действует в диапазоне частот 1710–1880 МГц с выходной мощностью передатчика до 1 Вт. Это испытание проводится в полностью безэховой камере или SAC со съёмными поглопителями, расположенными на полу, за счет чего создаются условия открытого пространства. Сама же экранированная среда необходима для того, чтобы не возникло негативного влияния на окружающую электромагнитную обстановку. Такое загрязнение в ряде стран регламентируется, а нарушение может привести к существенным штрафам от контролирующих органов. Текущие требования по испытаниям установлены в стандарте IEC 61000-4-3 «Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к радиочастотному электромагнитному полю. Требования и методы испытаний», который является основополагающим документом в части ЭМС (в РФ действует ГОСТ 30804.4.3-2013, соответствующий редакции IEC 61000-4-3:2006, и ГОСТ IEC 61000-4-3:2016, идентичный международному стандарту IEC 61000-4-3:2010).

Стандарт IEC 61000-4-3 основан на использовании концепции плоскости однородного поля (*англ.* uniform field area, UFA), представляющей собой гипотетическую вертикальную плоскость поля, в которой изменения напряженности испытательного электромагнитного поля находятся в заданных пределах. Стандарт предусматривает следующее: до того как тестируемое устройство будет помещено в испытательное поле, напряженность поля должна быть равномерной и отвечать определенным условиям. Калибровку поля проводят в отсутствие испытываемого оборудования. Обычно оценивается устойчивость тестируемого изделия с четырех сторон. Причем в течение всей проверки изделие должно продолжать работать так, как будто ничего с ним не происходит, или самовосстанавливаться без потерь данных. Только в этом случае считается, что устройство успешно прошло данный вид испытаний.

Испытание на устойчивость к электрическим быстрым переходным процессам (пачкам)

Такое испытание должно продемонстрировать устойчивость электрического и электронного оборудования к различным переходным электромагнитным помехам, аналогичным возникающим в результате коммутационных процессов (прерываний индуктивных нагрузок, размыканий контактов реле и т. п.).

В ходе испытания оборудование подвергается воздействию пачек импульсов переходных процессов, подаваемых на порты электро-

питания, управления, сигналов и заземления, любые сигнальные линии длиной свыше 3 м. Существенными особенностями данных испытаний являются высокая амплитуда, малое время нарастания, высокая частота повторения и низкая энергия воздействующих импульсов.

Как и при испытаниях на невосприимчивость к электрическому разряду, после воздействия тестируемое оборудование должно продолжать работать без вмешательства оператора, но может реагировать на такое воздействие по мере его возникновения при условии, что система самовосстанавливается без потери данных. Испытательное оборудование, методы контроля и оценки результатов описаны в стандарте IEC 61000-4-4 (в РФ действует ГОСТ IEC 61000-4-4:2016 «Электромагнитная совместимость (ЭМС). Часть 4-4. Методы испытаний и измерений. Испытание на устойчивость к электрическим быстрым переходным процессам (пачкам)», идентичный IEC 61000-4-4:2012).

Устойчивость к микросекундным импульсным помехам большой энергии

Данный вид испытания должен продемонстрировать устойчивость электрического и электронного оборудования к воздействию микросекундных импульсных помех (МИП) большой энергии, вызываемых перенапряжениями, возникающими в результате коммутационных переходных процессов и молниевых разрядов. Степени жесткости испытаний на устойчивость к МИП определяются для различных условий электромагнитной обстановки и условий эксплуатации.

В общем случае проверка имитирует то, что происходит в цепи при подаче питания на испытуемое оборудование во время близкого удара молнии. С этой целью на вход питания тестируемого оборудования подаются высокие выбросы энергии. Подробности выполнения такой процедуры и испытательное оборудование, необходимое для проведения испытаний на перенапряжение, приведены в стандарте IEC 61000-4-5 (в РФ действует ГОСТ Р 51317.4.5-99 «Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к микросекундным импульсным помехам большой энергии. Требования и методы испытаний», который идентичен стандарту IEC 61000-4-5 в редакции 1995-02).

Устойчивость к кондуктивным помехам, наведенным радиочастотными электромагнитными полями

Проблема, которая привела к использованию этого метода испытаний, вызвана тем, что в стандартах на устойчивость к воздействию радиочастотных полей за граничную точку выбрана частота 80 МГц. Выбор связан с тем, что создание однородных полей ниже 80 МГц крайне затруднено. В результате ниже этого предела радиочастотная энергия обычно вводится непосредственно в кабели, подключенные к тестируемому оборудованию. Пример блок-схемы для такого типа испытаний показан на рис. 7. Атенуатор с фиксированным вносимым затуханием 6 дБ должен быть расположен как можно ближе к устройству связи/развязки (*англ.* Coupling Decoupling Network, CDN) или включен в его состав. Указанный аттенуатор не применяют, если выходное сопротивление широкополосного усилителя мощности находится в установленных пределах при любых условиях нагрузки. Хотя это и неясно показано в IEC 61000-4-6, но причина его установки как можно ближе к устройству связи/развязки заключается в том, что аттенуатор обеспечивает согласованный импеданс линии передачи, максимизируя передачу мощности на само устройство, входной импеданс которого точно не известен. В противном случае можно просто потерять половину сгенерированной мощности. (В РФ действует ГОСТ Р 51317.4.6-99 «Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к кондуктивным помехам, наведенным радиочастотными электромагнитными полями. Требования и методы испытаний», аналогичный стандарту IEC 61000-4-6 в редакции 1996-03.)

Типичный частотный диапазон для проверки на устойчивость к кондуктивным помехам, наведенным радиочастотными электромагнитными полями, для коммерческого оборудования составляет 150 кГц – 80 МГц. Кроме указанного метода ввода помехи, используют ее ввод с помощью клещей (ГОСТ Р 51317.4.6-99).

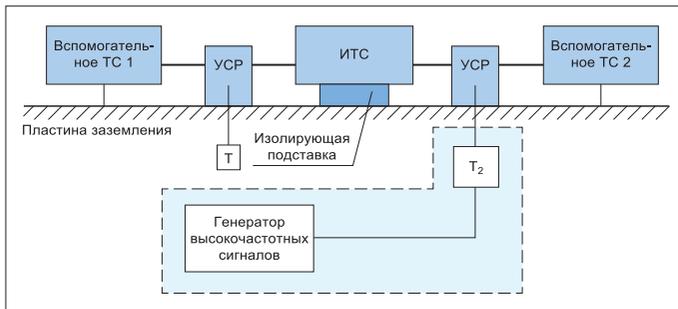


Рис. 7. Обобщенная испытательная установка для оценки влияния наводимых электромагнитных помех согласно ГОСТ Р 51317.4.6-99:
 T_2 — антеннатор 6 дБ; T — нагрузка 50 Ом; УСР — устройство связи/развязки; ИТС — тестируемое устройство; ТС — техническое средство

Испытания на устойчивость к магнитному полю промышленной частоты

Этому типу испытаний должно подвергаться электрическое и электронное оборудование, которое, исходя из его природы и назначения, может иметь проблемы с помехоустойчивостью к магнитному полю промышленной частоты. Такие продукты, как указано в стандарте CISPR 24, содержат дисплеи с электронно-лучевой трубкой (ЭЛТ), датчики магнитного поля и устройства на базе эффекта Холла. При проверке тестируемое оборудование помещается в середине большой катушки, через которую протекает ток заданной промышленной частоты для создания нужного уровня магнитного поля (например, 1 А/м, как сказано в CISPR 24), а тестируемое оборудование проверяется на правильность работы. При этом оборудование подвергается воздействию магнитного поля по всем трем осям координат. Большинство продуктов не требует подобной проверки, но она включена в семейство стандартов IEC 61000 по испытаниям на уровне ЭМП и требования по ЭМС. Порядок тестирования подробно описан в стандарте IEC 62000-4-8 (аналога этому стандарту в РФ нет, однако есть аналог Республики Беларусь ГОСТ IEC 61000-4-8-2013 «Электромагнитная совместимость. Часть 4-8. Методы испытаний и измерений. Испытания на устойчивость к магнитному полю промышленной частоты», разработанный в рамках Евразийского союза, но он не согласован РФ).

Устойчивость к провалам, кратковременным прерываниям и изменениям напряжения электропитания

Испытания предназначены для проверки устойчивости электрического и электронного оборудования к реально возможным кратковременным колебаниям напряжения питания и выполняются методом моделирования данной ситуации. Провалы и кратковременные прерывания напряжения возникают из-за неисправностей в электрических сетях и установках, вызываемых, прежде всего, короткими замыканиями, а также из-за внезапного резкого изменения нагрузки, или сброса/наброса нагрузки. В определенных случаях могут возникать два или более последовательных провала или прерывания напряжения питания.

В случаях, установленных в стандарте CISPR 35 “Electromagnetic compatibility of multimedia equipment — Immunity requirements”, который, как отмечено в [3], заменит собой стандарты CISPR 20 и CISPR 24, выполняются три типа проверки с использованием компьютеризованного источника питания. Первая проверка — уменьшение напряжения не менее чем на 95% в течение полупериода напряжения питания. Изменение напряжения должно располагаться от нулевого пересечения, это, собственно, и означает, что один полупериод напряжения питания, поданного на испытываемое оборудование, пропущен. Тестируемое устройство может реагировать на такое возмущение, но должно самовосстанавливаться без вмешательства оператора. Второй тест — 30%-ное снижение (70% остается) напряжения в течение половины секунды (25 периодов при питании напряжением с частотой 50 Гц или 30 циклов при 60 Гц), которое воспринимается как кратковременный провал. Здесь изделие также может реагировать на подобное возмущение

и самовосстанавливаться без вмешательства оператора. Третий тип проверки обычно предусматривает снижение входного напряжения в течение 5 с не менее чем на 95%, имитируя ситуацию, напоминающую ту, когда шнур питания вынут из розетки на 5 с, а затем снова подключен. Очевидно, что, если у испытываемого устройства нет встроенной батареи или оно не используется с источником бесперебойного питания (ИБП), это приведет к сбою. Если при таком воздействии функционирование испытываемого оборудования может быть восстановлено оператором в соответствии с инструкциями по эксплуатации и все данные, защищенные резервным аккумулятором, будут сохранены и не повреждены, считается, что испытываемое оборудование прошло проверку. Подробности выполнения этой процедуры и оборудование, необходимое для проведения испытаний, приведены в стандарте IEC 61000-4-11 (в РФ действует ГОСТ 30804.4.11-2013 (IEC 61000-4-11:2004)/ГОСТ Р 51317.4.11-2007 (МЭК 61000-4-11:2004) «Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к провалам, кратковременным прерываниям и изменениям напряжения электропитания. Требования и методы испытаний», однако настоящий стандарт модифицирован по отношению к международному стандарту IEC 61000-4-11:2004).

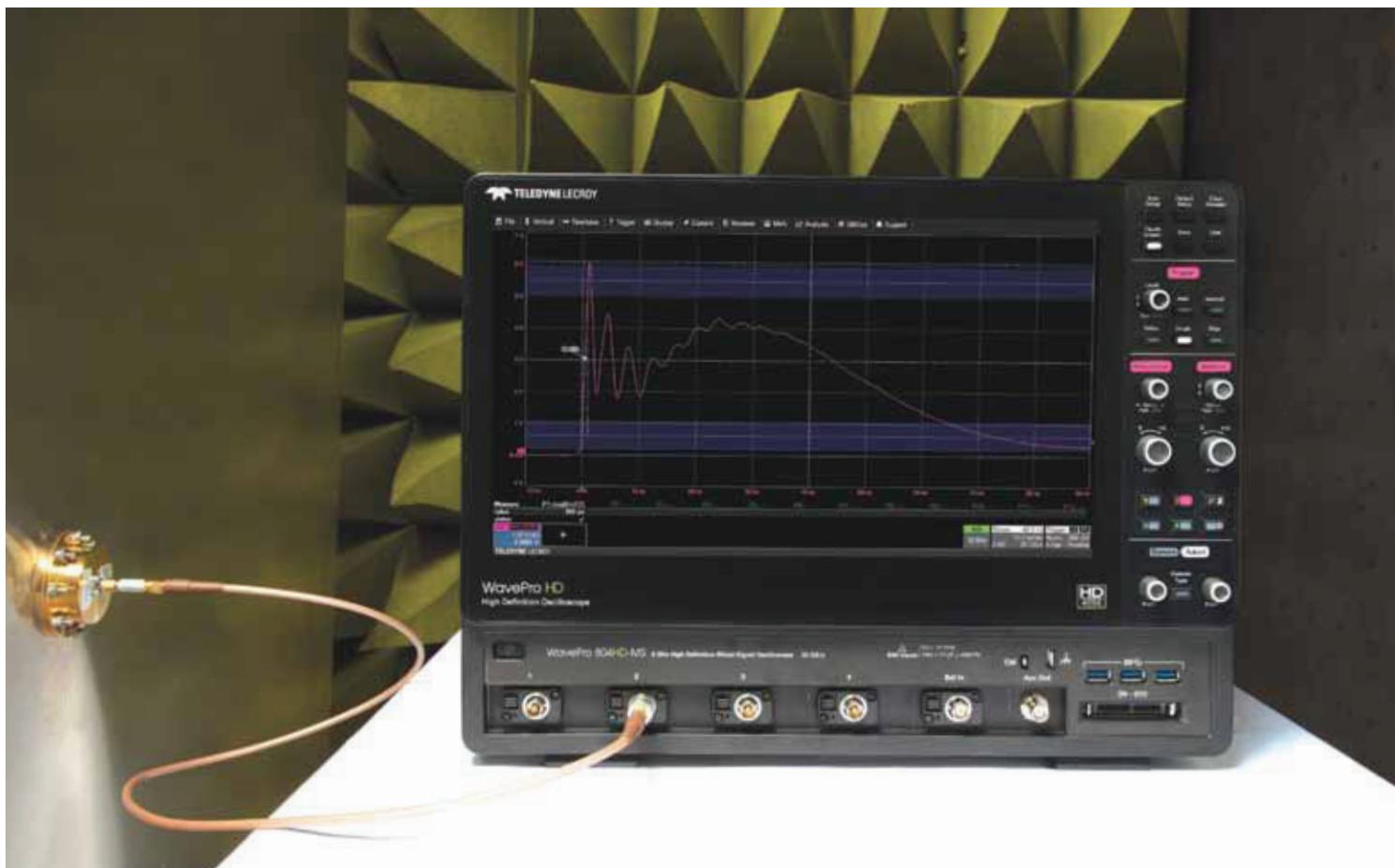
Что касается особенностей медицинского оборудования в части ЭМС, здесь можно обратиться к публикации [4], а советы по выполнению требований к ЭМС автомобильной электроники приведены в [5]. Полные перечни международных стандартов, стандартов отдельных стран и стандартов компаний, регламентирующих вопросы производства коммерческого оборудования, включая медицинское оборудование и автомобильную электронику, представлены в [1, 6].

Уровни соответствия, используемые как граничные при испытаниях коммерческого оборудования, предназначены для обеспечения разумной степени уверенности в том, что продукт будет должным образом работать в предполагаемой среде, и не представляют собой проверки на худший случай, но на протяжении многих лет являются адекватными. В реальности большинство продуктов характеризуют более низкие уровни собственных промышленных радиопомех, и они показывают более высокую устойчивость к воздействиям, если бы испытания проводились до достижения точки разрушения. А потому при правильном подходе к проектированию обычно используемые конструктивные решения, характерные для конкретных типов коммерческих продуктов, вполне достаточны для обеспечения их соответствия требованиям ЭМС и должного функционирования. ■

Литература

- 2017 EMC TESTING GUIDE, INTERFERENCE TECHNOLOGY GUIDE SERIES, 2017 ITEM Media. www.learn.interferencetechnology.com/2017-emc-testing-guide/
- Ghery Pettit, SUMMARY OF COMMERCIAL EMC TESTS. Pettit EMC Consulting/3. Рентюк В. Электромагнитная совместимость: проблема, от решения которой не уйти // Компоненты и технологии. 2017. № 7.
- Ле Февр П. Электропитание и проблемы электромагнитной совместимости оборудования при работе в медицинских средах // Компоненты и технологии. 2016. № 5.
- Заурвальд М. Десять советов для успешного проектирования автомобильной электроники с выполнением требований по ЭМС/ЭМП // Компоненты и технологии. 2016. № 5.
- 2017 EMC FUNDAMENTALS GUIDE, INTERFERENCE TECHNOLOGY GUIDE SERIES, 2017 ITEM. www.learn.interferencetechnology.com/2017-emc-fundamentals-guide/
- PMM 7010 All-in-one EMI Receiver, Narda Safety Test Solutions Srl. www.quantel-global.com/sites/default/files/attachment/7010.pdf
- PMM 9010, PMM 9030, PMM 9060 Fully CISPR-Compliant Digital EMC/EMI receivers 10 Hz – 6 GHz, Narda Safety Test Solutions Srl. www.quantel-global.com/sites/default/files/attachment/9010.pdf

Осциллограф серии WavePro HDR



Высокая частота дискретизации и глубокая память осциллографов WavePro HDR в сочетании программным пакетом измерения параметров ЭМС импульсов позволяет выполнить точный анализ импульсных сигналов.

Анализ импульсных сигналов

Для анализа импульсных сигналов с быстрым фронтом необходим осциллограф с полосой пропускания от 2,5 до 4 ГГц и высокой частотой дискретизации. WavePro HDR полностью отвечает данным требованиям, благодаря частоте дискретизации 20 ГГц Гс / с, ЦАП 12 бит и погрешности по вертикали 0,5% и обеспечивает точный анализ импульсных сигналов.

Захват на длительном интервале времени

Осциллографы WavePro HDR сочетают высокую частоту дискретизации и исключительно длинную память, позволяющую обеспечить захват всех нюансов и деталей последовательностей импульсов на более длительном интервале времени.

Программный пакет ЭМС измерений

Программная опция для ЭМС измерений полностью настраиваемая и позволяет выполнить измерения в соответствии с необходимым стандартом. Возможно выполнение установки пределов для игнорирования некоторых провалов, выбросов и аномалий. Фильтрация измерений позволяет выявить мешающие сигналы и паразитные помехи.

ООО «Лекрой Рус»

Что требуется при подготовке изделия для испытаний, как их проводят и чем они заканчиваются

Гери ПЕТИТ (Ghery PETTIT)
Ghery@PettitEMCConsulting.com
Перевод и дополнения:
Владимир РЕНТЮК
Rvk.modul@gmail.com

У вашего продукта есть требования к электромагнитной совместимости? Вы должны проверить его, чтобы продемонстрировать соответствие этим регламентам? Как вы сами готовитесь к тестированию? Как подготавливаете продукт? И хотя это две стороны одной медали, но прежде чем обращаться в испытательную лабораторию, к каждой из них необходим индивидуальный подход и проведена отдельная, самая тщательная работа. Чтобы быть во всеоружии, давайте посмотрим на них, так сказать, в порядке очереди.

В рамках третьей из анонсированных в [1] статей нас будут интересовать общие вопросы, связанные с подготовкой к проведению испытаний на выполнение требований по электромагнитной совместимости (ЭМС) и форме отчетности. Оригинальная статья [2] опубликована в выпуске [2], здесь она предлагается с комментариями, дополнениями, уточнениями и пояснениями переводчика как соавтора (с разрешения ITEM Media) предлагаемого варианта. Для начала отметим, что испытание на оценку ЭМС любого продукта, будь то бытовая стиральная машина или система управления огнем артиллерии, трудны в организационном плане и весьма затратны как по финансам, так и по времени.

Обычно проверка в части ЭМС, из-за ее крайней сложности, не входит в программу приемо-сдаточных испытаний, несмотря на то, что продукция специального назначения может предусматривать постоянный контроль вопросов ЭМС. Если у вас есть своя, специализированная и сертифицированная лаборатория, то вам несказанно повезло. (Так, крупное промышленное объединение, на котором долгое время работал переводчик и соавтор настоящей статьи, ввиду своей специфики имело подобную лабораторию, оснащенную самым современным на тот период оборудованием, поэтому имело возможность проводить различные испытания: периодические, типовые, на промежуточных этапах НИОКР и даже квалификационные.) Иначе придется искать сертифицированную лабораторию и ограничить испытания разумными рамками. Но и в первом, и во втором случае расходы неизбежны, поскольку неизвестно, что дешевле: содержать свою лабораторию с большими разовыми вложениями на оборудование и на аккредитацию или пользоваться услугами сторонних организаций. Хотя в первом варианте проектировщикам, конечно, удобнее, а затраты можно минимизировать предоставлением услуг. Если у вас разовые разработки, а периодические и типовые испытания не требуют проверки на ЭМС, целесообразно арендовать оборудование и обратиться в специализированные организации — лаборатории или испытательные центры (далее — испытательная лаборатория, или лаборатория). В любом случае, к испытаниям на ЭМС, как, впрочем, и к любым, необходима тщательная подготовка, а их результат — это соответствующий и должным образом оформленный итоговый документ и сертификат. Для примера на рис. 1 приведен в качестве образца проект одного из сертификатов, полученных компанией, в которой работал соавтор настоящей статьи.

Как правильно подготовиться к испытаниям

Во-первых, вам нужно точно знать, что надо иметь, прежде чем обращаться в испытательную лабораторию. Но предварительно нужно выбрать саму лабораторию, аккредитованную для данного типа испытаний. Затем следует узнать, какую информацию потребует лаборатория. Это нужно для правильного тестирования продукта и составления отчета по результатам испытаний. Перед выполнением некоторых типов испытаний отдельным лабораториям может понадобиться план их проведения — он называется «Программа испытаний». Ее содержание поможет в реализации тестов и сборе информации, необходимой для внесения в соответствующий протокол. Кроме того, данная программа избавит вас от «лишних» проверок и сократит общие затраты.

В процессе подготовки и по завершении испытаний все должно быть документировано и, что особенно важно, однозначно понято всеми сторонами, участвующими в процессе. Для этого на начальном этапе подготовки предпочтительно подписать совместные протоколы и договор, в котором указано, кто и что предоставляет, кто и что в результате делает и чем все заканчивается. (Здесь никогда не полагайтесь на «мы договорились». Помните, что человек хозяин своего слова: захотел — дал, захотел — забрал. Поверьте опыту соавтора статьи, который с конца 1970-х организовывал и проводил испытания всех типов, непосредственно участвовал в их выполнении, причем в разных странах.) Завершающий документ этого процесса — «Протокол испытаний» — не формальность, а итог ваших трудов по разработке продукции. На его основании вы получите сертификат. О требованиях к протоколу мы поговорим ниже.

Но вначале нужно решить два вопроса — выбрать соответствующее данному виду испытаний место проведения и подготовиться к самой процедуре. Причем это касается не только изделия, но и его разработчика или изготовителя.

Как выбрать испытательную лабораторию

Во-первых, следует точно определить цель испытаний и знать, что потребует от лаборатории, чтобы результаты выполненных тестов были приняты в странах, куда вы хотите поставлять продукт. Только отдельные лаборатории имеют аккредитацию, признанную

во всем мире, и требования к таким лабораториям настолько обширны и специфичны, что выходят за рамки статьи. Но повторюсь: вы должны четко убедиться, что результаты и отчеты лаборатории будут для вас приемлемыми. В некоторых странах нет ограничений на территориальную принадлежность испытательной лаборатории, и тогда вы можете выбирать ее по своему усмотрению, но в ряде стран могут потребовать, чтобы лаборатория была аккредитована и находилась именно в их стране. Если у вас возникают любые сомнения — попросите представить соответствующие доказательства.

Во-вторых, наличие аккредитации само по себе не является доказательством, что лаборатория действительно выполняет свою работу качественно. Вы должны изучить не только предложения и уровни требований в разных странах, но и провести собственную проверку подобных центров. Одни будут рады вашему визиту, другие — нет, и могут встретить вас буквально в штыки. Вам нужно решить, какой уровень сервиса подходит для вашей компании. На рис. 2 в качестве примера представлена современная испытательная лаборатория по ЭМС компании API Technologies Corp., часть оборудования была приведена ранее в первой статье этого цикла [5].

Если у вас еще нет достаточного опыта, то для оценки лабораторий, которые вы рассматриваете, лучше нанять консультанта, в чем нет ничего зазорного.

После того как вы остановили свой выбор на подходящем варианте, направьте запрос и узнайте (напоминаю, все в письменной форме!), какую информацию понадобится предоставить. Позже мы поговорим о данных, которые лаборатория должна включить в отчет об испытаниях, и вы увидите, что часть этой информации исходит именно от вас. Так что, повторюсь, когда вы направляетесь на испытания, вы должны четко знать, какая информация необходима, какая у вас уже есть и какой нет. Некоторые лаборатории принимают к рассмотрению проекты документов, но к завершению испытаний нужны их полностью оформленные версии. Если вы не имеете полного комплекта документов, то для этого лучше сразу составить график, определить, кто за что отвечает, и указать сроки исполнения, не забывая их контролировать.

Учтите также, что вы предоставите лаборатории сведения, часть которых может быть интеллектуальной собственностью, а часть — конфиденциальной коммерческой информацией. Вы должны быть твердо уверены, что ни первое, ни второе не окажется в распоряжении ваших конкурентов. Поэтому над договором на проведение испытаний должны поработать не только технические специалисты, но и юристы. Необходимо четко описать и форс-мажорные обстоятельства, а не слепо копировать устоявшиеся определения.

Кроме того, стороны могут в буквальном смысле разговаривать на разных языках. Если вы работаете с иностранной лабораторией, важно иметь точный и однозначный перевод протоколов совещаний и итоговых документов. Вот пример из собственного опыта соавтора настоящей статьи. Испытания оборудования проходили в одной из азиатских стран, по вине местной компании — организатора испытаний возникли проблемы, которые потребовалось донести до заказчика — Министерства обороны. В итоговом напечатанном протоколе была выявлена замена согласованной грамматической формы, которая косвенно подменяла ответственного за задержку, наносила ущерб нашей репутации и требовала дополнительных финансовых затрат.

Неотъемлемая часть процесса выбора лаборатории должна включать вопросы о сроках осуществления работ, что обязательно следует зафиксировать в договоре. Вы можете столкнуться с ситуацией, когда лаборатория настолько занята, что не может вписаться в установленное время и требует на испытания, например, до полугода, а вам нужно отгрузить изделия через месяц. Период тестирования необходимо четко оговорить и строго следовать его выполнению. Ведь для руководства компании нет ничего хуже, чем узнать, что отгрузка товара и получение за него денег откладывается на несколько месяцев. Будь это ваша вина или нет, но виноватым в любом случае постараются назначить организатора процесса. Так что вы должны точно знать планы компании по поставкам и то, что испытательная лаборатория уложится в назначенные сроки. Тут можно вспомнить закон Мерфи:



**HURSLEY
EMC
SERVICES**

Certificate of Test

No. 12S317 CC

Issue#1: 28th September 2012

UKAS Accredited
EU Notified Body
FCC & VCCI Registered
BSMI Lab ID: SL2-IN-E-3008
KC Lab ID: EU 0176

This document is hereby issued by Hursley EMC Services Limited to the named manufacturer. It is valid only for the product identified below in respect, either in part or in full, to the relevant electromagnetic requirements necessary for compliance with the EMC Directive 2004/108/EC and other national requirements.

PRODUCT:	Automatic Card Dispenser Shuffler	
	Serial number: ACDS 0004	
<i>Product build level:</i>	Production sample	
<i>Production modifications:</i>	See below for details	
<i>Product manufacturer:</i>	Perth Resources Ltd.	
<i>Product build description:</i>	Ref. Job sheet 12S317 defining product & support equipment	
<i>Customer:</i>	Perth Resources Ltd.	
	Aston House, 19 Peel Road, Douglas, Isle of Man, IM1 4LS.	
	Tel: +44 (0)1624 632117	
<i>Test commissioned by:</i>	Mr Chris Webster of TCS John Huxley Europe Limited	
<i>Test date(s):</i>	30 th July to the 3 rd August 2012	
<i>Test deviation:</i>	None for tests applied	
<i>Test measurement site(s):</i>	Hursley EMC Services Limited	
	• Unit 16, Brickfield Lane, Chandlers Ford, Hampshire	
	• Hursley Park, Winchester, Hampshire	
	Information Technology Equipment	
<i>Equipment category:</i>		
<i>Applied and, as modified, met EMC test standards:</i>		
Emissions: EN 55022:2006	Radiated disturbance & Conducted disturbance	- CISPR 22:2005 Class A
inc A1:2007 & A2:2010		
EN 55022:2010 [†] , VCCI, AS/NZS CISPR 22		
SANS 222:2006 / CISPR 22:2006		
FCC/CFR 47:Part 15	Radiated disturbance # & Conducted disturbance	- ANSI C63.4:2003 Class A & CISPR 22:2008 [†]
Canadian Standard ICES-003:Issue 5		
EN 61000-3-2:2006 inc A1/A2:2009	Mains harmonics	- Class A
EN 61000-3-3:2008	Mains voltage flicker (dmax=4%)	
Immunity: EN 55024:2010	Electrostatic discharge *	- EN 61000-4-2:2009
SANS 224:1997 / CISPR 24:1997	Radiated RF interference	- EN 61000-4-3:2006 inc A1:2008 & A2:2010
	Fast transient bursts	- EN 61000-4-4:2004
	Surge	- EN 61000-4-5:2006
	Conducted RF field	- EN 61000-4-6:2009
	Voltage dips and interruptions	- EN 61000-4-11:2004

UKAS uncertainty statement: The uncertainty of measurement for each test has been included to support a level of confidence of approximately 95%. A test which is failed shows that the result is within the uncertainty budget and a 95% confidence level cannot be specified.
 This product complies with the technical requirements concerning the applied sections of the above identified test standards.
 This certificate relates to the products specified and may not represent the entire population.
 Test data and product details for reporting purposes are filed (ref:12S317) at Hursley EMC Services Ltd.
 Product modifications: To meet the Radiated disturbance requirements the PC ribbon cable was re-routed, the switch box connected to ribbon cable PCB was modified and screened. The D cable was connected directly to the server bypassing the switch box.
 *Note: The product was housed in a non-metallic cabinet and therefore no direct ESD were possible to be performed.

PROJECT ENGINEER: S. M. Connelly



† This version of the standard is not currently on the UKAS Schedule for Hursley EMC Services.
 Approved signatories: J. A. Jones () R. P. StJohn James ()
 The above named are authorised Hursley EMC Services engineers

Hursley EMC Services Ltd.
Unit 16, Brickfield Lane
Chandlers Ford
Hampshire. UK. SO53 4DP



1871

Tel: +44 (0) 23 8027 1111
Fax: +44 (0) 23 8027 1144
e mail: sales@hursley-emc.co.uk
www.hursley-emc.co.uk

Рис. 1. Пример одного из сертификатов (предварительный текст документа) на продукцию компании «Модуль-98» (представитель в Великобритании — компания Perth Resources Ltd.), публикуется с разрешения компании

«Добавив две недели к положенному по графику сроку на непредвиденные задержки, добавьте еще две недели на непредвиденность самих задержек». Согласитесь, что-то в этом есть. К тому же надо принимать во внимание и риски, что испытания не всегда проводятся успешно с первого захода. Поверьте, это очень большая удача. А значит, обсудите данные аспекты с лабораторией и установите, сколько времени потребуют испытания, затем уточните, когда вам предоставят отчет. Эти сроки поддаются оценке и могут быть достаточно объективными.

Все вышеизложенное сказано для того, чтобы ваша деятельность как разработчика или изготовителя не стала тем узким местом, которое затормозит процесс, ведь хлеб разработчика и без того не всегда сладок. Словом, проведите обсуждения на самой ранней стадии (как с лабораторией, так и в компании) и, главное, сохраните информацию, например, в виде утвержденного руководством протокола совещания. Ведь проблемы лучше раскрыть аргументированно и сразу, чем скрыть правду, а потом, разведя руками, поставить руководство перед уже свершившимся фактом, мол, извините, так вышло. Помните, предупрежден — значит вооружен.

Как подготовить изделие к испытаниям

В первую очередь примите все меры для того, чтобы в рамках НИОКР разработать продукт с учетом требований ЭМС. Постоянно держите этот вопрос на контроле, уделяйте ему самое пристальное внимание на уровне не только схемотехнических решений, но и конструктивных особенностей, что должно увеличить шансы нахождение испытаний изделия с первого раза. Здесь очень важно из-



Рис. 2. Испытательная лаборатория по ЭМС компании API Technologies Corp.

бежать обычных для команд разработчиков конфликтов интересов, возникающих при решении вопросов ЭМС [4].

Тщательно проверяйте всю проектную документацию — тогда вы сможете убедиться, что в конструкцию продукта не попали очевидные ошибки. Причем такую проверку должен осуществлять не только ведущий инженер, но и независимый эксперт. Если этого нет, то возможен перекрестный контроль. Обязательно проводите предварительные испытания, которые выполняются по сокращенной программе и не столь затратны. Таким образом удастся выявлять ошибки на наиболее ранних этапах ОКР, когда их легче всего устранить. Сравнение расходов на поэтапные разработки приведено в [1].

После того как изделие спроектировано, проверено и отлажено, убедитесь, что для его тестирования доступно все необходимое оборудование и ПО. Аппаратное обеспечение, предоставленное вами в лабораторию, может быть больше, чем только те «черные ящики», которые вы отдаете для испытаний. Продумайте и то, что вы предложите относительно периферийных устройств — эквивалентов, нагрузок, пультов управления, имитаторов, а также всего того, что мы называем нестандартным оборудованием — НСИ. Однако учтите, не во всех странах и не для всех видов испытаний такое оборудование допустимо. Ряд государств, например США, для сертификационных испытаний требует использования только стандартного измерительного оборудования. Надо уточнить, являются ли все сопутствующие устройства обычными или стандартизованными, которые лаборатория может иметь в своем распоряжении (скажем, эквивалент полного сопротивления сети ЭПСС (LISN) [5] в лаборатории всегда присутствует), или это специальное оборудование и оно есть только у вас (в частности, оригинальная антенна).

Вы должны убедиться, что все узлы оборудования установлены правильно и крепежные детали шасси и корпуса имеют штатный крепеж и плотно затянуты. Кроме того, следует позаботиться о кабелях (и проверить их), соединяющих различные части системы. Возможно, для испытаний потребуются и специально разработанные кабели для подключения измерительного оборудования и эквивалентов.

Классический пример — HDMI-интерфейс, его кабель приведен на рис. 3. Если ваш продукт зависит от экранированных кабелей, то при использовании обычных HDMI-кабелей, соответствующих необходимой спецификации, экранирование может оказаться недостаточным. Спецификация HDMI не определяет требования к заделке внешнего экрана кабеля, и многие кабели, совместимые с HDMI-интерфейсом, обычно в целях экономии не имеют общего внешнего экрана либо он выполнен и заделывается надлежащим образом. Подобные кабели соответствуют спецификации HDMI, но не требованиям по ЭМС. Если для вашего изделия есть требования по уровню электромагнитных помех, обязательно убедитесь, что кабели, предназначенные для испытания, как и кабели, поставляемые вместе с вашим продуктом, должным образом экранированы, а их подключение, если это интерфейсы, отвечает регламентам спецификации.

Если для того, чтобы ваш продукт был проверен на соответствие требованиям стандарта по ЭМС, требуется какое-либо ПО, вы должны поставить его вместе с продуктом или предварительно установить, убедившись, что оно работает. И не забывайте, что часы начинают тикать сразу, как только ваше оборудование пересекло порог испытательной лаборатории. Вы же не хотите платить (как правило, оплата здесь почасовая) за устранение проблем с вашим продуктом из-за того, что вы забыли поставить тестовое ПО или не предоставили кабель, за которым придется возвращаться в компанию? Это хорошо, если вы в одном городе, а если в разных странах? Однажды компания, в которой работал соавтор, передала на испытания изделие, для установки которого потребовались нестандартные втулки. На привычный для нас вопрос, а можно их быстренько сделать, — ответили: да, без проблем. Пришел инженер, сделали эскиз, оговорили срок — завтра. Через пять минут принесли чертеж и калькуляцию. Втулки «появились» на 200 фунтов стерлингов за штуку в ценах конца 1990-х, и их, все шесть штук, готовы были доставить завтра; пришлось вытаскивать их самим в гараже нашего представителя.

Целесообразно заранее подготовить следующее: конструкторскую документацию на изделие (объем надо уточнить), руководство по монтажу, инструкцию по эксплуатации, дополнительные инструменты (особенно специализированные), необходимые для разбор-

ки и сборки изделия (она может потребоваться), а также резервные копии программного обеспечения, резервный ноутбук, резервный образец изделия, который будет использоваться в случае отказа основного. Последнее особенно важно для потенциально разрушающих испытаний, таких как, например, проверка на устойчивость к разрядам электростатического электричества, или его полной разборки до уровня плат с частичной распайкой (случается и такое). Пригодятся и дополнительные кабели, помехоподавляющие ферритовые элементы, медная лента и алюминиевая фольга, позволяющие быстро найти и устранить несоответствия требованиям по ЭМС. Такие доработки в ходе испытаний допустимы, и мы использовали их при испытаниях нашего оборудования в одном из европейских сертификационных центров [6]. А благодаря запасным коммутаторам и кабелям модернизировали передвижную испытательную лабораторию в одной из азиатских стран, что сократило сроки проверки нашего оборудования и подарило нам благосклонность местного высокого начальства. Это помогло нам и в дальнейшем. Главное — не терять дорогое в прямом и переносном смысле время, подготовиться заранее и иметь все необходимое под рукой.

Какую информацию следует предоставить лаборатории

По завершении испытаний лаборатория должна составить и передать вам отчет в виде «Протокола испытаний». В практике зарубежных лабораторий отчеты об испытаниях выдаются, как правило, после успешного окончания тестирований, то есть при условии, что изделие их прошло. Оформлять полный отчет об изделии, которое не соответствует требованиям, — пустая трата времени и денег заказчика. Однако при выявленном несоответствии испытания могут быть продолжены, если это возможно (решение принимает заказчик), и заказчику выдается полная информация о пунктах несоответствия. Это позволяет разработать мероприятия по их устранению, внести корректировки и направить изделие или на продолжение испытаний, или на повторные испытания. В отличие от практики советского периода лаборатории, как и заказчики, заинтересованы исключительно в положительных результатах. Вы редко встретите предвзятое отношение, в большинстве случаев вам окажут консультативную помощь (но не в письменном виде, это отдельный договор и оплата). Все решения отдаются в ваши руки, согласовывать мероприятия с испытательной лабораторией обычно не требуется, но приветствуется и помогает решить проблемы. Вы должны твердо усвоить, что испытательная лаборатория — это лишь инструмент, а решения принимаете только вы, хотя конечная ответственность после подписания протокола лежит уже на лаборатории. Что делать при выявлении несоответствия — тема отдельной статьи.

Измерения изделия проведены, но процедура испытаний не закончена. Она будет завершена только с оформлением и передачей вам протокола. И тут к месту вспомнить слова профессора Преображенского о «бумажке» из известного произведения М. Булгакова. Так что нам нужна не просто «бумажка», а настоящая «бумажка», которая будет защитой от любого Швондера. Неправильно оформленный протокол сведет на нет все ваши усилия, а ваши деньги будут потрачены впустую. Оформление протокола не менее важный момент, чем сами измерения и их результаты. Требования к такому документу под официальным названием «Протокол испытаний» («Test Report») стандартизованы. В странах ЕС и других государствах они регламентируются руководством ISO/IEC 17025:2005 [7], но регулирующие органы стран, в зависимости от необходимости, могут добавлять собственные требования. В РФ действует стандарт ГОСТ ИСО/МЭК 17025-2009 «Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий» [8], который полностью соответствует описанному выше международному стандарту.

В протоколе испытаний указывают не только их итог, но и всю необходимую информацию результатов испытаний, а также все сведения в части идентификации используемых методик. В общем, это симбиоз собственно протокола и программы испытаний с дополне-

ниями и комментариями. Здесь нет мелочей и относиться к такому документу нужно со всей тщательностью. Ряд обязательных элементов, подлежащих включению в протокол испытаний, перечислен в пп. 5.10.2 и 5.10.3 руководства ISO/IEC 17025, при этом для упрощения использования сохраним их оригинальную нумерацию.

Что касается п. 5.10.2 ISO/IEC 17025, требования включают:

1. Наименование документа «Протокол испытаний».
 2. Наименование и адрес лаборатории, а также место проведения испытаний, если оно не находится по адресу лаборатории.
 3. Уникальную идентификацию протокола испытаний, а также идентификацию на каждой странице, чтобы обеспечить признание страницы как части протокола испытаний, и, кроме того, четкую идентификацию конца протокола испытаний.
 4. Наименование и адрес заказчика.
 5. Идентификацию используемого метода/методики.
 6. Описание состояния объекта испытаний (ИО), четкую и однозначную идентификацию объекта (объектов) испытаний на обложке или на первой странице отчета;
 - идентификация ИО указывается на обложке или на первой странице отчета;
 - указание номеров моделей и торговые наименования изготовителя.
 7. Дату получения объекта (объектов), подлежащего(их) испытаниям, если это существенно для достоверности и применения результатов, а также дату(ы) проведения испытаний.
 8. Ссылку на план и методы отбора образцов, используемые лабораторией или другими органами, если они имеют отношение к достоверности и применению результатов.
 9. Результаты испытаний с указанием (при необходимости) единиц измерений.
 10. Имя, должность и подпись или эквивалентную идентификацию лица (лиц), утвердившего(их) протокол испытаний.
 11. При необходимости указание на то, что результаты относятся только к объектам (образцам), прошедшим испытания.
- Кроме того, необходимо учитывать примечания 1 и 2:
- Примечание 1 — экземпляры протоколов испытаний, выполненные на бумаге, должны иметь нумерацию страниц и указание общего числа страниц.
 - Примечание 2 — лабораториям рекомендуется прилагать заявление о том, что протокол испытаний не может быть частично воспроизведен без письменного разрешения лаборатории.

Что касается п. 5.10.3 ISO/IEC 17025, то в дополнение к требованиям, перечисленным в п. 5.10.2, протоколы испытаний должны, если это необходимо для толкования результатов испытаний, включать следующую информацию:

1. Отклонения, дополнения или исключения, относящиеся к методике испытаний, а также информацию о специальных условиях испытаний, таких как условия окружающей среды. Эти условия могут включать, например, следующее:
 - температура, влажность, барометрическое давление;
 - рабочее напряжение и частоту питающей сети (блока питания).
2. При необходимости указание на соответствие/несоответствие требованиям и/или техническим условиям.
3. При необходимости указание на оцененную неопределенность измерений (уточнение по ГОСТ ИСО/МЭК 17025-2009: информация о неопределенности должна присутствовать в протоколах испытаний, если она имеет отношение к достоверности или применению результатов испытаний, если этого требует инструкция заказчика или неопределенность влияет на соответствие заданному пределу).
4. Если это уместно и необходимо, мнения и толкования. Мнения и толкования, содержащиеся в протоколе испытаний, могут, в частности, касаться:
 - мнения о соответствии/несоответствии результатов требованиям;
 - выполнения требований, включенных в контракт;
 - рекомендаций по использованию результатов;
 - предложений по внесению улучшений.

В протокол также может быть включена дополнительная информация, в которой отражено использование специальных ме-

тодик испытаний или требования заказчика. (В практике соавтора статьи вначале мы получали проект протокола и могли проверить его, исправить неточности и внести согласованные с лабораторией изменения.)

Особенности проведения испытаний и требования разных стран

В разных странах есть свои особенности. Так, для испытаний в Великобритании от нас требовали полный комплект документации (оформленной в виде pdf-файлов), в том числе механику, схемы, платы (сборки и сами платы), кабели, спецификации и перечни элементов. Кроме того, ведомость покупных в виде Bill of Material на изделие в целом с указанием поставщиков всех компонентов, включая монтажные провода и корпуса, а также сертификаты, которых не было в свободном доступе. Вся эта документация остается на хранении в лаборатории.

Что касается США, то Федеральная комиссия по связи (FCC, Federal Communications Commission) вводит некоторые дополнительные требования. Они будут варьироваться в зависимости от процесса утверждения, используемого для данного изделия, и отражены в регламенте FCC под регистрационным кодом 47 CFR (Свод федеральных нормативных актов). При необходимости к оригиналам требований под эти кодом можно обратиться через сайт The U. S. Government Publishing Office (www.gpo.gov). Слева есть переход FDsys: GPO's Federal Digital System, после чего открывается поисковик. В рамках настоящей статьи нас будут интересовать три момента: испытания на верификацию (Devices authorized under Verification), сертификацию (Devices authorized under Certification) и на заявление о соответствии (Devices authorized under Declaration of Conformity).

При испытаниях на верификацию требования по оформлению протокола установлены в 47 CFR § 2.955 Retention of records (см. 2.955(a)(3)) и имеют много общего с положениями ISO/IEC 17025. Этот документ требует (для упрощения использования оригинальная нумерация сохранена):

- (i) Фактическую дату проведения всех испытаний.
- (ii) Название испытательной лаборатории, компании или лица, проводящего проверочные испытания.
- (iii) Описание того, как устройство было фактически проверено, с идентификацией процедуры измерения и использованного испытательного оборудования.
- (iv) Описание испытуемого и вспомогательного оборудования, подключенного к испытуемому оборудованию или установленного внутри него.
- (v) Идентификацию испытуемого и вспомогательного оборудования по торговым наименованиям и номерам моделей, а при необходимости — по идентификатору FCC и серийному номеру.
- (vi) Указание типов и длины используемых соединительных кабелей, а также их расположение или перемещение в ходе испытаний.
- (vii) Как минимум два рисунка или фотографии, показывающие испытательную установку (схему) и результат для большего уровня кондуктивных помех, а также испытательную установку (схему) и результат для наивысшего зафиксированного уровня электромагнитного излучения. Эти чертежи или фотографии должны содержать достаточно подробностей для подтверждения информации, представленной в отчете об испытаниях. Все используемые фотографии должны быть оригинальными, с высокой резкостью, без бликов или темных пятен, и точно отображать используемую конфигурацию оборудования.
- (viii) Все изменения, если таковые имеются в испытуемом оборудовании, выполненные испытательной лабораторией (компанией) или физическим лицом для достижения соответствия заявленным требованиям.
- (ix) Все данные, необходимые для подтверждения соблюдения положений соответствующих стандартов.

- (x) Содержать подпись лица, ответственного за испытания изделия, вместе с именем, фамилией и подписью, как должностного лица ответственной стороны, в соответствии с требованиями § 2.909 регламента 47 CFR.

При испытаниях на сертификацию требования по оформлению протокола установлены в 47 CFR § 2.1033 Application for certification (47 CFR 2.1033(b)) и имеют много общего с положениями ISO/IEC 17025. Этот документ требует следующее (для упрощения использования оригинальная нумерация сохранена):

- (1) Полное наименование и почтовый адрес изготовителя устройства и заявителя для его сертификации.
 - (2) Идентификационный код FCC (по этому коду можно найти изделие в базе данных FCC).
 - (3) Копии инструкции по установке и эксплуатации, которые предоставляются пользователю. Если какой-либо документ недоступен, то можно представить его проект. В этом случае FCC должен быть предоставлен итоговый документ, когда он будет разработан.
 - (4) Краткое описание функций схемы устройства вместе с инструкцией, описывающей работу устройства. Этот документ должен содержать описание всего наземного оборудования и антенны, если таковая имеется и используется с испытуемым устройством.
 - (5) Блок-схему, на которой указаны частоты всех генераторов в устройстве. Пути прохождения сигнала и его частота должны указываться на каждом блоке. Диапазоны настройки и промежуточная частота(ы) должны указываться в каждом блоке. Для передатчиков, в том числе и для источника мешающего электромагнитного сигнала, если он является межсистемной помехой, также требуется представить блок-схемы.
 - (6) Отчет об измерениях, подтверждающий соответствие техническим требованиям FCC. В этом отчете должна быть указана используемая процедура испытаний (например, можно указать процедуру тестирования FCC или процедуру, применяемую в данной области промышленности), дата проведения измерений, место проведения измерений и описание тестируемого устройства (модель и его серийный номер, если имеется). Отчет должен содержать расчеты, показывающие, как результаты измерений были преобразованы для сравнения с техническими требованиями.
 - (7) Должно быть представлено достаточное количество фотографий, которые четко показывают внешний вид и конструкцию устройства, размещение компонентов на шасси и сборку шасси. Внешние виды должны показать общий внешний вид, антенну, используемую с устройством (если есть), элементы управления, доступные пользователю, и необходимую идентификационную метку достаточно подробно, чтобы можно было прочесть имя и идентификационный код FCC. Вместо фотографии может быть представлена этикетка или образец этикетки (или факсимиле) вместе с эскизом, показывающим, где эта метка будет размещена на оборудовании. Фотографии должны быть размером A4 (21×29,7 см) или 8×10 дюймов (20,3×25,4 см). Меньшие по размеру фотографии могут быть представлены при условии, что они точно показывают необходимые детали. Эти фотографии должны быть наклеены на листе бумаге A4 (21×29,7 см) или 8,5×11 дюймов (21,6×27,9 см). Образец ярлыка или факсимиле вместе с эскизом, показывающим размещение этой этикетки, также должен быть представлен на бумаге этого размера.
 - (8) Если оборудование, которое направлено на сертификацию, необходимо протестировать с подключенными или установленными периферийными или вспомогательными устройствами, следует предоставить краткое описание этих периферийных устройств или аксессуаров. Периферийные или вспомогательные устройства не должны иметь изменений и быть имеющимся в продаже оборудованием.
- При испытаниях на сертификацию требования по оформлению протокола установлены в 47 CFR § 2.1075 Retention of records (см. 47 CFR 2.1075(a)(3)). Этот документ предусматривает (для упрощения использования оригинальная нумерация сохранена):
- (1) Фактическую дату проведения всех испытаний.

- (2) Название испытательной лаборатории, компании или лица, выполняющего испытания. Комиссия может запросить дополнительную информацию об испытательном полигоне, испытательном оборудовании или квалификациях компании или об отдельных лицах, выполняющих испытания.
- (3) Описание того, как устройство было фактически испытано, с идентификацией процедуры измерения и использованного испытательного оборудования.
- (4) Описание испытываемого и вспомогательного оборудования, подключенного или установленного внутри испытываемого оборудования.
- (5) Идентификацию испытываемого и вспомогательного оборудования по торговым наименованиям и номеру модели, при необходимости — по идентификатору и серийному номеру FCC.
- (6) Типы и длину используемых соединительных кабелей, как они были расположены или перемещены в ходе испытаний.
- (7) По меньшей мере две фотографии, показывающие испытательную установку (схему) и результат для большего уровня кондуктивных помех, а также испытательную установку (схему) и результат для наивысшего зафиксированного уровня электромагнитного излучения. Фотографии должны содержать достаточно подробностей для подтверждения информации, содержащейся в отчете об испытаниях. Все используемые фотографии должны быть оригинальными, с высокой резкостью, чтобы четко подтвердить информацию, содержащуюся в протоколе испытаний.
- (8) Описание всех изменений в испытываемом оборудовании, внесенных испытующей компанией или физическим лицом, для достижения соответствия заявленным требованиям.
- (9) Описание всех изменений, внесенных в испытываемое оборудование испытательной лабораторией (компанией) или физическим лицом, для достижения соответствия заданным требованиям.
- (10) Содержать все данные, необходимые для подтверждения соблюдения положений соответствующих стандартов.
- (11) Содержать подпись лица, ответственного за испытания изделия, вместе с именем, фамилией и подписью, как должностного лица ответственной стороны, в соответствии с требованиями § 2.909 регламента 47 CFR.
- (12) Копия информации о соответствии, как это указано в § 2.1077 регламента 47 CFR, которая требуется при поставках оборудования.

В качестве еще одного примера возьмем Тайвань. На Тайване за интересующую нас процедуру отвечает Бюро стандартов, метрологии и инспекций BSMI (BSMI — Bureau



Рис. 3. Конструктивные особенности кабеля HDMI-интерфейса

of Standards, Metrology and Inspection), и оно имеет несколько собственных требований к содержанию отчета. Ниже приведены основные требования:

1. Если выполняется тестирование с различным количеством кабелей, подключенных к нескольким образцам определенного типа порта ввода/вывода, то должны быть предоставлены данные для каждого из используемых кабелей. Здесь необходимо показать, что добавление кабеля не увеличивает уровни электромагнитных помех более чем на 2 дБ.
2. В протокол испытаний необходимо внести утверждение о том, что итоговые результаты тестирования представляют собой наилучший случай, а также список всех вариантов конфигурации оборудования, которые были исследованы для определения наилучшего случая.
3. Необходимо представить четкие фотографии испытательной установки, обеспечив достаточную детализацию для возможного повторения процедуры испытаний. Каждое устройство, подлежащее испытаниям, должно быть тщательно документировано. Для этого требуется:
 - шесть фотографий внешнего вида испытываемого оборудования, если оно относится к классу А;
 - шесть фотографий внешнего вида и шесть фотографий внутренних частей испытываемого оборудования, если оно относится к классу В;
 - фотографии источников питания и внутренних печатных плат;
 - фотографии плат должны быть выполнены с обеих сторон с достаточным разрешением, чтобы можно было определить критические для ЭМС элементы;
 - минимальный размер фотографий 4×6 дюймов.

4. Перечень компонентов подавления электромагнитных помех в продукте, которые могут быть удалены.
5. Перечень основных компонентов, генерирующих ЭМП (генераторы тактовых импульсов и распределительные устройства).
6. Блок-схема испытываемого оборудования, показывающая распределение сигналов тактовой частоты.
7. На титульном листе BSMI требует наличие следующей информации:
 - название изделия. Должно быть то же наименование, которое указано на упаковке для доставки и окончательной продажи;
 - заявитель;
 - описание характеристик главной шины;
 - логотип или бренд;
 - номер модели или тип. Подробные номера моделей;
 - результаты испытаний. Прошло. Класс состояния А или класс В;
 - оригинальная подпись. Электронные подписи приемлемы, если отчет и вся сопроводительная документация представлены на CD-ROM.
8. Следующие пункты могут быть специфическими для одного регулятора, но для других должны быть представлены в отчете:
 - а) Список аккредитаций, утверждений, перечень испытаний, которые проводятся лабораторией. При необходимости требуется указание идентификационного номера.
 - б) Если в отчете содержится несколько номеров моделей, необходимо дать описание и доказательства различий, рассмотренных лабораторией.
 - в) Имя и подпись лица, принимающего данные. Требуется для каждого набора данных в отчете.
 - г) Перечень всего испытательного оборудования, используемого во время испытаний, с указанием:

- типа испытательного оборудования;
 - изготовителя;
 - номера модели;
 - серийного номера;
 - даты поверки и даты следующей поверки.
9. Подробная информация о применимых указателях соответствия нормативным требованиям, в которых указаны данные о маркировке и ее местоположении на изделии.
10. Список всех компонентов системы испытываемого оборудования. Сюда необходимо включить все внутренние компоненты, такие как источники питания, материнские платы, жесткие диски, дисководы для гибких магнитных дисков, CD-ROM и дополнительные карты, с указанием:
- типа оборудования;
 - изготовителя;
 - номера модели;
 - серийного номера.
11. Перечень кабелей, с указанием:
- длины;
 - типа (экранированный, неэкранированный, коаксиальный и т. п.);
 - устройств, связанных с данным кабелем.
12. Используемое программное обеспечение для испытаний и моделирования поведения испытываемого оборудования.
13. Все требуемые предупреждения для пользователя.

Как вы можете видеть, подготовка к испытаниям продукта по требованиям ЭМС является интенсивным процессом. Вам нужно будет изучить список требований и убедиться, что все, что должно быть передано в лабораторию, представлено вами в установленном формате и форме. Для этого обговорите все заранее и убедитесь, что у вас есть все, что им нужно, в формате, который они могут использовать. Не устраивайте ревизий действующих правил, которые вам не нравятся, это не ваш монастырь, не надо поучать персонал лаборатории, поверьте — они специалисты своего дела (иначе бы вы их не наняли), а вот отвечать на заданные вопросы надо четко и оперативно. Важно, чтобы у вас сложились деловые отношения и возникло взаимное доверие.

И еще один совет, который косвенно касается вопроса, как успешно пройти испытания. Если вы решили всерьез и надолго выйти на региональный рынок, то вам целесообразно иметь там

своего представителя, например местную компанию или небольшую компанию, организованную вами (лучше офшорную, если законодательство это допускает). Ваша продукция может быть собрана из узлов или просто установлена в корпус с новой маркировкой. Так из нерезидента вы стали резидентом, отношение к вашему продукту будет более лояльное, а проведение испытаний и таможенных процедур упростится. Удобно то, что продукция направляется одной компании по одному договору, как целевая поставка, и, например, в части выполнения требований Директивы RoHS тут достаточно простого «Заявления о соответствии» (Declaration of Conformity).

Итак, вы успешно прошли этот непростой путь, все сверено и перепроверено, протокол испытаний подписан. Все довольны, окрылены успехом и готовы к новым свершениям.

А если вас постигла неудача и испытания не пройдены? В жизни всякое бывает и очень часто, но она на этом не кончается, нужно сделать выводы и идти дальше. Как и что делать — об этом мы поговорим в следующей части публикации. ■

Литература

1. Рентюк В. Электромагнитная совместимость: проблема, от решения которой не уйти // Компоненты и технологии. 2017. № 7.
2. Pettit G. How to Prepare Your Product and Yourself for EMC Testing. Pettit EMC Consulting. www.learn.interferencetechnology.com/2017-emc-testing-guide/
3. 2017 EMC Testing Guide, Interference Technology Guide Series, 2017 ITEM Media. www.learn.interferencetechnology.com/2017-emc-testing-guide/
4. Рентюк В. Устранение конфликта интересов и оптимизация организации работ при проектировании РЭА // Технологии в электронной промышленности. 2014. № 7.
5. Рентюк В. Что нужно знать по испытаниям на выполнение требований по ЭМС для изделий коммерческого назначения // Компоненты и технологии. 2017. № 7.
6. Рентюк В. Практические вопросы применения ИМС изолированного интерфейса в части выполнения требования по электромагнитной совместимости // Компоненты и технологии. 2015. № 3.
7. ISO/IEC 17025:2005 General requirements for the competence of testing and calibration laboratories.
8. ГОСТ ИСО/МЭК 17025-2009 «Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий».

Статья опубликована в журнале «Компоненты и технологии» № 9'2017

Испытания на воздействие кондуктивных электромагнитных помех



Кондуктивные помехи (помехи проводимости) возникают по причинам техногенного или природного характера и передаются по линиям связи и электропитания.

Такие помехи как молниевые разряды, переключения реле, излучение радиостанций и другие факторы могут негативно сказаться на функционировании аппаратуры в случае, если не приняты соответствующие защитные меры. Подтвердить работоспособность аппаратуры при воздействии помех проводимости возможно только проведя полноценные испытания на электромагнитную совместимость ЭМС.

Испытательный Комплекс Имитации Кондуктивных Помех КИКП-1 способен имитировать помехи с напряжением до 6 кВ и длительностями фронтов от 2 нс.

Имеющееся в испытательной лаборатории ЭМС оборудование позволяет проводить испытания на соответствие большинства нормативных документов:

- ГОСТ РВ 6601-001-2008 (п.5.1—5.4);
- КТ-160/14G (разделы: .17.0, 18.0, 20.0);
- ГОСТ 28751;
- ГОСТ Р 51317.4.16;
- ГОСТ 30804.4.4;
- ГОСТ Р 51317.4.5;
- ГОСТ Р 51317.4.6.



Метрологические аспекты разработки испытательных комплексов ЭМС

Халид КАЧАЕВ

Одним из основных вопросов при организации испытаний на ЭМС является подбор оборудования и его метрологическое обеспечение. Отсутствие готовых решений или их дороговизна вынуждает руководителей лабораторий разрабатывать собственные комплексы по воспроизведению условий испытаний. Как правило, подобные комплексы состоят из измерительных и технических средств, а также вспомогательных устройств. Комплексы подлежат обязательной аттестации как испытательное оборудование по ГОСТ РВ 0008-002 и /или ГОСТ Р 8.568 и требуют подготовки комплекта эксплуатационной документации по ГОСТ 2.601.

К числу самых ответственных этапов при создании комплексов относится оценка допустимого отклонения воспроизведения условий испытаний. Эта задача может оказаться непростой даже для высококвалифицированного специалиста, поскольку система зачастую имеет сложную структуру и состоит из нескольких средств измерений различных типов — например, датчиков, преобразователей, модулей аналогового и частотного ввода/вывода и другой аппаратуры.

При последовательном соединении нескольких средств измерений погрешность может как усиливаться, так и ослабляться. Ее желательно определить экспериментальным путем, хотя это не всегда реализуемо или целесообразно. В таких случаях имеет смысл руководствоваться расчетными методами, которые базируются на требованиях нормативных документов по определению метрологических характеристик средств измерений.

Исходными данными для расчета погрешности являются:

- методическая погрешность, для расчета которой могут быть указаны сопротивление проводов, среднеквадратическое значение или спектральная плотность помех в них, емкость, индуктивность и сопротивление источника сигнала, а также другие факторы, возникающие при создании сложносоставной системы;
- метрологические характеристики средств измерений и других технических средств;
- характеристики влияющих величин (например, окружающая температура, влажность);
- характеристики измеряемого сигнала.

Суммирование погрешностей проводится тремя способами:

- алгебраическим:

$$\sigma_{\Sigma} = \sum_{i=1}^N \Delta_i,$$

где i — номер погрешности, N — их количество;

- геометрическим:

$$\sigma_{\Sigma} = K \sqrt{\sum_{i=1}^N \sigma_i^2},$$

где σ_i — среднеквадратическое значение i -й погрешности;

- с учетом корреляции:

$$\sigma_{\Sigma} = \sqrt{\sum_{i=1}^N \sigma_i^2 + 2 \sum_{i=1}^N \sum_{j<i}^N R_{ij} \sigma_i \sigma_j}.$$

Поскольку корреляционные коэффициенты, как правило, неизвестны, обычно используются только первые два способа суммирования. Алгебраический способ суммирования применим для расчета суммы детерминированных погрешностей, а геометрический — для случайных.

Однако алгебраическое суммирование часто дает слишком завышенную оценку погрешности. Поэтому МИ 2232-2000 предусматривает промежуточный вариант между формулами геометрического и алгебраического суммирования:

$$\sigma_{\Sigma} = K \sqrt{\sum_{i=1}^N \sigma_i^2},$$

где K — поправочный коэффициент, равный 1,2 для наиболее важных параметров контроля характеристик готовой продукции.

Погрешности суммируют по однородным группам, затем находят общую погрешность, используя геометрическое суммирование для случайных погрешностей и алгебраическое — для детерминированных. Если известен знак систематической погрешности, его учитывают при суммировании. Результат учета всех погрешностей выглядит следующим образом:

$$X = (x_0 + \Delta) \pm \sigma,$$

где x_0 — заданное (измеренное) значение параметра; Δ — сумма всех детерминированных погрешностей, они могут быть прибавлены к измеренной величине в качестве поправки; σ — сумма всех случайных погрешностей:

$$\sigma = \sqrt{\sigma_{\Sigma\text{сист}}^2 + \sigma_{\Sigma\text{случ}}^2 + \sigma_{\Sigma\text{доп}}^2 + \sigma_{\Sigma\text{метод}}^2},$$

где $\sigma_{\Sigma\text{сист}}$ — сумма всех систематических погрешностей; $\sigma_{\Sigma\text{случ}}$ — сумма всех случайных погрешностей; $\sigma_{\Sigma\text{доп}}$ — сумма всех дополнительных погрешностей; $\sigma_{\Sigma\text{метод}}$ — сумма всех случайных составляющих методических погрешностей, включая погрешность программного обеспечения.

Случайные составляющие основной погрешности средств измерений задаются своими среднеквадратическими отклонениями, поэтому их суммирование выполняется непосредственно по формуле геометрического суммирования.

Дополнительные погрешности задаются в виде функции влияния внешних факторов (температуры, влажности, напряжения питания) на основную погрешность измерения или, в случае линейной функции влияния, коэффициентом влияния. Например, может быть задано, что основная погрешность уве-

личивается на +0,05% при изменении напряжения питания на +20%. Если известно, что дополнительные погрешности нескольких средств измерений коррелируют (в частности, синхронно возрастают при повышении напряжения питания в сети или температуры окружающей среды), то такие погрешности суммируют.

При оценке погрешности испытательного оборудования нередко приходится сталкиваться с проблемой отсутствия некоторых исходных данных. В этой ситуации на основании рекомендаций МИ 2232-2000 и ГОСТ 8.009 предлагается использовать следующие допущения:

- динамическая и дополнительная погрешность считается несущественной, если она составляет менее 17% от наибольшего возможного значения инструментальной погрешности в рабочих условиях эксплуатации;
 - среднеквадратическое значение погрешности принимается равным половине предела допускаемых значений погрешности;
 - корреляция между отдельными составляющими погрешности отсутствует;
 - случайная составляющая погрешности измерений является некоррелированной случайной величиной (белым шумом) или вы рождается в систематическую погрешность;
 - функции распределения внешних влияющих величин предполагаются равномерными или нормальными;
 - считается, что инерционные свойства средств измерений не оказывают влияния на погрешность измерений.
- Как видно, ошибки, допущенные на этапе проектирования и монтажа испытательного оборудования, могут сделать результаты испытаний недостоверными. Одним из путей упрощения методики расчета погрешностей служит использование средств измерений с большим запасом по точности. Тогда учет тонких нюансов теории погрешностей становится излишним. ■

Статья опубликована в журнале «Компоненты и технологии» № 11'2017

Современные средства измерений



Эквивалент сети АК ИП-9901



- Диапазон рабочих частот: 9 кГц... 30 МГц
- Максимальный рабочий ток: 16 А
- Максимальное напряжение электропитания: 50 В пост.; ~ 240 В 50/60 Гц (+/- 10 %)
- Входное сопротивление 50 Ом
- Встроенный фиксированный аттенюатор: 10 дБ
- Фильтр ВЧ (переключаемый): 9 кГц/150 кГц
- Пороговое значение: 124 дБмкВ
- ВЧ выход: разъем BNC (50 Ом)
- Эквивалент руки (artificial hand)
- Соответствие: EN61326 (ЭМС), EN61010

АК ИП-9901 – это компактный 2-х проводный V образный эквивалент сети для измерения помех сети питания, вызванных потребителем при анализе ЭМС. Предназначен для измерения напряжения промышленных радиопомех вызванных тестируемым устройством. В сочетании с анализатором

спектра (селективным микровольтметром, измерителем уровня ВЧ радиопомех) обеспечивает измерения несимметричных напряжений помех, отдаваемых электрооборудованием в виде кондуктивных высокочастотных помех в подключенные сети питания в диапазоне частот 9 кГц... 30 МГц.

 **ПРИСТ**[®]
prist@prist.ru; www.prist.ru

119071, г. Москва, 2-й Донской пр., д. 10, стр. 4; тел.: +7 (495) 777-5591; факс: +7 (495) 640-3023
196084, г. Санкт-Петербург, ул. Цветочная, д. 18, лит. В, офис 202; тел./факс: +7 (812) 677-7508
620130, г. Екатеринбург, ул. Авиационная, д. 80; тел./факс: +7 (343) 317-3999; ek@prist.ru

Рекомендации по проверке испытательных систем на электромагнитную совместимость

Мэтью Ван Ден БЕРГ
(Mathieu Van Den BERGH)

Следуя инструкциям, изложенным в определенных стандартах ИЕС (МЭК), можно осуществлять проверку технических средств и систем на электромагнитную совместимость с помощью тестирующего оборудования непосредственно на рабочем месте. В статье рассматриваются порядок проведения тестирования, методы проверки и калибровки испытываемых систем. Эти методы также применяются для сертификации испытательных лабораторий.

Как известно, все электротехнические изделия, которые представлены на рынках многих стран, должны отвечать стандартам ИЕС, которые определяют максимальный уровень допустимого электромагнитного излучения, а также защищенность, или помехоустойчивость. В Европе у стандартов ИЕС имеются эквивалентные версии EN, а в Китае, Японии, других странах — собственные модификации национальных стандартов. Например, стандарт EN 61000-3-2 является европейским эквивалентом исходного стандарта ИЕС 61000-3-2 по электромагнитной совместимости. Этот же стандарт в Японии носит название JIS C 61000-3-2, а в Китае он известен как GB/T 14549-93 и был выпущен Организацией по стандартизации при Китайском техническом комитете 246 (SAC/TC246).

Несколько производителей выпускают системы для тестирования электротехнической продукции на электромагнитное

излучение и помехоустойчивость. Как правило, встраиваемые системы проходят типовые испытания у производителя, а такое функциональное оборудование, как анализаторы мощности и программируемые источники питания, тестируется у своих производителей. Эти системы нуждаются в калибровке и периодической проверке, которые подтверждают правильность функционирования. Кроме того, при установке оборудования и программного обеспечения часто бывает необходимо проверить корректность функционирования системы, особенно сертифицированного испытательного оборудования. За последние несколько лет было выпущено несколько протоколов для калибровки и проверки, среди которых — ИЕС TR 61000-4-37 (гармонический анализ) и ИЕС TR 61000-4-38 (протокол испытания, верификации и калибровки систем проверки флуктуации напряжения и фликкер-шума для определения их соответствия требованиям ИЕС).

Стандарты ИЕС 61000-3-2 и ИЕС 61000-3-12

К стандартам ИЕС, которые определяют уровни излучения гармонических составляющих тока, относятся ИЕС 61000-3-2 (токи не более 16 А в одной фазе) и ИЕС 61000-3-12 (токи не более 75 А в одной фазе). Стандарты ИЕС 61000-3-3 и ИЕС 61000-3-11 ограничивают колебания напряжения и фликкер-шум изделий до 16 и 75 А соответственно. Процедуры и методы измерения гармонических составляющих описаны в стандарте ИЕС 61000-4-7, а методы измерения колебаний напряжения и фликкер-шума — в ИЕС 61000-4-15. Конфигурация типовой системы для измерения гармонических составляющих и фликкер-шума представлена на рисунке 1.

Основными компонентами установки на рисунке 1 являются программируемый источник питания, один или несколько блоков стандартного полного сопротивления,

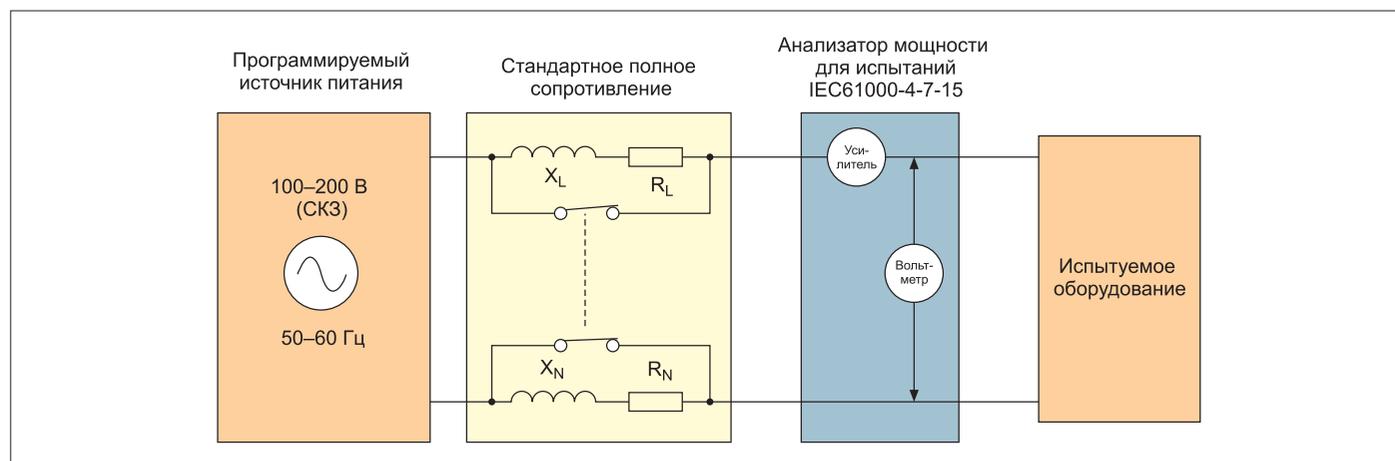


Рис. 1. Типовая система для измерения гармонических составляющих и фликкер-шума

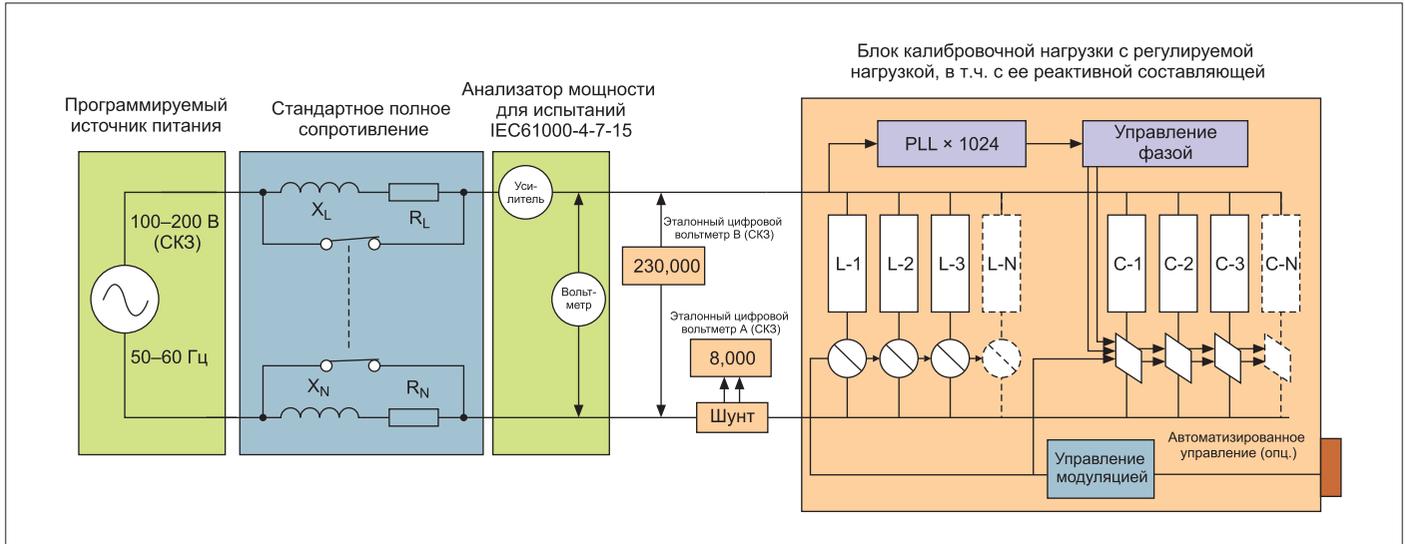


Рис. 2. Испытательная установка согласно протоколам IEC TR 61000-4-37 и IEC TR 61000-4-38

анализатор мощности и испытуемое оборудование (ИО). В некоторых случаях дополнительные средства или измерительные приборы являются частью системы. Мы их рассмотрим в следующем разделе. Несколько национальных лабораторий разработали методы калибровки и порядок проведения для калибровки анализаторов мощности.

Хорошо откалиброванный анализатор мощности не гарантирует, однако, соответствие анализа гармонических составляющих или фликкер-шума требованиям стандартов. Программируемый источник питания и блоки стандартного полного сопротивления тоже могут влиять на точность системы, а в некоторых случаях проводка системы или интеграция блоков вызывают определенные проблемы.

Например, источник питания с избыточным выходным импедансом (индуктивностью) оказывает влияние на измерение гармонических составляющих и фликкер-шума. Неправильно реализованный блок стандартного полного сопротивления может повлиять на измерение фликкер-шума. В отдельных случаях

возникают проблемы с проводкой системы, если нейтральный провод заземлен на источник питания или на испытуемое оборудование, в результате чего шунтируется часть нейтрального провода блока стандартного полного сопротивления. В других случаях источник питания, который успешно управляет напряжениями при медленно меняющихся нагрузках, не справляется с их внезапным изменением, что приводит к увеличению колебаний напряжения и фликкер-шума.

В протоколе IEC TR 61000-4-37 (калибровка и верификация испытательных систем на соответствие эмиссии синусоидального тока) описаны методы испытаний всей системы и проверки точности измерения гармонического тока, которая должна отвечать требованиям IEC 61000-4-7 и IEC 61000-3-2/12. Протокол IEC TR 61000-4-38 описывает методы измерения полного фликкер-шума системы. В обоих случаях точно контролируемый блок нагрузки моделирует реальные электротехнические изделия. Другими словами, источник питания обязан поставлять в нагрузку неискаженную мощность.

В схеме испытаний, представленной на рисунке 2, осуществляется моделирование нескольких испытуемых устройств. Таким образом, имеется возможность проверить правильность функционирования системы при использовании многих испытуемых электротехнических устройств. Например, временная развертка сигнала на рисунке 3 моделирует характеристику изделия, которое успешно прошло испытание на соответствие требованиям стандарта IEC 61000-3-2 (Class A).

Тестирование токовых гармоник с помощью IEC 61000-3-2 и 61000-3-12

Как видно из рисунка 3, нагрузку с управляемой фазой (C1–C4) можно включать и выключать в моменты времени, определенные пользователем. Управление током с помощью точно известной резистивной нагрузки позволяет получить точно определенный гармонический спектр. Например, включение 80-Ом нагрузки при фазе 45° и отключение при 135° (почти как на рисун-

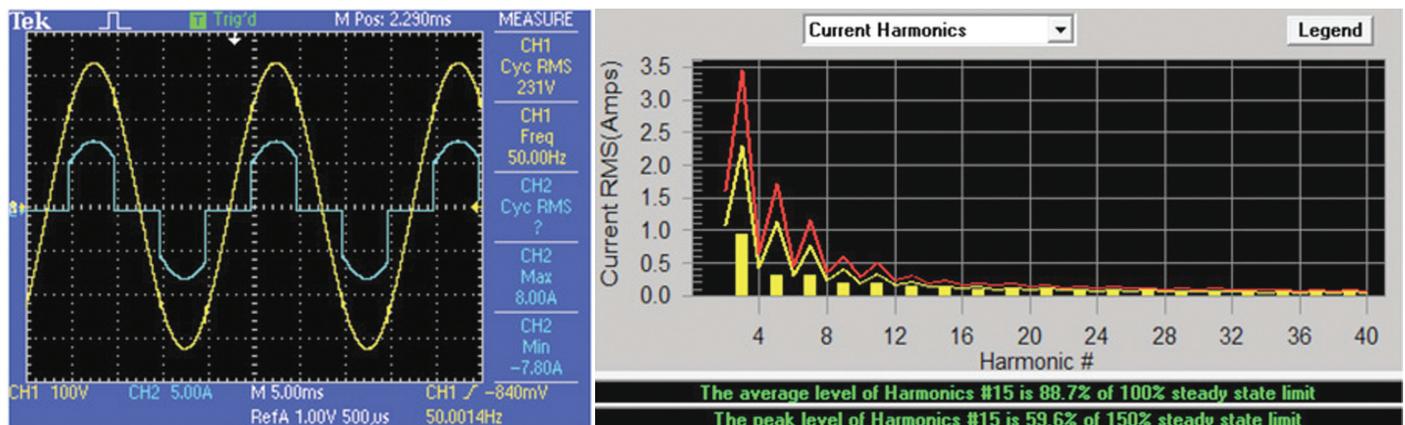


Рис. 3. Вид сигнала и спектр тока соответствуют требованиям стандарта IEC 61000-3-2 Class A (синяя кривая на левом рисунке — сигнал тока; желтые полосы на рисунке справа — гармоники, которые отвечают требованиям по амплитудам кривых желтого и красного цветов)

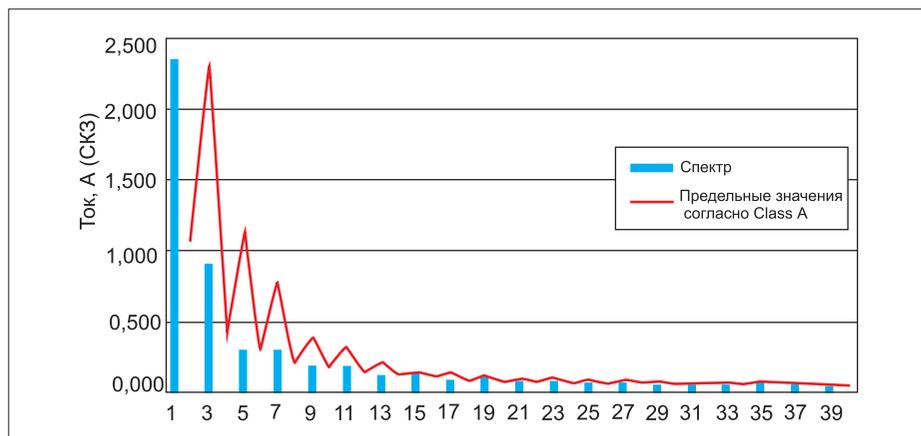


Рис. 4. Спектр из 40 гармоник для 80-Ом нагрузки при фазе 45–135°

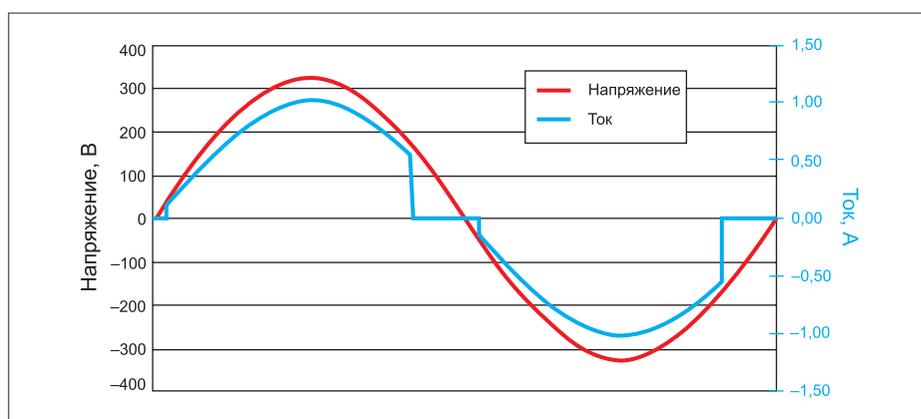


Рис. 5. Вид сигнала и гармоники в тестовой комбинации Class-C, уровень которых достигает 99% от предельного

ке 3) позволяет получить спектр и значения гармонических составляющих (рис. 4).

Величина допуска, например 5%, рассчитывается согласно требованиям стандарта

IEC 61000-4-7. Кроме того, п. 6.2.3.2 стандарта IEC 61000-3-2 определяет воспроизводимость результатов как $\pm(1\% + 10 \text{ мА})$ при испытаниях одного и того же оборудования

на разных системах. Если в качестве такового оборудования рассматривать калибровочную нагрузку на рисунке 2, можно воспользоваться условиями п. 6.2.3.2, но выбрать более жесткий допуск, чем тот, который применяется при тестировании гармонических составляющих в системе.

Например, допуск $\pm(0,3\% + 5 \text{ мА})$ обеспечивает запас около 3:1, чего вполне достаточно, чтобы проверить и сертифицировать систему при условии, что она отвечает указанным более жестким допускам. Стандарт IEC61000-3-2/12 определяет разные тестовые комбинации для испытания технических средств каждого отдельного класса. На рисунке 5 показана тестовая комбинация Class-C, в которой уровень гармоник составляет 99,2% от предельного значения.

При использовании стандарта IEC 61000-4-37 можно воспользоваться таблицей для расчета гармоник для каждой выбранной тестовой комбинации и калибровочной нагрузки. IEC 61000-4-37 определяет 12 разных комбинаций, но у пользователя всегда имеется возможность выбрать собственную комбинацию.

После того как пользователь введет величину нагрузки, выберет фазовые углы, соответствующие началу и концу тестирования (при измерении электропроводности), таблица выполнит преобразование Фурье, рассчитав (идеальные) гармоники с разрешением 0,1 мА. Таким образом, имеется возможность последовательно сравнить результаты прохождения теста системой с расчетными уровнями гармоник, мощностью, коэффициентом нелинейных искажений (THD), суммарным коэффициентом гармонических составляющих тока (THC), а также с уровнями отдельных нечетных гармоник тока (РОНС). Стандарт IEC TR 61000-4-37 описывает применение методологических принципов в отношении конкретных комбинаций.

Измерение фликкер-шума согласно IEC 61000-3-3 и IEC 61000-3-11

Схожий подход, что и рассмотренный выше, применяется для проверки системы на фликкер-шум в соответствии со стандартами IEC 61000-3-3/11 и IEC TR 61000-4-38. Методом включения и выключения нагрузки можно получить известную тестовую комбинацию, поскольку ток, протекающий через блок стандартного полного сопротивления, вызывает точно известное падение напряжения. Например, модуляция нагрузки с частотой 8,77 Гц позволяет получить комбинацию, представленную на рисунке 6.

Желтая кривая на рисунке 6 описывает ток, который включается на 57 мс, а затем выключается еще на 57 мс, т. е. с частотой 8,77 Гц. Известное нагрузочное сопротивление позволяет точно рассчитать падение напряжения на блоке стандартного полного сопротивления, соответствующем требованию IEC TR 60725, и, таким обра-

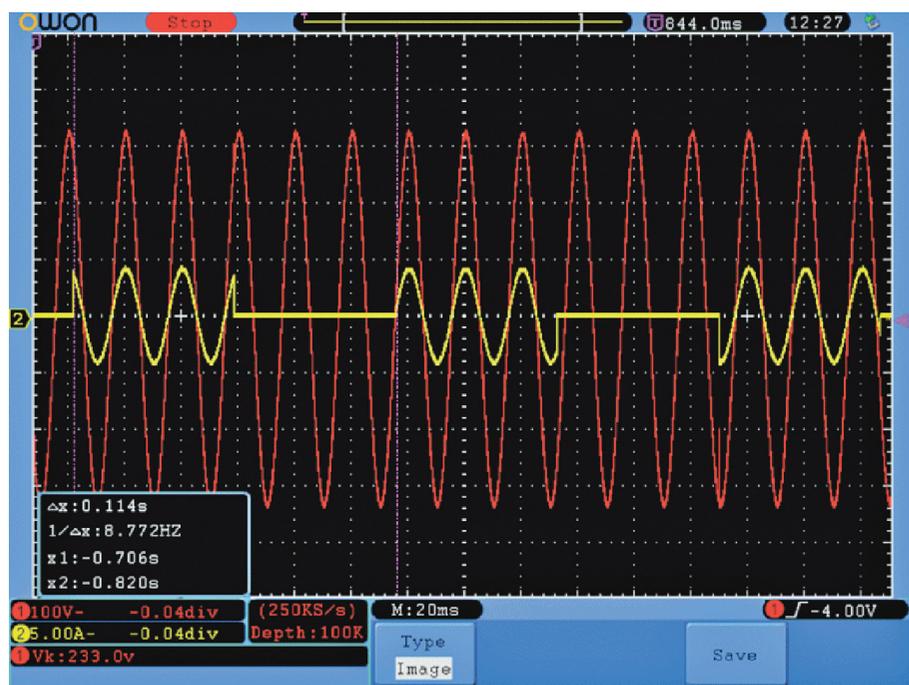


Рис. 6. Модуляция тестовой комбинации для проверки систем на фликкер-шум

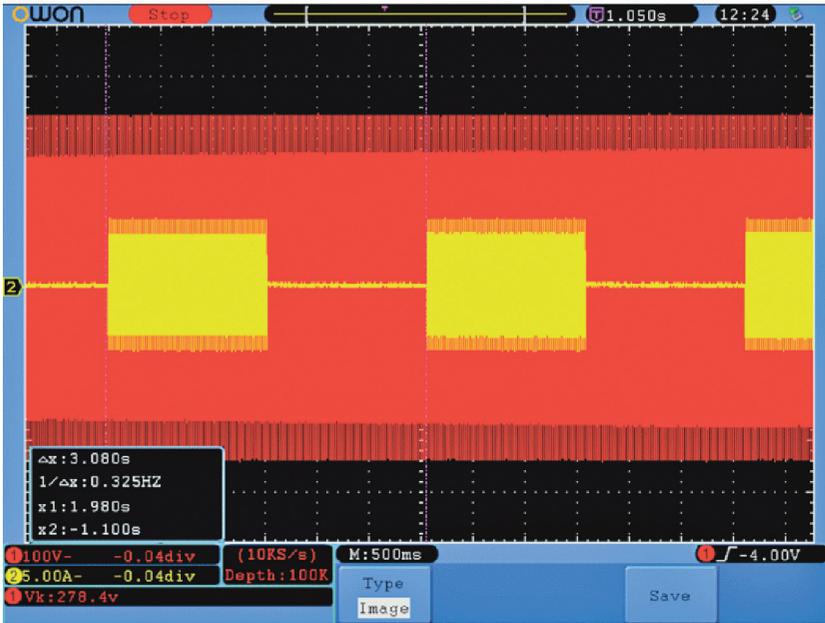


Рис. 7. Тестовая комбинация для модуляции (0,325 Гц) нагрузки из таблицы 5 стандарта IEC 61000-4-15 по измерению фликкер-шума. Желтые и красные линии описывают ток и напряжение соответственно. Цена деления развертки задана равной 500 мс, что позволяет регистрировать данные в течение нескольких секунд

зом, проверить систему на фликкер-шум и откалибровать ее. Путем измерения сгенерированного напряжения можно также проверить правильность конфигурации источника питания и блока стандартного полного сопротивления. Другими словами, при необходимости можно настроить компоненты системы.

В ряде случаев коррекция оказывается необходимой. Например, если стандартное полное сопротивление в точности соответствует требованиям IEC TR 60725, то при суммарном импедансе, равном (0,400 Ом + 0,250 Ом), суммарное полное сопротивление между источником и выходом часто оказывается завышенным, достигая 25–40 мОм. К этому значению следует прибавить индуктивность проводов около 100 мкГн, что приводит к погрешности в 10%.

Проблема такого рода не наблюдается, если откалибровать анализатор мощности и проверить блок стандартного полного сопротивления. Эта проблема возникает только при использовании реальной нагрузки, которую представляет собой испытываемое устройство. Временной режим



Рис. 8. а) Обнуление напряжения на один цикл; б) провал напряжения до 40% уровня от исходной величины в течение 10 циклов

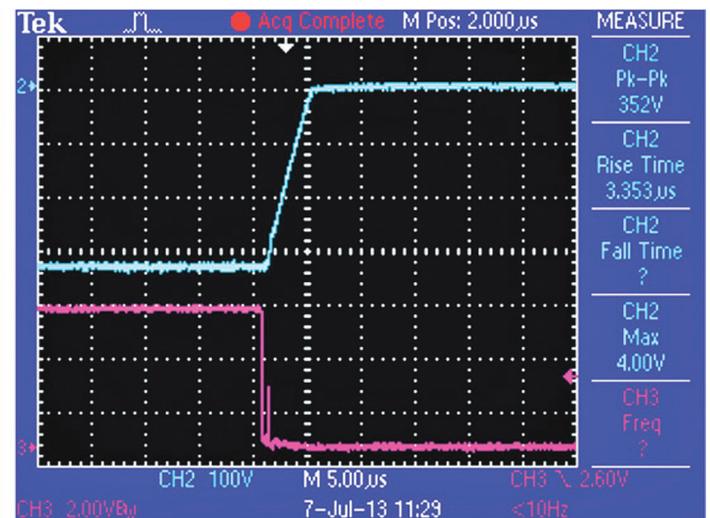
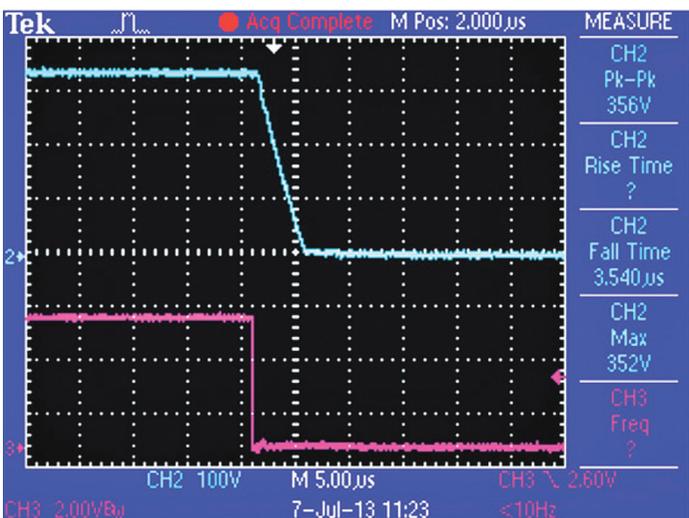


Рис. 9. Время нарастания/спада сигнала в диапазоне 1–5 мкс (голубая кривая)

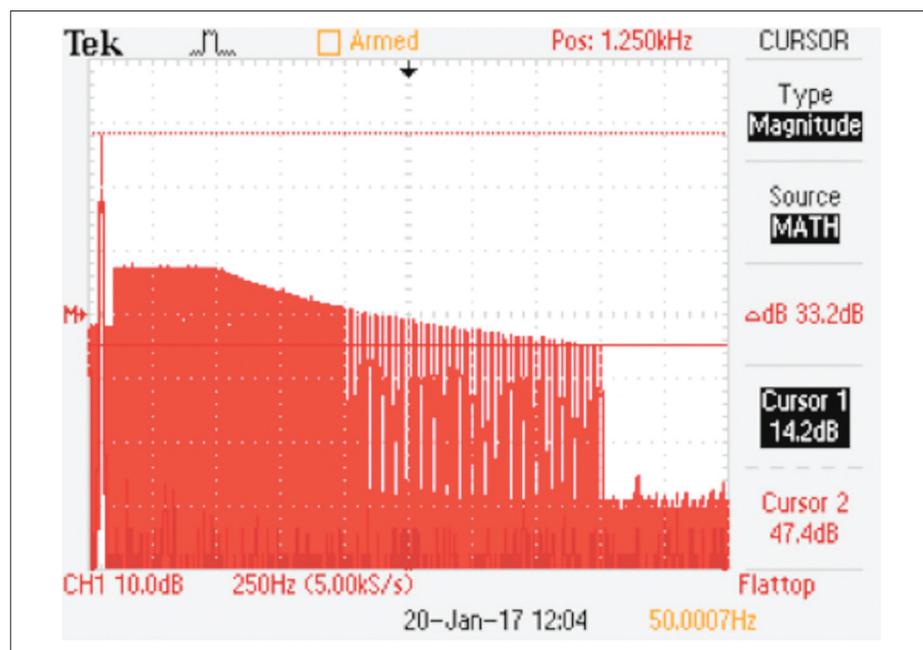


Рис. 10. Испытание развертки с помощью кривой Мейстера в диапазоне 16–2000 Гц согласно Class 2 стандарта 61000-4-13

модуляции легко проверяется (рис. 7). Зная величину нагрузки (т. е. уровня тока) и проверяя параметры временного режима, можно получить тестовую комбинацию, которая отвечает калибровочным требованиям таблицы 5 из описания стандарта IEC 61000-4-15.

Испытания на помехоустойчивость с помощью стандартов IEC 61000-4-11 и 61000-4-13

К двум наиболее известным стандартам, устанавливающим методы испытаний технических средств, подключаемых к низковольтным (не выше 1000 В) электрическим сетям переменного тока, относятся IEC 61000-4-11 (провалы, кратковременные прерывания и изменения напряжения элек-

тропитания) и IEC 61000-4-13 (устойчивость к искажениям синусоидальности напряжения электропитания, включая передачу сигналов по электрическим сетям). Эти изменения возникают при включении больших нагрузок (электродвигателей или крупных электрических систем), коротких замыканиях в зданиях и жилых массивах, при коммутации энергораспределяющего оборудования и во многих других случаях.

Искажения (возмущения), вносимые гармониками или интергармониками, которые появляются при взаимодействии двух синусоидальных сигналов с частотой, не кратной частоте основной гармоники, всегда возникают в системах электроснабжения при эксплуатации большого количества бытовой техники и приборов, в системах управления производственными процессами и т. д. Поскольку эти возмущения могут произой-

ти в любой момент, электрооборудование должно обладать соответствующей помехоустойчивостью.

Необходимо, чтобы испытываемое устройство в автоматическом режиме или с помощью оператора справлялось с указанными проблемами. На рисунке 8 показан пример провала напряжения на один период и провала напряжения до 40% уровня от исходной величины на 10 периодов. Стандарт IEC 61000-4-11 определяет испытания генераторов прерываний и провалов с помощью 100-Ом резистивной нагрузки. Блок нагрузки, схематично показанный на рисунке 2, применяется в качестве соответствующей нагрузки во всех испытаниях. И хотя стандарт IEC 61000-4-11 в настоящее время пересматривается и может измениться, его нынешняя версия требует, чтобы изменения напряжения происходили в интервале 1–5 мкс при тестировании с помощью 100-Ом нагрузки. Поскольку при изменениях, которые начинаются или заканчиваются при нулевом напряжении, понятие о времени нарастания или спада импульсов утрачивает смысл, длительность переходного процесса, как правило, проверяется при 90 или 270°. Из рисунка 9 видно, как быстро падает сигнал напряжения с фазой 90° с 230 В/50 Гц (325 В_{пик}) до 0 В, а также время нарастания сигнала напряжения с фазой 90° через один цикл.

Таким образом, соответствие требованиям стандарта IEC 61000-4-11 проверяется с помощью рекомендуемых уровней тестирования, представленных в таблице 1 этого документа. При этом уровни напряжения и длительность провалов измеряются с использованием высококачественного цифрового осциллографа и 100-Ом нагрузки. Проверка устойчивости к искажениям синусоидальности напряжения электропитания в соответствии со стандартом IEC 61000-4-13 — более сложный процесс. Этот стандарт определяет последовательность комбинаций с искаженными гармониками и интергармони-

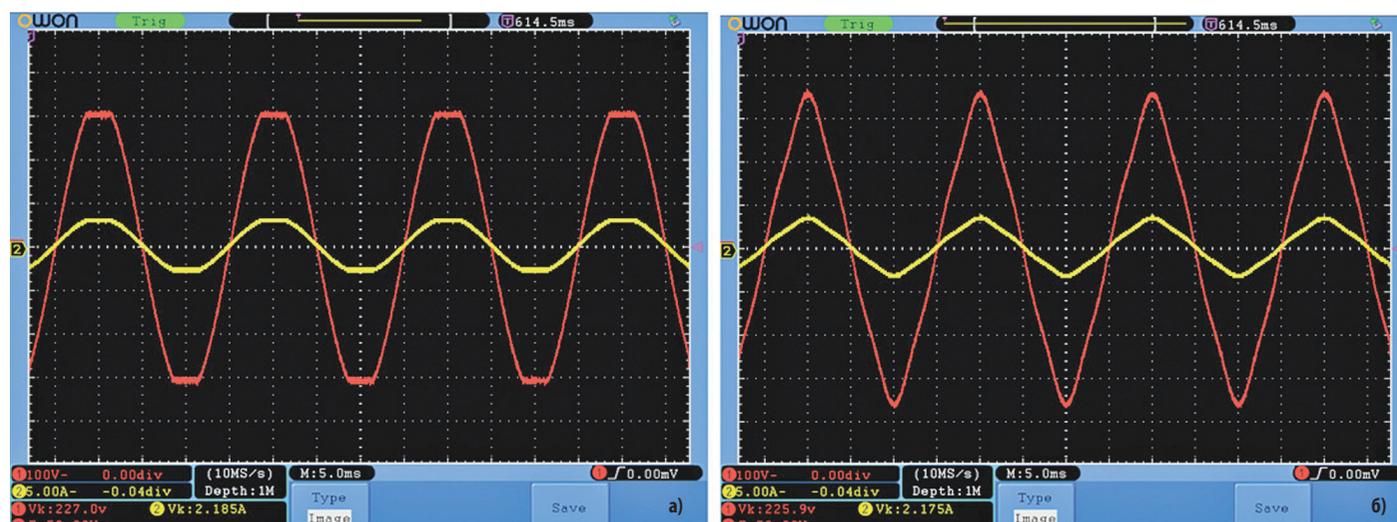


Рис. 11. Тестовые комбинации согласно IEC 61000-4-13: а) плоская вершина сигнала; б) перенапряжение

ками, которые воздействуют на напряжение электрических сетей общего пользования. Доля нелинейных искажений, которые практически всегда присутствуют в этих сетях, в ночное время (при малой нагрузке) составляет 1–2%, а в дневное время (особенно в часы пикового потребления) этот показатель может превысить 5%.

Европейский стандарт EN 50160 определяет качество электроэнергии, которое должны обеспечивать энергетические предприятия. Так, например, уровень нелинейных искажений не должен превышать 5% в течение 95% всего времени и не может быть более 8% в любой момент времени. В других регионах мира действуют либо официальные законы, регулирующие качество электроэнергии, либо общепринятые спецификации (например, IEEE STD 519 в США). Таким образом, поскольку гармонические искажения всегда присутствуют в электросетях, электрооборудование должно сохранять работоспособность в таких условиях эксплуатации.

Class 2 стандарта 61000-4-13, который, как и IEC 61000-4-11, предусматривает разные категории испытаний, применяется в отношении большей части электрооборудования. Этот стандарт определяет испытания для гармоник и интергармоник, а также т. н. «кривую Мейстера» (рис. 10). По сути, эта кривая моделирует сигналы «управления пульсациями», которое возлагается на предприятие, контролирующее энергораспределительное оборудование. Амплитуда сигналов по управлению пульсациями достигает 5% на частотах интергармоник.

На рисунке 11а показана тестовая комбинация с гармоническим искажением, которое возникает при эксплуатации однофазного (бытового) электрического оборудования. На рисунке 11б представлено тестовое перенапряжение, возникающее, как правило, при использовании трехфазного оборудования в промышленных системах.

Выводы

Проверку систем испытания на соответствие стандартам можно выполнять для сертификации по местонахождению пользователя с помощью соответствующего нагрузочного блока, высокоточных цифровых мультиметров, токовых шунтов и цифровых осциллографов с достаточной памятью и точностью синхронизации.

Технический документ IEC 61000-4-37 дает рекомендации и указания по верификации и калибровке систем для испытания уровня излучения гармоник в соответствии со стандартами IEC 61000-3-2 и 61000-3-12. Технический отчет IEC 61000-4-38 дает рекомендации, как проверять и калибровать системы для испытания флуктуаций напряжения и фликкер-шума согласно стандартам IEC 61000-3-3 и 61000-3-11.

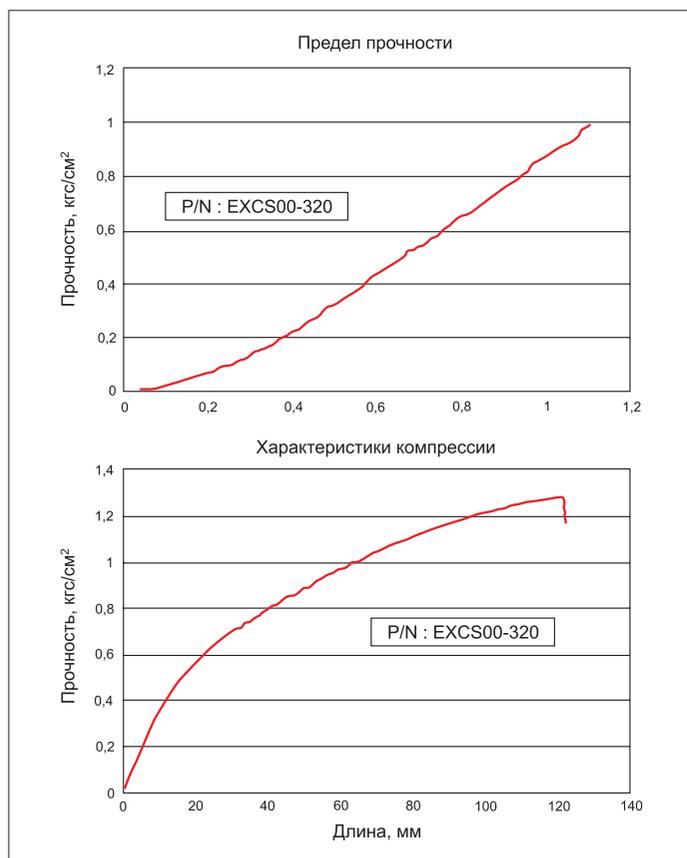
Испытания в соответствии со стандартами IEC 61000-4-11 и IEC 61000-4-13 осуществляются с помощью подходящей нагрузки и соответствующих осциллографов. В таблицах испытаний в обоих стандартах даются рекомендации по выбору наиболее распространенных тестовых комбинаций.

Статья опубликована в журнале «Электронные компоненты» № 5'2017

Токпроводящий силикон

Техническое описание

Токпроводящий силикон состоит из полимерных электрически и химически инертных шариков с нанесением на них слоя токопроводящего материала. Поставляется в виде спеченных профилей и форм для обеспечения требований ЭМС и климатической защиты.



Спецификация

Параметр	Тип материала		
	SC/SCC	SA	C/NC
Температурный диапазон, °C	-55~150		
Сопротивление, Ом·см (max)	0,02	0,08	0,1
Плотность, кг/м³ (при 25 °C)	3,7	1,8	2
Твердость (Shore A)	67 ±5	65 ±5	65 ±10
Предел прочности (psi)	430	285	285
Разрывная прочность, кН/м (min)	6	5	6
Коэффициент экранирования, дБ (30 МГц...1 ГГц)	>60	>60	>40
Удлинение, %	200	200	200

Тип материала: SC/SCC — серебро на медной подоснове;
SA — серебро на алюминиевой подоснове; C/NC — графит на подоснове силикона

При спекании получаемая форма обладает достоинствами проводника электрического тока за счет применения меди, серебра или графита в качестве покрытия полимерных шариков и герметика за счет использования силиконового наполнителя.

Профили выпекаемого силикона в состоянии удовлетворить вкус самого изысканного конструктора радиоэлектронной аппаратуры, для которого требования по ЭМС изделия являются одними из главных.

Применение

Токпроводящий силикон применяется везде, где есть требования ЭМС и необходимо обеспечить требования климатического исполнения. Силикон обеспечивает климатическое исполнение до IP67 включительно при соблюдении требуемого усилия прижатия. Силикон обеспечивает надежный электрический контакт между частями сборного корпуса, что сохраняет целостность экранирования. Необходимо учитывать, что это усилие обеспечивается при сжатии на 5–15% от исходного размера для цельных форм и на 10–25% для пустотелых. Для снижения стоимости материалов используют только наружный токопроводящий слой толщиной 0,1–0,14 мм, внутри — силикон без токопроводимости. Для исключения гальванических пар серебра и меди используют графит.

АО ТЕХНО
105275, г. Москва, ул. Уткина, д. 40
Тел. (495) 735-44-29
<http://www.techno.ru>
e-mail: ywg@techno.ru

Конфигурирование испытательной лаборатории ЭМС с открытой архитектурой

Владимир БЕЛОВ,
д. т. н., проф., директор Центра
проектирования инноваций
АУ «Технопарк-Мордовия»
Владимир ПЕТРОВ,
к. т. н., руководитель проектов
системных решений по ЭМС
ООО «РОДЕ и ШВАРЦ РУС»

При интеграции автоматизированных систем измерений и испытаний важнейшей проблемой является резкое увеличение их стоимости с ростом архитектурной сложности. Как правило, сложные автоматизированные измерительные и испытательные системы реализуются в единичных экземплярах, а это не позволяет сделать их дешевыми. Характерным примером такой системы служит испытательная лаборатория ЭМС Центра проектирования инноваций (ЦПИ) АУ «Технопарк-Мордовия», первая очередь которой запущена в эксплуатацию в начале 2018 года. [1].

Рассмотрим проектную архитектуру испытательной лаборатории ЭМС ЦПИ, показанную на рис. 1. Ее конфигурирование осуществляется в четыре этапа, два из которых уже реализованы.

На первом этапе лаборатория была оборудована модульной системой измерений и испытаний на базе программной платформы Rohde & Schwarz EMC32 и радиочастотной безэховой камерой (РБК) FACT™ 10–4.0 STANDARD в диапазоне частот 80 МГц – 40 ГГц.

На втором этапе к системе были подключены ТЕМ-камера (ГТЕМ 5407) для измерений излучаемых помех и испытаний на устойчивость к излучаемым помехам в диапазоне частот 10 кГц – 1 ГГц, а также комплекс оборудования для проведения испытаний на устойчивость к кондуктивным помехам (ККИ).

Результаты реализации первых двух этапов проекта создали основу для вывода лаборатории ЭМС на полную производственную мощность для испытаний оборудования гражданского назначения (рис. 2).

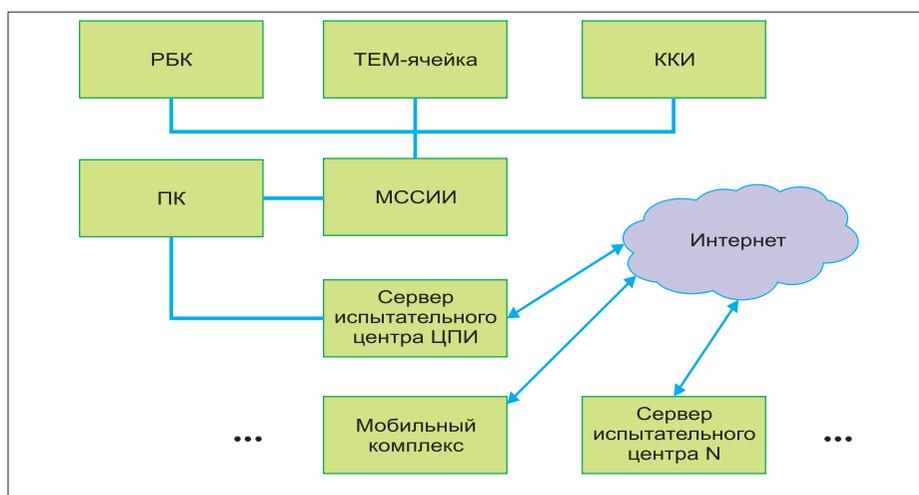


Рис. 1. Проектная архитектура испытательной лаборатории ЭМС ЦПИ

На третьем этапе осуществляется подключение модульной системы измерений и испытаний к серверу испытательного центра ЦПИ. Решение этой задачи позволит вывести сервисы лаборатории

на глобальный масштаб, где расстояния перестают иметь значение и создается возможность для участия лаборатории в сетевых (распределенных) работах (рис. 1).

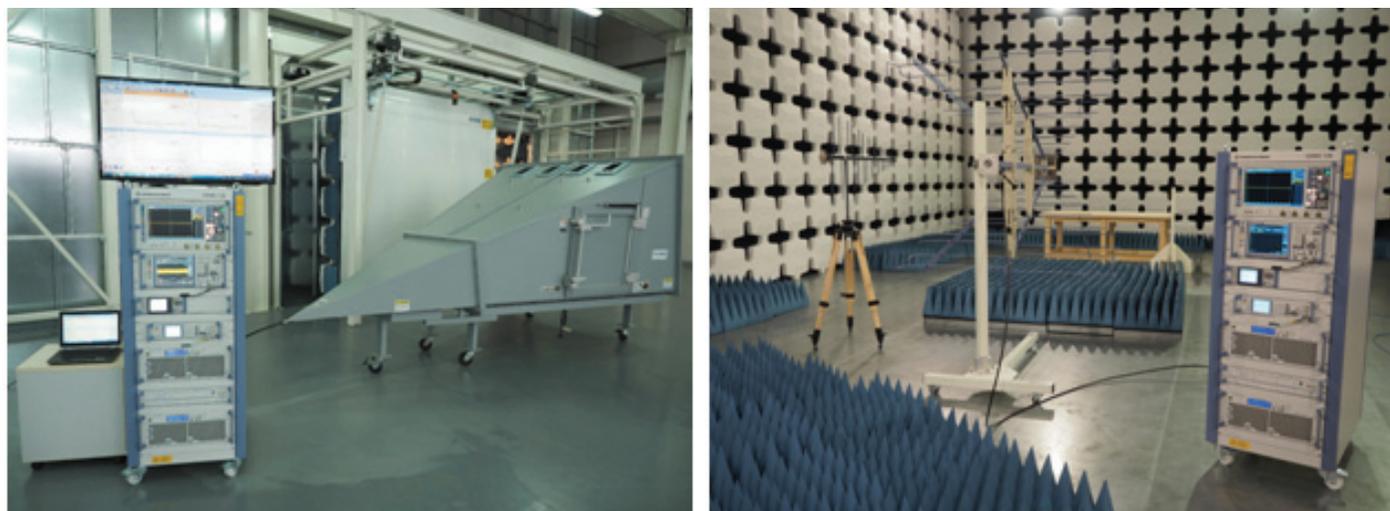


Рис. 2. Интеграция модульной системы измерений и испытаний от Rohde & Schwarz (МССИИ ЭМС) и GTEM 5407, FACT™ 10-4.0 STANDARD производства ETS-Lindgren

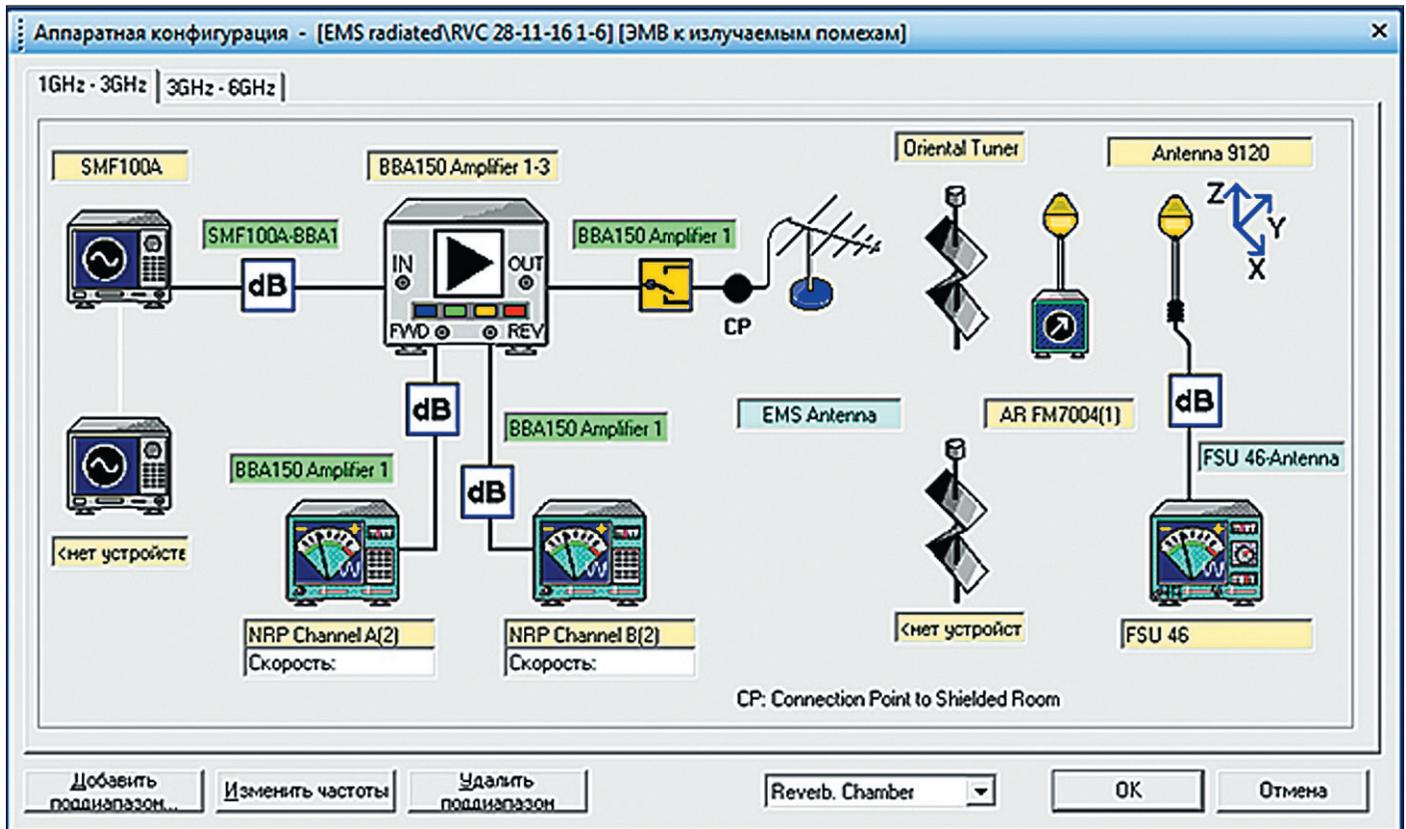


Рис. 3. Скрин рабочего окна программы Rohde & Schwarz EMC32 с иллюстрацией аппаратной конфигурации системы испытаний на ЭМВ производства Rohde & Schwarz (МССИИ ЭМС) с реверберационной камерой (РВК)

На четвертом этапе планируется инсталлировать реверберационную камеру (РВК) для проведения испытаний на устойчивость к излучаемым помехам высокой напряженности поля в соответствии с военными, авиационными и автомобильными стандартами, такими как MIL-STD-461, ГОСТ РВ 6601-001-2008, SAE J1113/27, DO-160G.

Для поэтапного наращивания своих функциональных и параметрических возможностей лаборатория ЭМС должна иметь открытую архитектуру, то есть обладать следующими характерными свойствами [2]:

- модульность;
- платформенная независимость и взаимозаменяемость;
- масштабируемость.

Рассмотрим технические решения, применяемые при конфигурировании испытательной лаборатории ЭМС с открытой архитектурой, а также каждое из свойств подобной архитектуры.

Лаборатория ЭМС обладает свойством модульности, то есть способностью аппаратного и программного обеспечения к модификации путем добавления, удаления или замены отдельных модулей без воздействия на оставшуюся ее часть.

Модульность лаборатории ЭМС имеет два уровня реализации — компонентов и функциональных блоков. Различные компоненты и функциональные блоки для комплектования автоматизированных систем измерений и испытаний поставляют-

ся, как правило, многими фирмами-производителями.

К компонентам относятся информационно-измерительный и управляющий комплекс, РБК, ТЕМ-камера, ККИ, РВК. Предусматривается возможность замены, удаления или добавления определенного компонента в зависимости от требуемого диапазона частот, создаваемой напряженности поля, габаритных размеров объекта исследований, требований стандартов к конкретному виду измерений и/или испытаний.

К функциональным блокам относятся приборы информационно-измерительного и управляющего комплекса, антенные устройства и т. д. На этом уровне допускается добавление новых функциональных блоков, реализующих дополнительный вид испытаний или расширяющих существующий компонент до нового функционала.

Для испытаний оборудования гражданского назначения сконфигурирована система, которая состоит из EMC32 и обеспечивает управление испытаниями в GTEM 5407 после физического кабельного подключения выхода системы измерений и испытаний ко входу ТЕМ-камеры. В самой программной платформе Rohde & Schwarz EMC32 этот функционал реализован отдельной программной опцией.

Для испытаний в соответствии с военными, авиационными, автомобильными стандартами, а также для проведения испытаний на устойчивость к излучаемым помехам вы-

сокой напряженности поля в частотном диапазоне до 40 ГГц необходимо осуществить подключение к автоматизированной испытательной системе реверберационной камеры. Функционал проведения испытаний на устойчивость к излучаемым помехам высокой напряженности с помощью РВК реализован в программной платформе Rohde & Schwarz EMC32 отдельной программной опцией, как и в случае подключения GTEM 5407 (рис. 3).

Платформенная независимость и взаимозаменяемость

Наличие у системы этих свойств необходимо для выполнения программ на разных аппаратно-программных платформах. В этом всегда заинтересован потребитель программного обеспечения (ПО) для увеличения количества вариантов при выборе поставщиков оборудования. ПО EMC32 относится к классу прикладных программ специального (профессионального) назначения, то есть представляет собой совокупность программ для решения узких профессиональных задач в конкретной предметной области. Однако опыт инсталляции оборудования в лаборатории ЭМС показал достаточную гибкость ПО EMC32 разработки Rohde & Schwarz для обеспечения взаимосвязи компонентов различных производителей. В качестве примера можно привести взаимодействие R&S®EMC32 с ПО модульной платформы EMCenter фирмы ETS-Lindgren для управления антенной мач-

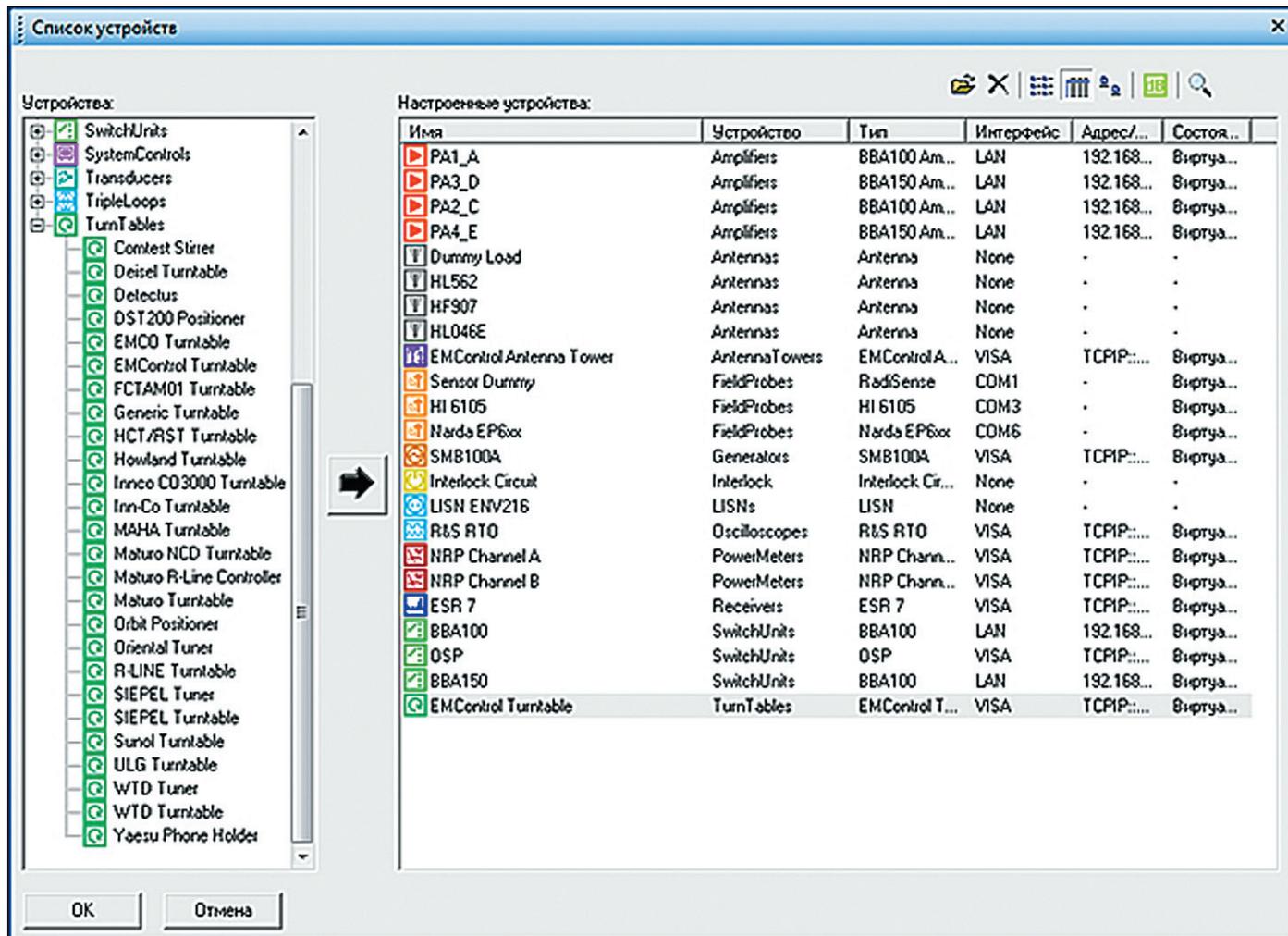


Рис. 4. Скрин рабочего окна программы Rohde & Schwarz EMC32 с иллюстрацией подключения управления поворотным столом через контроллер EMCenter ETS-Lindgren

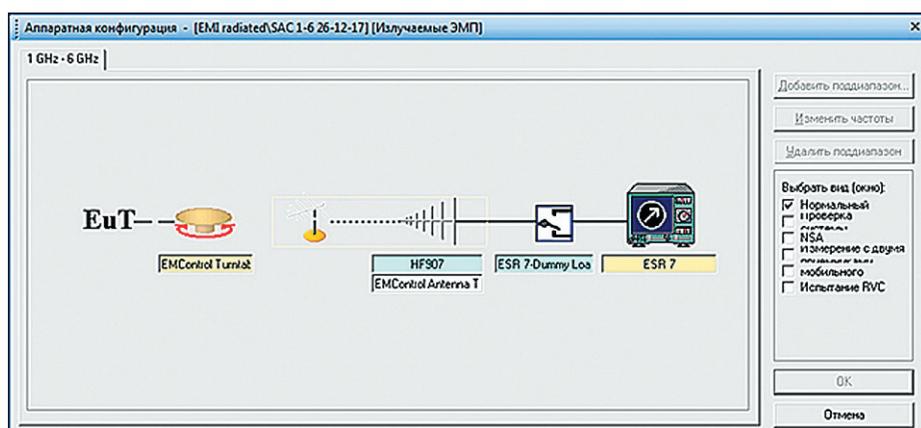


Рис. 5. Скрин рабочего окна программы Rohde & Schwarz EMC32 с иллюстрацией аппаратной конфигурации системы измерений излучаемых ЭМП производства Rohde & Schwarz с подключением управления поворотным столом через контроллер EMCenter производства ETS-Lindgren

той и поворотным столом РБК. В лаборатории ЭМС ЦПИ АУ «Технопарк-Мордовия» с помощью программной платформы Rohde & Schwarz EMC32, установленной на управляющей ПЭВМ, происходит интеграция с РБК путем подключения EMC32 к контроллеру управления поворотным столом и антенной мачтой РБК EMCenter, производства ETS-Lindgren (рис. 4, 5).

Масштабируемость (наращиваемость)

Это возможность использования одного и того же аппаратного и программного обеспечения для систем разного размера. Перспективной тенденцией является применение интернет- и интранет-технологий, которые обеспечивают построение глобальных

систем, в которых не имеет значения расстояние, а для работы с системой используется любой интернет-браузер. В приложении к лаборатории ЭМС такая задача поставлена и решается в рамках рабочего проекта создания распределенной системы прототипирования инноваций в областях машино- и приборостроения [3]. Выход на серверы других научных и испытательных центров, связь с мобильными испытательными комплексами с помощью облачных технологий — важнейший ресурс наращивания возможностей испытательного центра ЭМС ЦПИ.

Литература

1. Белов В. Ф., Петров В. В. Интеграция лаборатории ЭМС в систему распределенного проектирования прототипов изделий приборостроения // Компоненты и технологии. 2017. № 11.
2. Энциклопедия АСУ ТП. www.bookasutp.ru/Chapter1_0.aspx
3. Белов В. Ф., Якуба В. В. Центр проектирования инноваций — инструмент распределенного проектирования в машино- и приборостроении // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2017. № 11.

Экранированные и безэховые камеры «ТЕКО» — конкурентное решение в рамках программы импортозамещения

Сергей ЛЮТАЕВ,
начальник ИЛ ЭМС, АО «ТЕСТПРИБОР»

Экранированные (ЭК) и безэховые (БЭК) камеры используются в самых различных областях: проведение испытаний и НИР, настройка радиоаппаратуры, работы, при которых необходима защита от внешнего электромагнитного фона, соблюдения требований защиты информации, секретности, ПД ИТР, защиты персонала и средств измерений от повышенных уровней электромагнитного излучения.

Вот уже несколько лет АО «ТЕСТПРИБОР» поставляет экранированные камеры сборно-разборного типа, изготовленные по техническому заданию клиентов. Общение с заказчиками ЭК и БЭК показало, что стоимость камеры является важным, часто определяющим показателем. Поскольку основу камеры составляют металлические панели и комплектующие, которые могут быть изготовлены на отечественных предприятиях (что существенно уменьшает стоимость за счет исключения таможенных платежей и снижения транспортных расходов), было принято решение разработать линейку камер собственного производства.

Цель создания экранированных и безэховых камер «ТЕКО» — предложить потребителю недорогой, качественный отечественный аналог продукции зарубежных производителей, следуя принятому в отрасли курсу на импортозамещение.

При разработке и изготовлении камер использован подход, подразумевающий применение опробованных готовых модулей, типовых панелей и комплектующих.

В настоящее время предлагаются следующие варианты камер.

1. Экранированная камера (рис. 1)

- размер — любой, по требованию заказчика;
- класс экранирования: 1 по ГОСТ Р 50414;
- диапазон рабочих частот: 10 кГц...18 (40) ГГц.



Рис. 1. Экранированная камера без РПМ



Рис. 2. Безэховая экранированная камера с РПМ и внешним каркасом



Рис. 3. Бокс в контейнере



Рис. 4. Дверь для экранированных и безэховых камер. Опытный образец

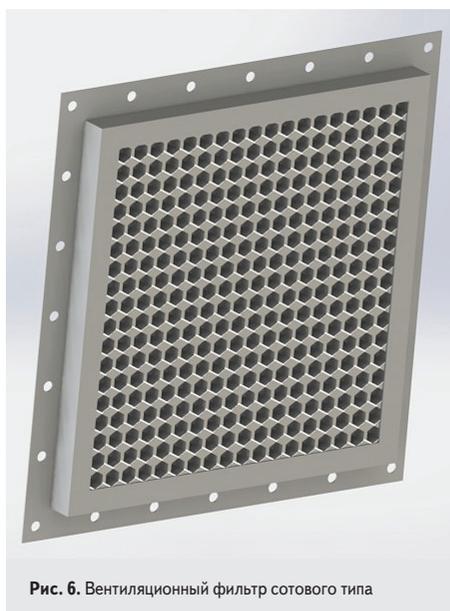


Рис. 6. Вентиляционный фильтр сотового типа

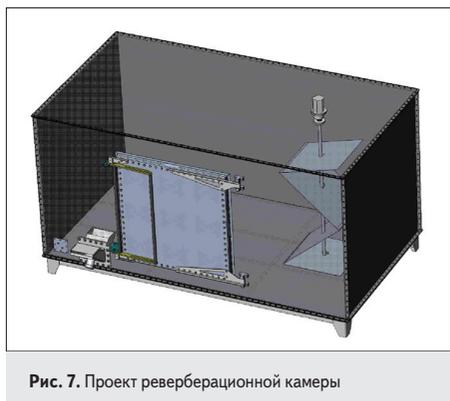


Рис. 7. Проект реверберационной камеры

Таблица. Типовые решения поставляемых камер

Наименование параметра	Экранированная камера ТЕКО Э-3	Полубезэховые камеры			Безэховые камеры	
		ТЕКО ПБЭК-3	ТЕКО ПБЭК-5	ТЕКО ПБЭК-10	ТЕКО БЭК-3	ТЕКО БЭК-5
Измерительное расстояние, м	3	3	5	10	3	5
Размер* по экрану, м	7,8×5×3,4	7,8×5×3,4	12,1×7,3×6	21,7×13×8,6	8,8×4,6×4,2	11,8×7,6×7,2
Размеры свободного объема по поглотителю, м	—	6,4×3,5×2,45	11,1×5,5×5,12	20,2×11,2×7,1	7,8×4,3×3	10,6×6,4×6

Примечание. *Размер ориентировочный (длина×ширина×высота).

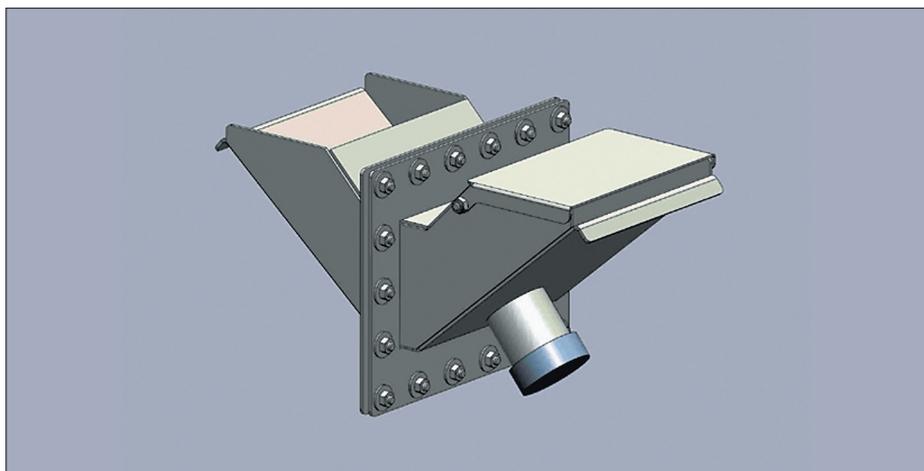


Рис. 5. Дробнозасыпной фильтр

2. Безэховая (полубезэховая) камера (рис. 2)

- класс экранирования: 1 (80–120 дБ) по ГОСТ Р 50414;
- диапазон рабочих частот: 10 кГц...18 (40) ГГц;
- антенные расстояния: 3, 5, 10 м;
- соответствие ГОСТ СИСПР 16-1-4.

Такие камеры позволяют проводить весь спектр испытаний на ЭМС и подходят для специализированных испытательных лабораторий.

Стоимость камер в значительной степени зависит от комплектации, но как средний ориентир на начало 2018 года можно указать уровень в 8,5-10 млн. рублей для ТЕКО БЭК-3. Типовые решения поставляемых камер представлены в таблице.

3. Экранированные камеры «контейнерного» типа (рис. 3)

- камеры размещены в стандартном транспортном контейнере;
- предназначены для работ с соблюдением требований защиты информации, ПД ИТР, защиты персонала и испытательной аппаратуры от повышенных уровней электромагнитного излучения;
- класс экранирования: 1 по ГОСТ Р 51414.

Радиопоглощающий материал (РПМ) подбирается в соответствии с требованиями заказчика.

Поставляемый РПМ не горюч (класс НГ по ГОСТ 30244-94), не гигроскопичен. Высота пирамид 45–500 мм. Для комплектации экранированных и безэховых камер были разработаны двери, обеспечивающие 1 класс экранирования по ГОСТ Р 51414.

Двери отличаются надежным подвесом на 2–4 усиленных петлях, с оригинальной запирающей системой, обеспечивающей параллельный прижим двери к плоскости рамы, с надежной фиксацией в ножевых фильтрах по периметру. Коэффициент экранирования дверей: не хуже 100 дБ.

Пример исполнения двери представлен на рис. 4.

Кроме того, разработаны облегченные двери для ЭК и БЭК с тамбуром с двумя дверями.

Экранированные и безэховые камеры «ТЕКО» комплектуются изделиями собственной разработки и производства:

1. Дробнозасыпные фильтры (рис. 5);
2. Вентиляционные фильтры сотового типа (рис. 6).

В комплект поставки входят также защитные фильтры радиопомех для ввода сети электропитания 380/220 В 50 Гц, испытательный стол с пластиной заземления и антистатический пол.

Специалисты АО «ТЕСТПРИБОР» разработали и изготовили опытный образец реверберационной камеры (рис. 7, 8), рассчитанной на работу в диапазоне частот 700 МГц – 18 ГГц:

- размеры камеры 2700×1500×1300 мм, размер двери 850×850 мм;
- рабочий объем 1,2×1×0,8 м.

Использование реверберационной камеры позволяет достигать высоких уровней напряженности электромагнитного поля без использования мощных СВЧ-усилителей, поставка которых попадает под санкции стран Запада.

При использовании усилителя мощности СВЧ до 100 Вт в реверберационной камере реально получить уровень напряженности поля в испытательном объеме 1000–1500 В/м в рабочем диапазоне частот камеры.

По требованию заказчика диапазон частот может быть расширен до 40 ГГц.

В настоящее время с опытным образцом камеры можно ознакомиться в ИЛ ЭМС АО «ТЕСТПРИБОР».

По желанию заказчика может быть представлен проект камеры импортного производства.

Помимо разработки АО «ТЕСТПРИБОР», проводит аттестацию ЭК и БЭК в диапазоне частот до 40 ГГц (экспертное заключение № 10.001-2014, выданное ФГУП ВНИИФТРИ) в соответствии с ГОСТ РВ 0008.003-2013, ГОСТ Р 8.568-97: первичная, периодическая, повторная аттестация испытательного оборудования, применяемого при оценке соответствия оборонной продукции; разрабатывает программы и методики аттестации; выполняет метрологическую экспертизу программ и методик аттестации ЭК и БЭК.



Рис. 8. Опытный образец реверберационной камеры, построенной в ИЛ АО «ТЕСТПРИБОР»

Резонансный метод в испытаниях на восприимчивость к высокочастотному магнитному полю

Илья РОМАНОВ,
к. ф.-м. н.

Восприимчивость оборудования к магнитным полям является важной и неотъемлемой частью работ при испытаниях его на выполнение требований по электромагнитной совместимости (ЭМС). Форма, амплитуда и период колебаний магнитного поля определяются природой внешних возмущающих факторов. При испытаниях на устойчивость к постоянному магнитному полю, магнитному полю промышленной частоты, импульсному магнитному полю (например, для целей размагничивания) размер источника магнитного поля ограничивается размерами испытательного помещения и массо-габаритными характеристиками изделия. В случае испытаний на восприимчивость к высокочастотному магнитному полю размеры источников ограничиваются также его электрическими характеристиками [1].

Для получения однородного магнитного поля используют катушки Гельмгольца (рис. 1) — две одинаковые и расположенные на одной оси радиальные катушки, расстояние между центрами которых равно их среднему радиусу. В центре такой системы колец образуется зона однородного магнитного поля.

Как известно, плотность магнитного потока, или магнитная индукция, пропорциональна электрическому току:

$$B = (4/5)^{3/2} \times (\mu_0 n I / r), \quad (1)$$

где B , [Тл] — магнитная индукция; μ_0 , $\text{Н} \times \text{А}^{-2}$ — магнитная постоянная; n — количество витков; I , [А] — сила электрического тока; r — радиус катушки.



Рис. 1. Катушка Гельмгольца

Следовательно, для генерации мощного магнитного поля необходим большой ток. Однако на высоких частотах импеданс катушки становится высоким, как известно:

$$X_L = 2\pi \times f \times L,$$

где X_L — реактивное сопротивление катушки; f , [Гц] — частота; L , [Гн] — индуктивность катушки.

Если рабочая частота катушки Гельмгольца близка к частоте собственного резонанса, в эквивалентную схему (рис. 2) включаются паразитные емкости (рис. 3). Они подключаются параллельно индуктивности и собственному активному сопротивлению катушки.

Частоту собственного резонанса определяют паразитная емкость и индуктивность катушки. Однако при проведении испытаний желательно использовать рабочую частоту значительно меньшего значения. В этом случае можно пренебречь влиянием паразитных емкостей и пойти другим путем.

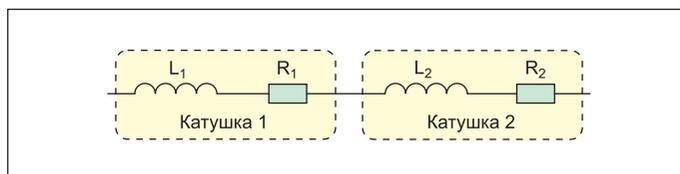


Рис. 2. Эквивалентная схема катушки Гельмгольца

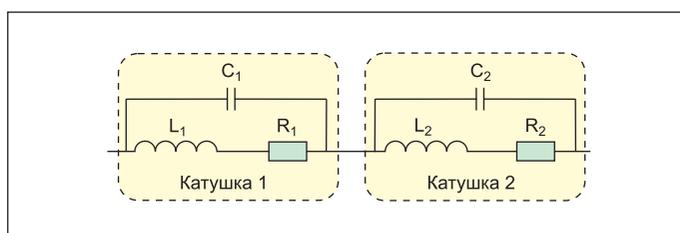


Рис. 3. Эквивалентная схема высокочастотной катушки Гельмгольца

Метод прямого управления

Если испытания проводятся на постоянном токе, на низких частотах, или если катушки Гельмгольца имеют малую индуктивность, а паразитными емкостями C_1 и C_2 можно пренебречь, то в таком случае ток можно подавать непосредственно на контакты катушки. Источником может являться генератор, используемый совместно с внешним усилителем мощности или отдельно от него. В испытательной лаборатории ЭМС АО «ТЕСТПРИБОР» в зависимости от назначения испытаний используются комплексы имитации кондуктивных помех (КИКП-1) или комплекс имитации бортовой сети (КИБС-7).

На рис. 4 представлены типичные схемы их подключения к катушке Гельмгольца в режиме прямого управления. При испытаниях на частотах до 1,5 кГц применяется комплекс КИБС-7. На частотах выше 1,5 кГц используется оборудование из состава КИКП-1. При этом параметры катушки выбираются исходя из требований к частоте и величине плотности магнитного потока.

Напряжение U на контактах катушки при протекании через нее тока силой I можно представить следующим выражением [2]:

$$U = I \times \sqrt{2\pi \times f \times (L_1 + L_2)^2 + (R_1 + R_2)^2}, \quad (2)$$

где I — пиковый ток; f — частота возбуждения; L_1, L_2 — индуктивности колец катушки Гельмгольца; R_1, R_2 — собственное сопротивление колец катушки Гельмгольца.

Тогда, с учетом (1), можно вычислить напряжение на контактах катушки Гельмгольца, необходимое для создания поля с магнитной индукцией B :

$$U = \left(\frac{5}{4}\right)^{3/2} \frac{B \times r \times \sqrt{2\pi \times f \times (L_1 + L_2)^2 + (R_1 + R_2)^2}}{\mu_0 \times n}. \quad (3)$$

Метод последовательного резонанса

Импеданс катушки Гельмгольца возрастает пропорционально частоте. На высоких частотах возрастает реактивное сопротивление катушки. Так, например, для катушки с индуктивностью 45 мГн на частоте 10 кГц ее полное сопротивление будет равно 2827 Ом. Соответственно, при напряжении на контактах катушки 100 В по ней будет протекать ток в 35 мА. А чтобы получить ток в 2 А, необходимо подать напряжение 5,7 кВ, что неприемлемо с практической точки зрения.

Для решения данной проблемы с током в цепи катушки Гельмгольца можно использовать явление последовательного резонанса [1, 3]. Схема электрического подключения катушки представлена на рис. 5. Известно, что при последовательном резонансе полное сопротивление последовательного колебательного контура минимально и равно активному сопротивлению, так как реактивные сопротивления конденсатора и индуктивности имеют одинаковую величину, но противоположны по знаку.

Величина емкости конденсатора вычисляется выражением:

$$C = 1 / (2\pi f_{\text{рез}})^2 \times 1 / (L_1 + L_2), \quad (4)$$

где $f_{\text{рез}}$ — частота резонанса, C — емкость компенсирующего конденсатора.

На частоте резонанса полное сопротивление катушки Гельмгольца равно ее активному сопротивлению $R_1 + R_2$. Например, для катушки с активным сопротивлением, равным 3,3 Ом, чтобы создать в ней ток в 40 А, необходим генератор с выходным напряжением всего 132 В.

Основным недостатком резонансного метода является необходимость перестройки компенсирующего конденсатора при изменении резонансной частоты. Кроме того, при конструировании катушки

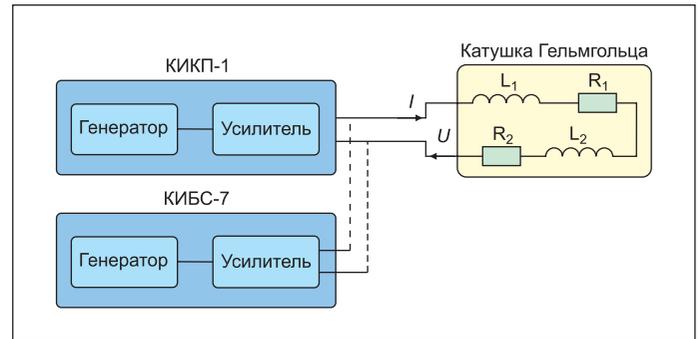


Рис. 4. Прямое управление катушками Гельмгольца с помощью комплексов КИКП-1 и КИБС-7

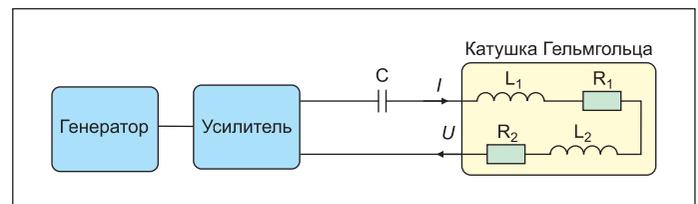


Рис. 5. Схема подключения катушки Гельмгольца в режиме последовательного резонанса

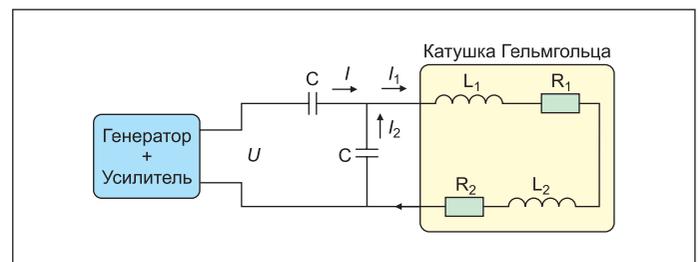


Рис. 6. Схема генерации магнитного поля в режиме резонансного усиления тока

и выборе конденсатора необходимо учитывать высокие напряжения, возникающие на их контактах, которые могут достигать единиц и даже десятков тысяч вольт. Поэтому необходимо применять меры по защите от электрического пробоя оборудования и требования в части обеспечения безопасности персонала.

Метод резонансного усиления тока

При испытаниях на восприимчивость к магнитному полю может не хватать мощности источника тока (генератора или усилителя). Однако существует способ увеличения тока в катушке Гельмгольца в два раза без замены источника тока. Этот метод называется методом резонансного усиления тока [1, 4]. На рис. 6 представлена схема подключения оборудования в указанном режиме.

Емкости конденсаторов принимаются равными и вычисляются по формуле:

$$C = 1 / (2\pi f_{\text{рез}})^2 \times 1 / (2 \times (L_1 + L_2)). \quad (5)$$

На резонансной частоте $f_{\text{рез}}$ импеданс катушек Гельмгольца имеет чисто активный характер и в четыре раза превышает сопротивление катушки в режиме последовательного резонанса [4]. Так, например, для катушки с активным сопротивлением, равным 3,3 Ом, чтобы создать в ней ток в 40 А, необходимо использовать генератор с выходным напряжением 264 В и током 20 А. Так же, как и в методе последовательного резонанса, здесь необходимо учитывать, что катушки, которые должны использоваться именно в схеме резонансного усиления тока, необходимо конструировать так, чтобы их сопротивление

было, по возможности, минимальным. Кроме того, следует помнить и о том, что не только по причине наличия индуктивности, а также и из-за скин-эффекта сопротивление катушек переменному току больше, чем по постоянному.

Заключение

Рассмотрены три способа подключения катушки Гельмгольца для получения высокочастотных магнитных полей. Показано, что основным недостатком метода прямого подключения на высоких частотах является необходимость иметь высоковольтный источник переменного тока, что с практической точки зрения не всегда возможно. Метод последовательного резонанса имеет преимущество в активном характере сопротивления катушки на частоте резонанса, а величина сопротивления определяется только параметрами провода катушки. При этом способе не требуется высоковольтного источника переменного тока. Преимущество метода резонансного усиления тока (в сравнении с методом последовательного резонанса) заключается в увеличении в два раза тока (и магнитной индукции поля), протекающего через катушку Гельмгольца при одинаковом токе источника. Недостатком является большее пол-

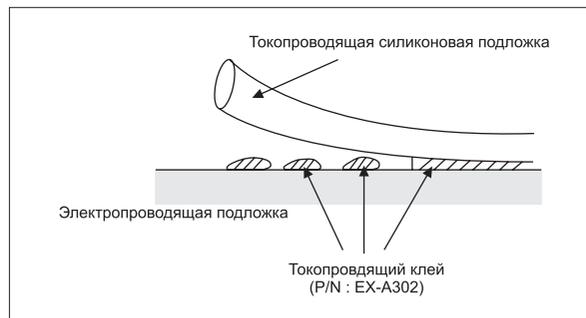
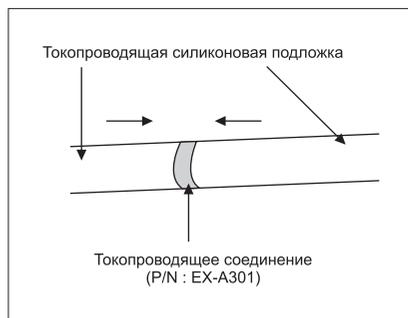
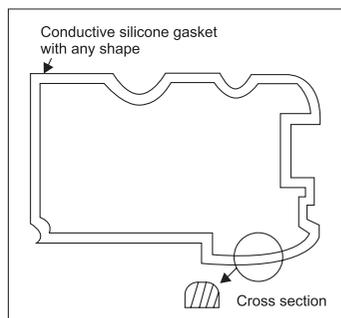
ное сопротивление катушки, а значит, и необходимость источника с более высоким выходным напряжением. Преимуществом резонансных методов является возможность получения высокочастотных магнитных полей большой плотности магнитного потока, а также работа аппаратуры на чисто активное сопротивление. Недостатком является необходимость перестройки резонансного контура на требуемую для проверки аппаратуры резонансную частоту. ■

Литература

1. Yang K. C. Radio Frequency Circuit Design.
<http://www.radiolocman.com/review/article.html?di=163905>
2. Helmholtz Coil. Accel Instruments Corp.
<http://www.accelinstruments.com/Helmholtz-Coil/Helmholtz-Coil.html>
3. High-Frequency Electromagnet Using Resonant Technique.
<http://www.accelinstruments.com/Applications/WaveformAmp/Electromagnetic-Coil-Resonant.html>
4. Magnetic Field Generator Uses New Resonant Circuit.
<http://www.accelinstruments.com/Applications/WaveformAmp/Magnetic-Field-Generator.html>

Статья опубликована в журнале «Компоненты и технологии» № 5'2017

Специальный токопроводящий полимерный клей для приклейки профилей — EX-A302L/ID-CSS(A, N)



Для приклеивания готовых профилей или создания профилей -вида применяется вязкий клеевой состав EX-A302L/ID-CSS(A, N). По своему химическому составу он полностью аналогичен готовым профилям и полностью совместим с ним по электрохимическим и механическим параметрам. При нанесении клеевого состава достаточно обезжирить несущую поверхность и нанести тонкий слой клея. Нанесение клея лучше всего производить через дозатор с иглой соответствующего калибра, затем устанавливается готовый силиконовый профиль и прижимается в рабочее состояние.

Возможно склеивать рабочие поверхности сложной конфигурации для постоянного электромеханического контакта, тем самым сохранить целостность экрана, для чего склеиваемую поверхность прижимают сразу после нанесения клея.

Характеристики и применение токопроводящего силиконового клея

Силиконовый клей EX-A302L/ID-CSS(A, N) представляет собой вязкую массу, состоящую из материала SC с растворителем, клей ID-CSS(C) представляет собой вязкую массу, состоящую из материала NC с растворителем.

- Сопротивление по прикрепляемой поверхности:
Max 0,08 Ом·см (SC), Max 0,4 Ом·см (C);
- Рабочий температурный диапазон: -55...150 °C;
- Время высыхания:
— при 25 °C не более 36 ч;
— при 70 °C не более 6 ч;
- Срок жизни в закрытой упаковке: при -10...0 °C — 6 мес.

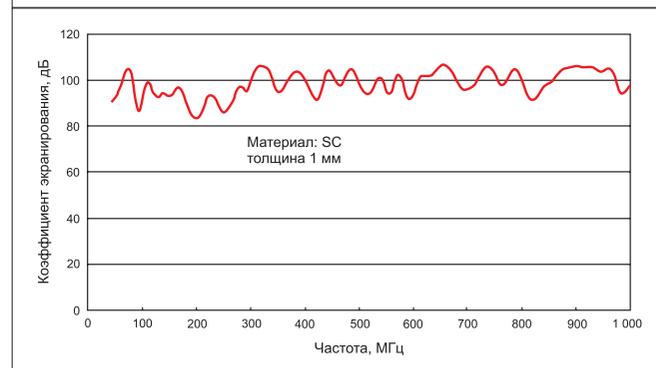
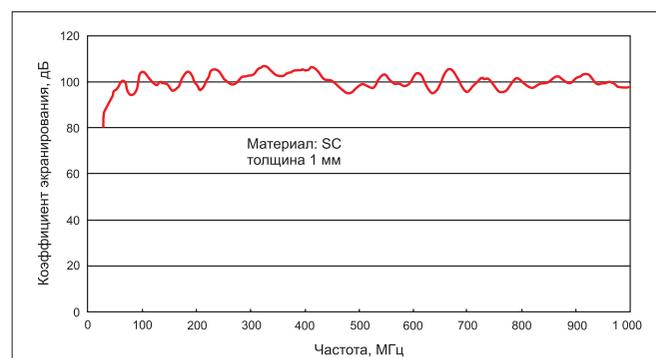
АО ТЕХНО

105275, г. Москва, ул. Уткина, д. 40

Тел. (495) 735-44-29

<http://www.techno.ru>

e-mail: ywg@techno.ru



Устранение проблем, выявленных в ходе испытаний изделия на выполнение требований по ЭМС

Вниманию читателей предлагается четвертая анонсированная в публикации [1] статья, посвященная электромагнитным помехам (ЭМП) и электромагнитной совместимости (ЭМС). Оригинальный материал [2] опубликован в выпуске [3], здесь он представлен с комментариями, дополнениями, уточнениями и пояснениями переводчика как соавтора предлагаемого варианта. Перевод выполнен с разрешения ITEM Media и автора материала. Тема этой статьи цикла — что делать при выявленных несоответствиях требованиям ЭМС.

Кеннет УАЙТ (Kenneth WYATT)
ken@emc-seminars.com

Перевод, дополнения и комментарии:
Владимир РЕНТЮК

Итак, вы внимательно изучили стандарты и требования по электромагнитной совместимости (ЭМС) [4, 5], тщательно настроили к этим крайне важным испытаниям аппаратуру, нашли соответствующую лабораторию и подготовились сами [5], запаслись шампанским... Вы полны решимости одержать победу, а иначе зачем было все начинать? И вдруг... провал. В разработанном или изготовленном вами изделии найдено несоответствие. Как уже говорилось в одной из первых частей этой серии, в жизни всякое бывает и очень часто, надо идти дальше, еще не все потеряно и триумф ждет впереди. Как отмечал немецкий философ Фридрих Ницше, «что не убивает меня, то делает меня сильнее». А значит, как минимум вы приобрели ценный опыт. Опустим первый традиционный вопрос «кто виноват?», тут можно быть спокойным, ответ найдут очень быстро, а мы перейдем ко второму — «что делать?», который не так ясен.

Во-первых, не паниковать. Во-вторых, не обвинять испытательную лабораторию в некомпетентности. Да, у них бывают ошибки, но часто это не их вина, а ваш недостаток — не предоставили всего комплекта документации, не дали всех инструкций, не показали персоналу, как подключать вспомогательное оборудование. Помните, изделие ваше, вы провели с ним не часы, а недели, а лаборатория столько времени не имела, для нее ваше изделие нечто совершенно новое. В одной из предыдущих частей данной серии было сказано, что испытательная лаборатория, хотя там и работают живые люди, — это инструмент. Вы же не обижаетесь на тестер или осциллограф, если он показал не то, что вам хочется? Так что, повторюсь, сначала надо

не паниковать, а думать и искать причину. Ведь лаборатория, как и вы, заинтересована в положительном результате испытаний, но в случае обнаруженного несоответствия вы не сможете «договориться», поэтому даже не пытайтесь просить ее сказать про черное — белое, на кону ее репутация и ее бизнес. Но по своему опыту как переводчик и соавтор статьи могу отметить, что в европейских испытательных центрах, в отличие от квалификационных и государственных испытаний, проходивших в советский период, никто не занимается, что называется, «блехоловством». Поэтому, например, превышение в 0,1 дБ просто спишут на погрешность измерения. Доработка, если она помогает, будет учтена и задокументирована (обычно фотофиксацией), а вы возьмете обязательство внести коррективы в документацию и передать изменения в лабораторию на хранение. Выполнение повторных испытаний, как правило, от вас не потребуются.

Тем не менее сбрасывать со счетов ошибку персонала нельзя, и если у вас есть четкие и подкрепленные аргументами подозрения, надо твердо стоять на своем. В моей практике был аналогичный случай. В одном из зарубежных испытательных центров зафиксировали отказ нашего оборудования специального назначения. Отказ был проанализирован, и мы аргументированно показали, что есть нарушение в подключении вспомогательного оборудования. Проблема состояла в том, что нас не допустили в саму испытательную лабораторию центра из-за ограничения уровня нашего допуска. Персонал центра перепроверил подключения и доложил, что все верно, а изделие отказало. Мы стояли на своем и буквально сказали, что либо нас допускают к оборудованию, либо выносят из центра за руки и за ноги. Поскольку у нас

уже сложились хорошие отношения с высшим руководством, на второй день нас допустили в их святая святых. В итоге оказалось, что на внешнем блоке управления не активировали один из тумблеров, расположенный не на передней, а на тыльной панели. Его включили, и испытания закончились успешно.

Наибольшие риски при проведении испытаний на соответствие требованиям по ЭМС несут не кондуктивные, то есть наведенные, помехи (хотя и они являются причиной головной боли разработчиков), а собственно излучаемые ЭМП. Сегодня со всеми нашими высокоскоростными цифровыми схемами внутри электронных продуктов можно точно гармонизировать тактовую частоту с другими частями схемы, использующими импульсы с высокой крутизной фронтов, что в совокупности становится источником излучения электромагнитных полей, а в нашем случае — помех. Так что, как правило, причина несоответствия — либо излучение кабеля, либо утечка электромагнитного излучения из щелей или отверстий в корпусе. Однако, имея информацию о несоответствии требованиям, которую предоставила вам испытательная лаборатория, прежде чем заниматься корпусом и кабелями, еще раз внимательно посмотрите и на схему и на конструкцию. У меня был случай, когда уже серийное изделие отказало на испытаниях по ЭМС, причем вся партия, хотя ранее никаких проблем не было. Причину выявили при осмотре — пермаллоевый экран, накрывающий мощный трансформатор, оказался не отоженным и не выполнял свою функцию, но поскольку он был установлен на всей партии, то никто, кроме главного конструктора, а им был переводчик и соавтор статьи, разницы в структуре материала

не заметил. Экраны ожогли, и проблема исчезла.

Ниже приведен полезный и удобный в работе перечень мероприятий, который можно использовать либо в целях предварительной проверки перед тестированием на ЭМС, либо как проверку после неудачи на испытаниях. Часы в испытательной лаборатории тикают, не останавливаясь, отмеряя не столько минуты, сколько ваши деньги, но благодаря тому, что такой перечень и рекомендации будут краткими и точными, вы не потратите на их выполнение слишком много времени.

В качестве обещанного вниманию читателей представлены выдержки из книги «EMI Troubleshooting Cookbook for Product Designers» («Настольная книга для дизайнеров продуктов с ЭМП»), написанная совместно Патриком Андре (Patrick André) и автором настоящей статьи Кеннетом Уайтом [7].

Что нужно проверить при обнаружении несоответствия по уровню излучения ЭМП

Сначала необходимо обратить внимание на следующее:

- Для частот ниже 200 МГц наиболее вероятным источником излучения являются кабели, поскольку на более низких частотах длины волн большие, именно провода становятся для них лучшими антеннами.
- Помехи с частотами выше 200 МГц, вероятнее всего, могут исходить от шасси. Чем выше частота, тем больше вероятность, что источниками излучения будут именно шасси устройства или его монтажная плата (если нет шасси или этот узел выполнен в виде открытой стойки). Заметьте, речь идет не о генерации, а именно об источниках. Помеха может быть сгенерирована там, где меньше всего ожидаешь, — не генератором тактовой частоты или в DC/DC-преобразователе, что достаточно обычно, а, скажем, в собственном преобразователе изолированного интерфейса, как в примере, описанном в [9].
- Убедитесь, что все экранированные кабели имеют низкоимпедансное подключение, причем на своих обоих концах. Удостоверьтесь, что все экраны имеют прямой непосредственный контакт с шасси или заземленным разъемом. Избегайте применения экранированных кабелей с заземленным одним концом и плетенки для их подключения, если только в этом нет абсолютной необходимости, обусловленной конструктивными требованиями.
- При использовании плетенки для соединения экранированного кабеля убедитесь, что она выполнена максимально короткой. Правильный пример такого подключения показан на рис. 1.
- Удостоверьтесь, что металлические детали корпуса имеют надежный контакт между собой (приемлемое сопротивление

не должно превышать 10 мОм, но чем меньше — тем лучше), без краски или других покрытий, смазки или грязи, коррозии или окисления, что может повысить сопротивление такого контакта. Учитывайте и то, что низкое сопротивление должно сохраняться в течение всего времени эксплуатации устройства. Имейте также в виду, что сварка черного металла не обеспечивает столь низкого переходного сопротивления, а точечная сварка стали, как и заклепки (особенно при наличии физических нагрузок), в этом случае вообще неэффективны.

- Проверьте, что каждая цепь подключения питания, выходящая из оборудования, фильтруется, а фильтр расположен рядом с точкой ввода или выхода такой цепи из оборудования.
- Если вы испытываете коммерческое оборудование на выполнение требований FCC, CE и т. д. [2] и повышенный уровень излучения на антенну с вертикальной поляризацией зафиксирован на частотах ниже 80 МГц, то попробуйте отсоединить кабель питания от контакта с «землей». Это уменьшит путь связи от изделия до антенны через плоскость заземления. И наоборот, попробуйте увеличить контакт с плоскостью заземления и посмотреть, повысится ли уровень излучения.
- Если к устройству подключено вспомогательное оборудование, убедитесь, что оно не является источником помех. Если возможно, выключите вспомогательное оборудование. Или выключите испытуемое оборудование и оставьте включенным только вспомогательное оборудование.



Рис. 1. Подключение экранирующей оплетки силового кабеля

Если помехи остаются, их источником может быть не тестируемое оборудование, а вспомогательное.

Типичные источники проблем

Большинство изделий не проходит проверку на уровне излучения из-за излучающих кабелей или проблем с их корпусами. Вот некоторые моменты, которые можно быстро проверить.

Излучение кабелей

I/O-кабели (портов ввода/выхода) или силовые кабели, как правило, излучают высокочастотные гармоники из-за плохого соединения их экрана с шасси или корпусом, отсутствия адекватной фильтрации или когда они просто «проталкиваются» через отверстие в экранированный корпус. Как правило, если присутствуют отказы на частотах ниже

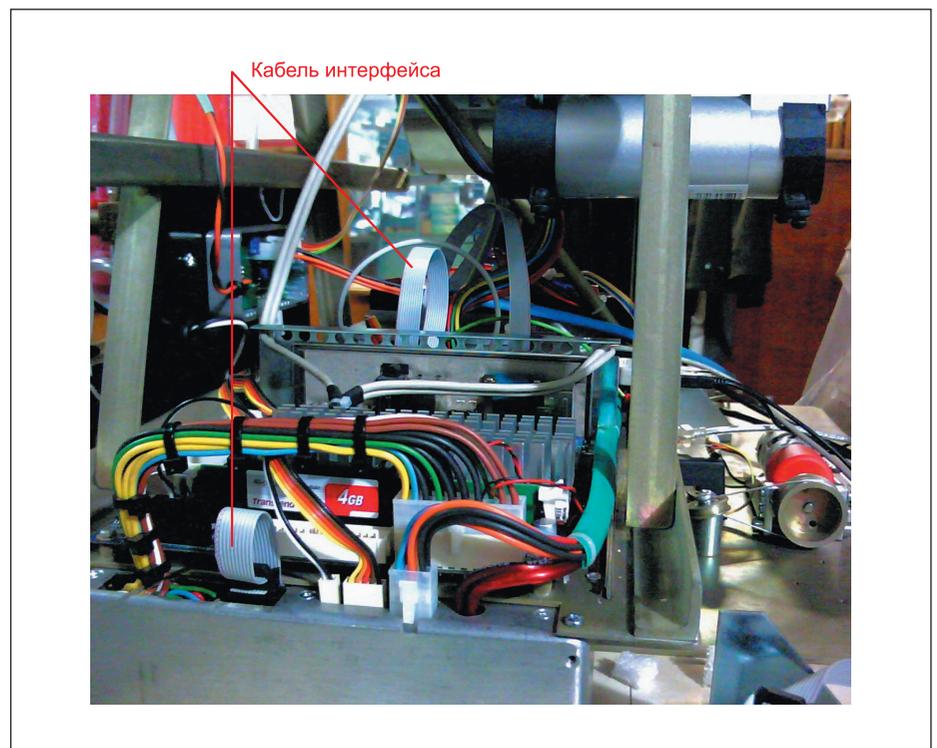


Рис. 2. Электромагнитная помеха с пиком частоты 300 МГц вышла по интерфейсному ленточному кабелю. Изображение предоставлено компанией «Модуль-98»

200 МГц, это указывает на излучение кабеля. Причина, по которой излучение низкой частоты исходит от кабелей, состоит в том, что для создания хорошей антенны необходима некая физическая длина. И чем она больше, тем эффективнее такая «антенна» может передавать излучение. Обычно кабели являются самой «длинной» частью оборудования и, следовательно, источником большинства низкочастотных излучений и поводом для возникновения проблем в этом частотном диапазоне. Так, в примере, описанном в [9], помеха вышла наружу по кабелю к интерфейсу (рис. 2). Как можно видеть из представленного рисунка, обнаружить это было непросто. Как и где «искать» — будет рассказано далее.

Металлическое шасси и корпус

Излучение на более высоких частотах (обычно свыше 200 МГц) чаще всего возникает из-за излучения металлического шасси и корпуса оборудования. На этих, более высоких частотах кабели ввода/вывода в связи с их индуктивной составляющей обычно имеют более высокий, чем шасси, импеданс, а следовательно, и меньшую тенденцию к излучению. Единственное исключение — случай, когда тестируемое оборудование отличается крупными габаритами. Так, металлический шкаф высотой более 2 м, который опирается на плоскость заземления, может иметь четвертьволновой резонанс на частотах около 30–40 МГц.

Стыки

Один из распространенных источников проблем — стыки корпуса. Печатные платы внутри устройства могут создавать токи на внутренней поверхности шасси. Эти высокочастотные токи вытекают из стыков или зазоров, а затем распространяются по внешней части шасси или корпуса оборудования. Таким образом, весь корпус становится хорошей передающей антенной. Исключением является то, что большая часть тока может быть возвращена источнику, очень близко к точке, где она соединена с шасси. Вот почему предпочтительно использовать байпасную емкость на монтажной плате или на плоскости обратной связи платы, которые хорошо связаны с корпусом.

Еще один метод, однажды примененный переводчиком статьи, заключался в следующем. В изделии был целый жгут проводников, которые требовалось подключить к корпусу. Если их подключали частями — мы тонули в помехах. Выход был найден, когда все провода соединили вместе и уже опытным путем нашли на шасси оптимальную точку заземления.

Когда высокочастотные токи текут внутри корпуса оборудования и приходят к месту стыка или шву, они должны иметь возможность беспрепятственно перетечь через этот шов. Импеданс даже в несколько миллиом приведет к падению напряжения на таком стыке, а в результате создаст сильное элек-

трическое поле, которое будет излучаться в пространство. Обратите внимание, что горизонтальный шов имеет градиент напряжения или вектор сверху вниз, создавая вертикально поляризованное электрическое поле, а вертикальный шов генерирует доминирующее горизонтально поляризованное поле. Хорошая методика устранения неполадок — отметить поляризацию поля помехи (что допустимо только при использовании антенны для электрического поля) и определить, может ли она быть вызвана некачественным швом.

Если в изделии предусмотрен жидкокристаллический (ЖК) дисплей, утечка иногда возникает по краям такого дисплея. Во многих случаях ЖК-дисплеи плохо связаны с корпусом и могут выступать в качестве передающей антенны. Другие области утечки — щели между подсоединяемыми дочерними картами (как в типичном корпусе ПК) или вентиляционными отверстиями.

В том случае, если в устройстве есть двигатели, не забывайте и о них. Они тоже источники ЭМП, особенно это касается коллекторных двигателей, тут обязательно нужны помехоподавляющие элементы, установленные непосредственно на выводах самих двигателей.

Устранение неисправностей в испытательной лаборатории

При проведении испытаний на выполнение требований по ЭМС бывает необходимо (и это достаточно распространенное явление) устранить недопустимые излучения в самой испытательной лаборатории. Есть несколько моментов, о которых надо знать и обязательно сделать.

- Следует настоять, чтобы у вас была возможность видеть показания на экране анализатора спектра. Это может быть проецируемое изображение того, что происходит внутри экранированной камеры, или анализатор, подключенный к оборудованию, находящемуся в камере. Если единственным вариантом является монитор, расположенный за дверью экранированной комнаты, а дверь для осмотра необходимо открыть, то убедитесь, что вы наблюдаете именно вашу помеху и это не окружающий сигнал от FM-вещания, сотовых телефонов или цифрового телевидения. Вероятно, вам придется на время выключить ваше оборудование, чтобы удостовериться, что помеха ваша.
- Когда вы участвуете в оценке уровня помех, убедитесь, что вы сами, своим телом, не влияете на ход измерения уже просто тем, что находитесь в камере. Как только вы войдете, то измените структуру поля и уровни излучения не будут такими, как прежде. Да и положение (имеется в виду ориентация) тестируемого оборудования уже может оказаться не в максимально худшем положении, как требуется для ис-

пытаний изделий коммерческого назначения [4]. Кроме того, на результат способны повлиять даже небольшие перемещения кабелей и блоков, поэтому имейте в виду факт, когда вы чувствуете, что было достигнуто улучшение. Оно могло стать следствием изменения положения по углу или из-за перемещения устройства.

- Не вставляйте между антенной и оборудованием. Человеческое тело — это замечательный поглотитель радиочастотных сигналов.

При приближении к месту излучения помехи, как только оно будет обнаружено, убедитесь, что вы точно его определили. Укажите всем участвующим в процессе, где им стоять, и убедитесь, что они не двигаются. Их движение и изменение вашего положения повлияют на исследование.

Для поиска источника излучения прежде всего начните с захвата кабелей руками (если это безопасно). Таким простым способом, если кабели являются основными излучателями ЭМП, вы сможете быстро определить проблемный кабель. Достаточно просто обжать его рукой и отпустить, если уровень помех падает при захвате — это он, голубчик. Но тут нужна известная сноровка, и во время процедуры сводите к минимуму движения, поскольку они способны менять настройку поля испытательной камеры. Кроме того, для подъема кабелей, чтобы не вступать с ними в непосредственный контакт, потребуются деревянная или пластиковая палочка, минимизирующая ваше влияние на кабели. Для этой цели лучше использовать что-то наподобие хоккейной клюшки, позволяющей находиться на расстоянии от устройства, сводя к минимуму ваше воздействие на поле, излучаемое кабелями. Таким образом, любые изменения, которые вы видите, будут связаны только с движением кабеля.

Довольно часто возникает ситуация, когда кабели ввода/вывода подсоединены к испытываемому изделию, но оказываются отключенными на противоположном конце. Попробуйте отключить их по одному и делайте это до тех пор, пока все не используемые во время тестирования кабели не будут отключены. Это также поможет определить, какой кабель или кабели излучают ЭМП.

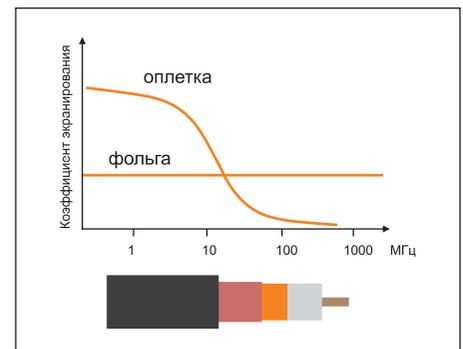


Рис. 3. Коэффициенты экранирования оплетки и фольги

Здесь необходимо учитывать, в какой полосе частот обнаружена помеха. Дело в том, что на относительно низких частотах до нескольких десятков мегагерц лучшее экранирование обеспечивает оплетка, главным образом за счет своей толщины. Однако затем экранирующие способности оплетки резко падают и становятся почти неприемлемыми еще до 100 МГц. В то же время фольга имеет плоскую амплитудно-частотную характеристику, сохраняя удовлетворительные экранирующие способности в очень широком диапазоне, вплоть до гигагерц (рис. 3) [12].

Если кабели не вызывают проблемы и с них сняты все подозрения, попробуйте, при условии, что это безопасно, коснуться руками корпуса или шасси оборудования. При необходимости нажмите и прижмите корпус изделия, чтобы убедиться, что металлические детали хорошо пригнаны, или постарайтесь их приоткрыть. В этом случае можно увидеть, что излучение ЭМП резко падает или возрастает, то есть где-то имеется щель или отсутствует контакт и экранирование изделия нарушено. Причина в том, что даже кажущиеся хорошо контактирующими поверхности на самом деле такими не являются (рис. 4а), но ситуацию удастся исправить, разместив между ними специальные токопроводящие материалы (рис. 4б) [12], ранее для этого закладывали плетенку во фрезерованные канавки. Во время обследования обратите внимание и на наличие покрытий (краски), дефектов литья или штамповки, которые могут быть на стыках металлических экранов. Если вы используете крепеж, то, например, в компании «Модуль-98» вместо шайб Гровера с успехом использовались шайбы типа «звездочка», которые обеспечивали более надежный контакт.

Важность такого контакта можно продемонстрировать примером из жизни. При испытании одного из первых на территории СНГ блоков бесперебойного питания, аналогичных знаменитым Smart-UPS компании APC (США) и созданных компанией, где работал переводчик статьи, обнаружился повышенный уровень ЭМП. Помеха была обычной — от тактового генератора, а причиной повышенного уровня оказалась именно краска в местах крепежа крышки корпуса. После ее удаления уровень помехи упал ниже требуемого, причем с достаточным технологическим запасом.

Убедитесь, что вспомогательное оборудование не повреждено и функционирует должным образом. Пример такого «отказа» на испытаниях был представлен в самом начале статьи. Если возможно, выключите его, без отсоединения основных частей испытываемого оборудования. Если нет, попытайтесь поменять основное и вспомогательное оборудование ролями и выключите тестируемое оборудование, оставив вспомогательное. Остается ли проблема? Если да, причина кроется во вспомогательном оборудовании.

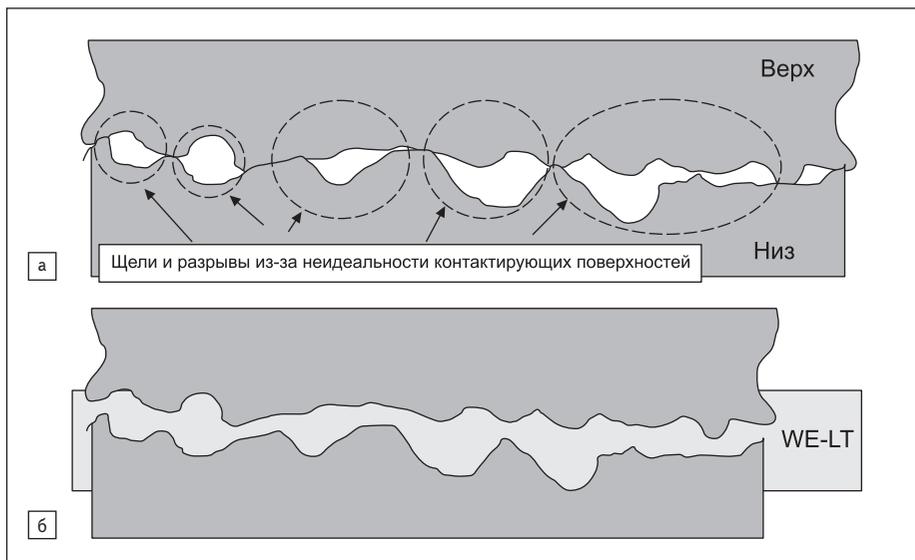


Рис. 4. Решение проблемы неидеальности контакта металлических поверхностей (а) путем использования проводящих прокладок WE-LT компании Würth Elektronik (б)

Это может быть и в случае, если вспомогательное оборудование находится вне камеры. Кабели, проходящие извне внутрь, могут содержать значительное количество радиочастотной энергии, которая ретранслируется внутри камеры. Удостоверьтесь, что кабели выполнены должным образом и имеют фильтры, экранированы или организованы так, чтобы избежать возможных проблем с ЭМС. Иногда установка на длинных кабелях серии из нескольких ферритовых дросселей может эффективно «удалить» их от воздействия на реальную систему или продукт, находящийся в процессе испытания. Вот почему мы писали об этом, когда затрагивали вопросы подготовки к испытанию [4]. Если же нельзя отключить испытываемое или вспомогательное оборудование, попробуйте изменить нагрузки, состояние работы, скорость передачи данных или другие функции и следить за изменениями уровня ЭМП. Здесь бывает полезно использование в шине тактовой частоты низкоомных последовательных резисторов, которые уменьшат крутизну фронтов, но только если это допустимо.

Что касается кабелей, тут возможны всякие чудеса. В качестве примера из практики — «отказ» изделий по причине обрыва в соединительном кабеле, предоставленном испытателями. Неприятный провод был «пойман» осциллографом по факту нарушения дифференциального сигнала, но вскрывать кабель пришлось буквально силой и с помощью далеко не инженерного сленга.

Здесь может помочь непроводящий пластиковый или деревянный крючок, например для вязания. Используйте его, чтобы вытащить отдельные провода из комплекта кабелей. Если это безопасно, вы можете притронуться к проводам пальцами, чтобы определить, изменились ли уровни излучения, когда вы касаетесь и отпускаете провод.

Один из лучших способов идентификации излучающих кабелей — измерение синфазного тока в проводах или экране кабеля. Зажимая кабель или провод токовыми клещами со спектральным анализатором максимально близко к блоку, можно измерить высокочастотный ток, наведенный на проводах, который хорошо коррелируется с излучаемыми ЭМП. Фактически для электрических коротких кабелей (менее четверти длины волны) можно предсказать электронное поле в В/м, сравнимое с пределами, установленными стандартами.

Подумайте также и о покупке пары длинных алюминиевых вязальных спиц. Максимально возможно оберните одну из них изоляционной лентой, для этого подойдет обычная лента, используемая электриками. Полученное приспособление пригодится для зондирования разъемов, штырьков разъема, монтажных плат, корпусов и частей шасси — надо прикоснуться к ним проводящим концом вязальной спицы. Естественно, необходимо соблюдать особую осторожность при зондировании разъемов с малым шагом и избегать коротких замыканий. Когда вы выполняете эту процедуру, следите за увеличением или уменьшением излучения. Оба результата помогут идентифицировать чувствительную область, которую предстоит исследовать более тщательно. Вместо вязальных спиц подойдет шнурок от мультиметра или штырьковый разъем с припаянной к нему проволокой. При подключении к чувствительной области они даже проще и эффективнее в использовании, поскольку провод может быть ориентирован в том же направлении, что и поляризация испытательной антенны.

Еще одним «средством последней надежды», о чем мы также писали ранее в [4], является алюминиевая и медная фольга. Ею можно обмотать оборудование малого и среднего размера, чтобы экранировать его. Учтите, что алюминиевая фольга

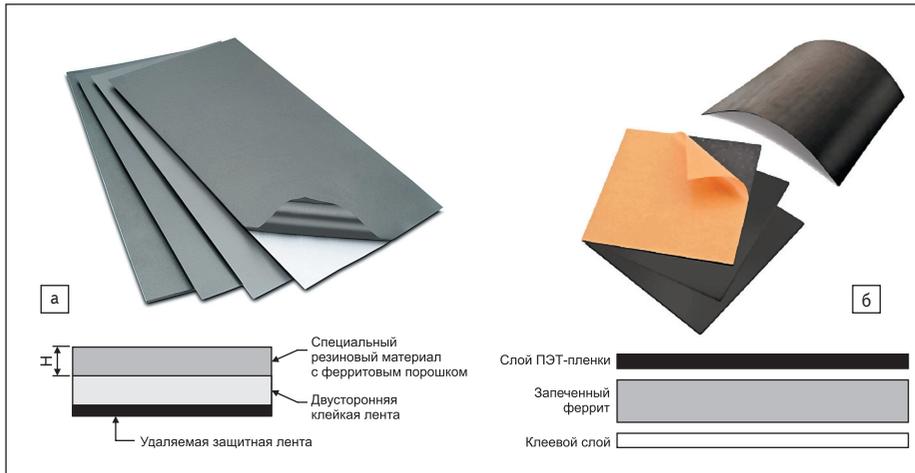


Рис. 5. Гибкие поглощающие ЭМП листы, производимые компанией Würth Elektronik: а) листы материала WE-FAS EM1; б) листы материала WE-FSFS

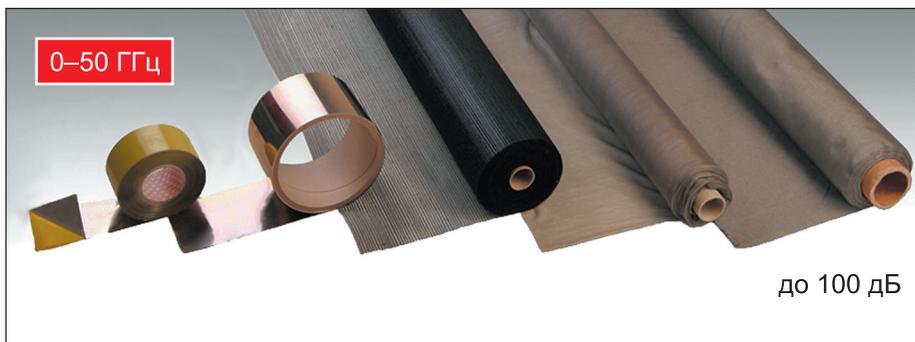


Рис. 6. Экранирующие материалы и полотна компании Aaronia

га мягче, чем медная, хотя и не столь эффективная, но удобство ее применения несомненно. Поскольку необходимо покрывать значительные площади, лучше обойтись без медной или алюминиевой ленты на клеевой основе. Цельная фольга, в отличие от токопроводящей ленты, не страдает от образования переходного импеданса. То есть при использовании металлических лент с токопроводящими клеями помните, что клей, хоть он и токопроводящий, на самом деле, извините за тавтологию, не очень-то и проводящий, тем более на высоких частотах. Ну, во всяком случае не настолько, как того бы хотелось. По мере того как вы накладываете ленту на ленту, возникающее в результате наращивание импеданса может значительно снизить эффективность экрана. А вот алюминиевая фольга без каких-либо покрытий улучшит эту связь на порядки.

Для большей эффективности алюминиевой фольги сложите ее швы в несколько раз, как при заделке швов на швейной машинке. Подключите фольгу к любым разъемам и экранам кабеля. Чтобы обеспечить связь, используйте соединительные провода или нейлоновые кабельные стяжки вокруг разъемов. Если помехи продолжают излучаться, попробуйте подключить фольгу к проводящей плоскости заземления (да, к полу, если он служит в качестве заземления). Если из-

лучение продолжается, то, вероятно, кабели все еще остаются проблемой и необходимо повторить поиски.

Если же проблема устранена, значит, причина в корпусе. Медленно снимайте алюминиевую фольгу с мест, которые, по вашему мнению, менее подвержены проблемам, например, над сплошными панелями без дисплеев или разъемов. В последнюю очередь освобождайте от экранирующей фольги разъемы и дисплеи. Каждый раз, когда вы снимаете часть фольги, проверяйте, появились ли выбросы излучения или они все еще остаются низкими. Часто это лучше всего выполнять, наблюдая за монитором, на котором видны уровни ЭМП.

Здесь необходимо заметить, что кроме фольги в распоряжении разработчиков имеется еще ряд полезных и удобных материалов, например гибкие поглощающие материалы компании Würth Elektronik [10] (рис. 5), которые обладают высоким собственным сопротивлением и которые можно легко наклеить прямо на токопроводящие элементы. А также сетки или экранирующие полотна, в частности компании Aaronia (рис. 6) [11]. Переводчиком и соавтором данной статьи в ряде проектов успешно использовались подобные полотна на основе чистой меди и никелевого сплава, а также наносимые поглощающие покрытия в виде краски. Такие «ткани» могут эффективно закрыть, скажем,

отверстия для вентиляторов, при этом выполняя роль воздушного фильтра.

Однако фольга остается средством последней надежды. В примере на рис. 2 вначале действительно была применена фольга: интерфейсный кабель обмотан фольгой, а блок включения/выключения (ON_OFF UNIT), где находился изолированный интерфейс, был также обклеен фольгой. Понятно, что это было не решение, а, как говорится, «припарка». И хотя испытательная лаборатория с этим согласилась, не согласилась мы. Анализ показал, что проблема в неправильно спроектированном интерфейсе. Он был перепроектирован [9] и выделен в отдельный экранированный узел (рис. 7), испытательной лабораторией было направлено техническое обоснование и комплект документации. После рассмотрения нашего предложения оно было принято без подтверждения повторными испытаниями, и от крайне неудобного экранирования мы отказались.

Для поиска мест излучения ЭМП переводчиком и соавтором настоящей статьи эффективно использовались два самодельных датчика. Первый представлял собой катушку в пластиковом корпусе, а второй — аналогичную, но в латунном. Первая принимала на себя магнитную и электрическую составляющую ЭМП, а вторая — только магнитную. Датчики подключались к осциллографу и путем их перемещения определялись места излучения и выхода ЭМП. Это было примитивно, но вполне эффективно.

И еще один, уж совсем необычный подход, который однажды сработал в испытательном центре ВНИИРПА им. А. С. Попова. У нас было выявлено несоответствие по одному параметру одного из первых в СССР музыкальных центров высшего класса. Мы не могли найти причину и оставили решение до утра. Все устали, да и утро вечера мудренее, и отзывать изделие с испытаний я, как его главный конструктор, не хотел. Утром параметр вложился в норму. Объяснить это никто не мог, лаборатория была опечатана,



Рис. 7. Переработанный узел изолированного интерфейса с кабелем (ленточный кабель с синим разъемом), помеха от которого ранее привела к отказу изделия на сертификационных испытаниях. Изображение предоставлено компанией «Модуль-98»

изделие тоже опломбировано, мы к нему не подходили, нас просто к нему не подпускали. Но факт есть факт — не менее десяти измерений показали соответствие с небольшим, но вполне приемлемым запасом, при выпуске продукции проблем с данным параметром также не было. Возможно, это был известный всем разработчикам «генеральский эффект», только наоборот.

Заключение

Тестирование продукта на соответствие требованиям ЭМС в сторонних испытательных лабораториях может быть воистину мучительным опытом. Излучаемые ЭМП, как правило, представляют собой наиболее рискованное и трудно прогнозируемое явление. Авторы этой статьи надеются, что приведенные рекомендации и примеры смогут принести пользу в вашем будущем тестировании, и вы заготовили шампанское не зря.

А если проблему вот так с ходу, «чапаевским методом», решить все же не удалось? Можно, конечно, утешить себя тем, что не вы одни такие, у других бывало и похуже. Но от такого утешения пользы никакой. Лучше снова проанализировать схемотехническое и конструктивное решение. На практике переводчика и соавтора настоящей статьи подобный случай произошел в начале нулевых. Главный конструктор сложного комплекса уделил основное внимание созданию технологии распознавания образов, программному обеспечению, графическому интерфейсу, видеоадаптеру собственной разработки, центральной ЭВМ и прочим «главным» вопросам. Уровень несоответствия требованиям по ЭМС, выявленный в одной из европейских лабораторий, оказался настолько критическим, что потребовал глобальной переработки изделия, на что ушло восемь месяцев. Понадобились новая разводка печатных плат, помехоподавляющие элементы на платах, фильтры на интерфейсах и экранирование выносных рабочих мест с сенсорными дисплеями плюс ряд дополнительных испытаний на месте. Зато, как небольшое утешение, комплекс получился намного лучше, кроме того, мы приобрели бесценный опыт.

Так что главное — не отчаивайтесь и не опускайте рук. Для получения дополнительных предложений по выполнению требований и испытаниям на соответствие по ЭМС обратитесь к [7, 8]

и еще раз изучите рекомендации, приведенные в данной статье и в публикации [6]. Проанализируйте все, составьте план мероприятий по устранению проблем — и за дело. Не бойтесь кардинальных решений, не ограничивайтесь «припарками» — их время прошло и пользы они не приносят. Если надо заново развести плату, залить «земли», добавить помехоподавляющие элементы или изменить корпус, установить фильтры и конденсаторы, то, поверьте, лучше это сделать сразу, а не потом, после возврата изделия уже с повторных испытаний. ■

Литература

1. Рентюк В. Электромагнитная совместимость: проблема, от решения которой не уйти // Компоненты и технологии. 2017. № 7.
2. Wyatt K. Troubleshooting Radiated Emission at the EMC Lab. Technical Services LLC.
3. 2017 EMC Testing Guide. Interference Technology Guide Series, 2017 ITEM Media. www.learn.interferencetechnology.com/2017-emc-testing-guide/
4. Рентюк В. Что нужно знать об испытаниях на выполнение требований по ЭМС для изделий коммерческого назначения // Компоненты и технологии. 2017. № 7.
5. Петит Г. Что нужно знать по испытаниям на выполнение требований ЭМС для изделий военного и аэрокосмического назначения. Краткий обзор // Компоненты и технологии. 2017. № 8.
6. Петит Г. Что требуется при подготовке изделия для испытаний, как их проводят и чем они заканчиваются // Компоненты и технологии. 2017. № 9.
7. André P., Wyatt K. EMI Troubleshooting Cookbook for Product Designers. SciTech Publishing, 2014.
8. 2017 EMC Precompliance Test Guide, Interference Technology.
9. Рентюк В. Практические вопросы применения ИМС изолированного интерфейса в части выполнения требования по электромагнитной совместимости // Компоненты и технологии. 2015. № 3.
10. Рентюк В. Решение проблемы магнитного экранирования на примере материалов компании Würth Elektronik // Компоненты и технологии. 2015. № 8.
11. www.aaronia.com/products/shielding-screening/
12. Fölkel L. Effective EMI shielding concepts. Würth Elektronik eiSos GmbH & Co. ANP043c, 2016-06-06. LF.

Статья опубликована в журнале «Компоненты и технологии» № 10'2017

Методы испытаний кабельных жгутов на электромагнитную совместимость

Сергей ЛЮТАЕВ

Электромагнитная совместимость РЭА зачастую определяется экранирующими свойствами входящих в ее состав кабелей и кабельных сборок. В статье рассматриваются основные стандарты, определяющие методы испытаний по оценке эффективности экранирования кабелей и кабельных жгутов. Описанные методы могут быть использованы разработчиками для проведения отработочных, предварительных испытаний.

Лаборатория электромагнитной совместимости (ЭМС) АО «ТЕСТПРИБОР» проводит испытания различных изделий, в том числе и бортовой аппаратуры (БА) летательных аппаратов (ЛА). В ходе испытаний зачастую выявляются несоответствия изделий требованиям нормативных документов, причем часто это бывает из-за неправильно изготовленных кабельных жгутов.

Одна из причин заключается в том, что разработкой изделия, представляемого на испытания по ЭМС, и разработкой кабельных жгутов занимаются разные отделы одной организации, а то и разные организации, причем обычно разработчик кабельных жгутов не имеет представления о требованиях по ЭМС к изделию, системе и всему комплексу.

Рассмотрим некоторые из этих требований.

При испытаниях на эмиссию радиочастотных помех (ГОСТ В 25803-90, ГОСТ РВ 6601-002-2008, ГОСТ Р 51318.11-2006) производится измерение помех от испытуемого изделия в рабочем состоянии со всеми присоединенными кабелями питания, связи, управления, входящими в их состав соединителями как в линиях связи и питания, так и по радиочастотному (РЧ) полю.

При испытаниях на устойчивость к помехам воздействие также прилагается к кабельным жгутам, причем для некоторых видов помех воздействию подвергаются именно кабельные жгуты. В таблице 1 приведены примеры видов испытаний и уровней воздействия.

Очевидно, что при низких экранирующих свойствах кабелей прилагаемые воздействия могут нарушить работоспособность аппаратуры или привести к ее отказу.

Испытания БА ЛА на ЭМС достаточно сложные и дорогостоящие, поэтому целесообразно оценивать экранирующие жгуты отдельно, до их испытания в составе системы, или испытывать их на начальных стадиях.

Методы проведения испытаний бортовой кабельной сети ЛА с целью оценки эффективности экранирования приведены в ОСТ 101205-2012, разработанном головной организацией по стандартизации продукции авиационной промышленности Минпромторга РФ ФГУП «НИИСУ» с участием ОАО «НИИАО».

Стандарт устанавливает методики измерений эффективности экранирования оплетками элементов бортовой кабельной сети ЛА: одиночных проводов и жгутов проводов. Эти методики предназначены для измерения поверхностного переходного сопротивления и эффективности экранирования в диапазоне частот 0,1–1000 МГц.

Переходное сопротивление электрического короткого одиночного провода (обычно длиной 300 мм) измеряют по схеме, представленной на рис. 1.

Испытуемый провод подключают к выходу синхрогенератора анализатора спектра через переходное устройство с резистором 50 Ом, второй конец провода через высокочастотный коаксиальный соединитель подключают к выходу анализатора спектра [1].

Таблица 1. Примеры видов испытаний и уровней воздействия

Внешние воздействующие факторы	Нормативно-техническая документация	Способ воздействия	Уровень воздействия
Устойчивость к радиочастотным полям (HiRf)	КТ160D разд. 20	антенна-облучатель	$E_{HI} = 200-500 \text{ В/м};$ $\tau = 16-50 \text{ мкс}$
Магнитное поле	КТ160D разд. 19	провод-индуктор	$I = 30 \text{ А/м};$ $F = 380-400 \text{ Гц}$
Электрическое поле	КТ160D разд. 19	провод-индуктор	$E = 135-5400 \text{ В/м};$ $F = 380-15000 \text{ Гц}$
Импульсное воздействие	КТ160D разд. 19	провод-индуктор	$U_p = 600 \text{ В};$ $\tau_1 = 50-1000 \text{ мкс};$ $\tau_2 = 0,2-10 \text{ мкс}$
Затухающие синусоидальные импульсы	спецтребования	инжектор	$I \leq 5 \text{ А}$
МИП (микросекундные импульсные помехи)	ГОСТ Р 51317.4.5-99	инжектор/устройство связи	$V = 0,5-4 \text{ кВ}$
НИП (наносекундные импульсные помехи)	ГОСТ Р 51317.4.4-2007	инжектор (клещи связи)	$V = 0,2-4 \text{ кВ};$ $\tau = 1-1000 \text{ нс};$ $F_m = 5-100 \text{ кГц}$
ЭСР (электростатический разряд)	КТ160D разд. 25, спецтребования	генератор ЭСР, разрядник	$15-25 \text{ кВ}$

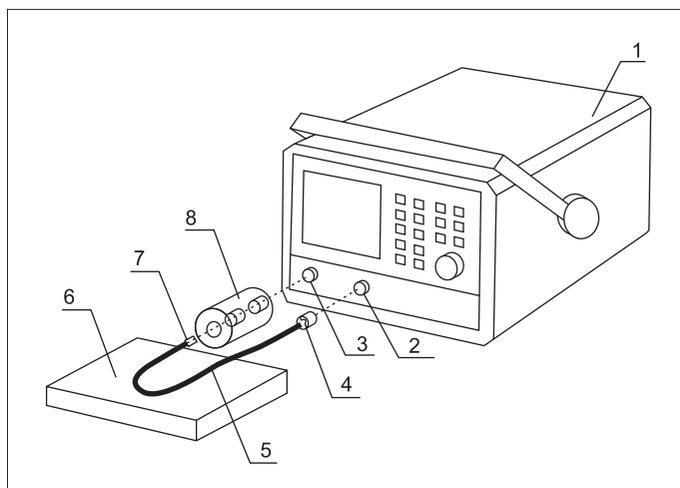


Рис. 1. Испытательная установка для измерения переходного сопротивления одиночного экранированного провода: 1 — анализатор спектра; 2 — измерительный вход; 3 — выход синхрогенератора; 4 — коаксиальный соединитель; 5 — испытуемый одиночный экранированный провод; 6 — диэлектрическая подставка; 7 — оплетка, соединенная с центральным проводником; 8 — переходное устройство с резистором 50 Ом и коаксиальным соединителем

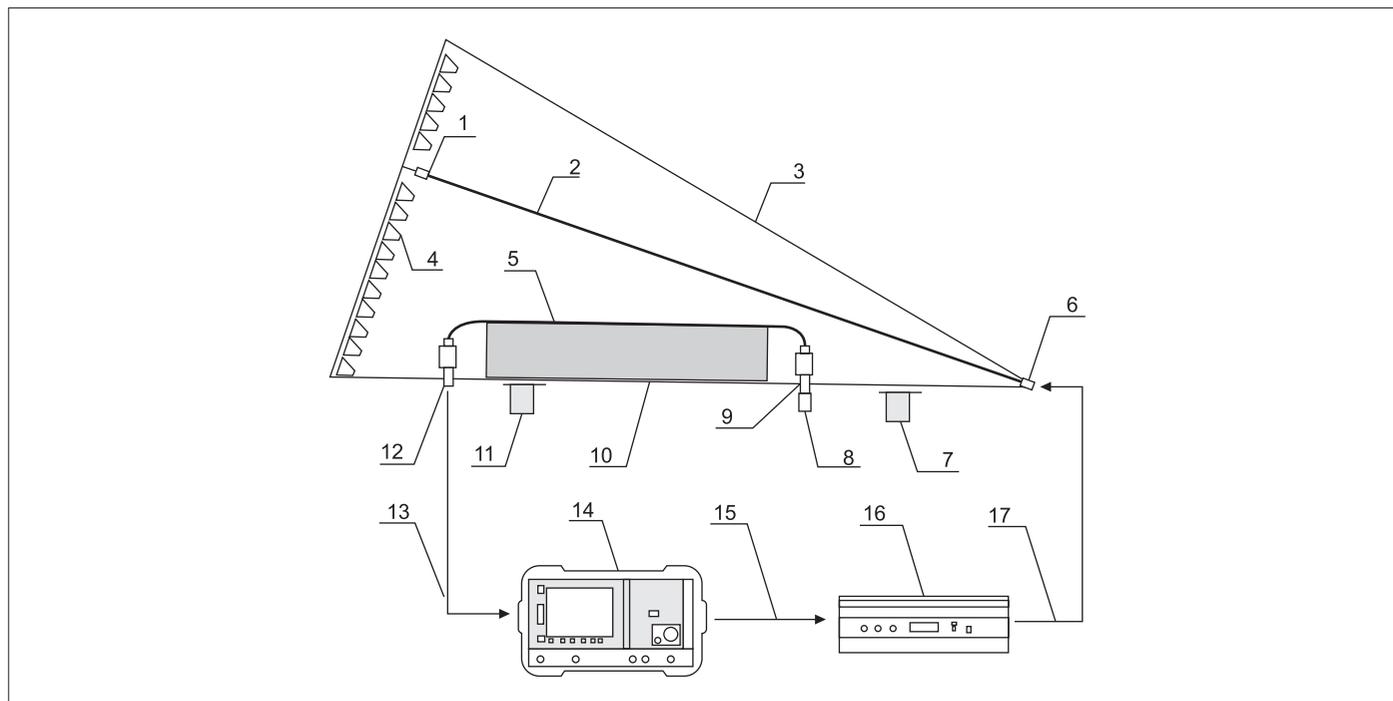


Рис. 2. Схема установки для измерения эффективности экранирования экранирующими оплетками проводов или жгутов в ГТЕМ-камере:

1, 8 — резисторы сопротивлением 50 Ом; 2 — центральная пластина; 3 — ГТЕМ-камера; 4 — радиопоглощающий материал; 5 — испытуемый кабель с оплеткой с двумя адаптерами на концах; 6, 9, 12 — высокочастотные коаксиальные соединители; 7, 11 — деревянная подставка; 10 — подставка из пенопласта; 13 — на вход анализатора спектра; 14 — анализатор спектра; 15 — выход синхрогенератора; 16 — усилитель; 17 — выход усилителя

Переходное поверхностное сопротивление в Ом/м рассчитывают по формуле:

$$Z_T = U_{\text{пров}} / (I_{\text{пров}} \cdot l) = (50 \cdot U_{\text{пров}}) / (U_{\text{вых}} \cdot l),$$

где: $U_{\text{пров}}$ — напряжение, наведенное на внутреннем проводнике одиночного экранированного провода, измеренное анализатором спектра, В; $I_{\text{пров}}$ — ток, протекающий по внешней поверхности оплетки испытуемого провода ($I_{\text{пров}} = U_{\text{вых}} / 50 \text{ Ом}$), А; $U_{\text{вых}}$ — напряжение на выходе синхронного генератора; l — длина испытуемого проводника, м.

Эффективность экранирования SE в децибелах рассчитывают по формуле:

$$SE = 34 - 20 \lg(Z_T).$$

К недостаткам данного метода можно отнести отсутствие серийно выпускаемой оснастки, плохую повторяемость результатов, частотную изрезанность измеренной характеристики.

Методика измерения эффективности экранирования оплетками проводов произвольной длины в диапазоне 30–1000 МГц основана на измерении напряжения в проводнике, помещенном в испытательную камеру ГТЕМ (гигагерцевая ТЕМ-камера) или РТЕМ (резонансная ТЕМ-камера), сначала с экраном (оплеткой), потом без него. Схема измерительной установки с использованием камеры ГТЕМ показана на рис. 2.

Эффективность экранирования в децибелах рассчитывают по формуле:

$$SE = 20 \lg(U_{\text{без экр}} / U_{\text{экр}}).$$

Для обеспечения устойчивой работы цифрового бортового оборудования в условиях воздействия электромагнитных полей излучения высокой интенсивности (HIRF) с напряженностью $E_{\text{норм}} = 100 \text{ В/м}$ в соответствии с [1] (раздел 20, категория жесткости W) эффективность экранирования оплетками одиночных проводов и жгутов проводов должна быть не менее значений, приведенных в таблице 2.

Если в техническом задании на оборудование задана другая напряженность поля $E_{\text{треб}}$, отличная от 100 В/м, то требуемую эффек-

тивность экранирования одиночного провода или жгута в децибелах рассчитывают по формуле:

$$SE_{\text{треб}} = SE_{\text{таб}} + 20 \lg(E_{\text{треб}}) - 40,$$

где $SE_{\text{таб}}$ — эффективность экранирования, заданная в таблице 2.

К достоинствам данного метода следует отнести достаточно точное моделирование поведения кабеля в радиочастотном поле. Недостатком является высокая стоимость и сложность оборудования, его громоздкость, необходимость защиты персонала от излучения.

В кабельной промышленности для оценки эффективности экранирования кабелей применяется метод триаксиальной линии (ГОСТ Р 54429-2011, ГОСТ Р 53880-2010) [2, 3]. В ОСТ 1 01205-2012 этот метод приводится как альтернативный [1]. Схема измерения по этому методу показана на рис. 3. Эффективность экранирования испытуемого образца в децибелах можно вычислить по формуле:

$$SE = 20 \lg(U_{\text{ген}} / U_{\text{вх}}),$$

где $U_{\text{ген}}$ — напряжение на выходе генератора; $U_{\text{вх}}$ — напряжение на входе анализатора спектра. Есть различие в терминологии и определениях, используемых специалистами связи [2, 3] и радиоэлектронике [1]. В данной статье при описании методов испытаний сохраняется терминология соответствующего первоисточника.

Удобство метода триаксиальной линии, компактность измерительных установок и относительная простота оборудования делают его привлекательным для испытателей. На рис. 4 приведено изображение установки с использованием оборудования фирмы BEDEA/

Таблица 2. Рекомендуемые значения эффективности экранирования оплетками одиночных проводов и жгутов проводов

Диапазон частот, МГц	Эффективность экранирования одиночного провода, дБ	Эффективность экранирования жгута проводов, дБ
30–100	40	
100–200	35	30
200–400	30	25
400–1000	20	

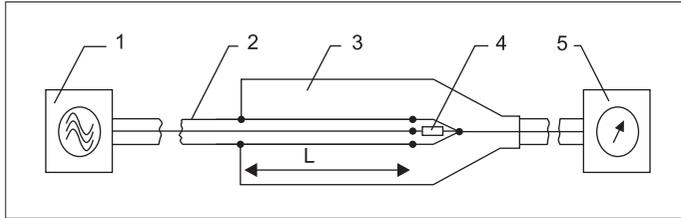


Рис. 3. Схема измерений с помощью триаксиальной линии:
1 — генератор; 2 — испытываемый кабель; 3 — измерительная труба;
4 — согласующий резистор; 5 — измерительный приемник



Рис. 4. Установка для измерения эффективности экранирования с помощью триаксиальной линии

Rosenberger [4]. На основе подхода, использующего триаксиальный метод, можно испытывать не только кабели, но и кабельные соединители и различные прокладки, в том числе предназначенные для обеспечения ЭМС. Для этого исследуемый соединитель помещается либо в трубу триаксиальной камеры, либо в резонансной камере на основе прямоугольного волновода. Схема установки для испытания соединителей показана на рис. 5. На рис. 6 показана установка для испытания различных прокладок. Преимуществом метода является защищенность установки от посторонних шумовых излучений и отсутствие собственных. Это обеспечивает динамический диапазон измерений до 100 дБ без использования специального экранированного помещения. Частотный диапазон измерений — от нескольких килогерц до 3–4 ГГц и выше.

Триаксиальный метод только в последние несколько лет утвердился в качестве предпочтительного в стандартах кабельной промышленности, до этого использовался метод «поглощающих клещей» (ГОСТ Р 54429-2011, п. 8.3.9, IEC 61196-1 п. 12.4). Схема измерений по этому методу представлена на рис. 7. Принцип измерений состоит в том, что сигнал от генератора подается в испытываемый кабель через отверстие в отражающей пластине, на другом конце кабеля включается согласующая нагрузка. За отражающей пластиной располагаются поглощающие ферритовые клещи с токосъемником, на расстоянии 6 м располагаются еще одни поглощающие клещи. Затухание экранирования в децибелах определяется по формуле:

$$SE = 10 \cdot \lg(P_1/P_{2max}),$$

где: P_1 — мощность, подаваемая от генератора; P_{2max} — максимальная излучаемая мощность.

При доступных в настоящее время поглощающих клещах затухание экранирования может быть измерено в диапазоне до 2,5 ГГц. К достоинству этого метода можно отнести то, что измерения проводятся на оборудовании, обычно имеющемся в каждой лаборатории ЭМС. К недостаткам можно отнести большую длину кабеля, подвергаемого испытаниям, и необходимость проведения измерений в экранированном помещении.

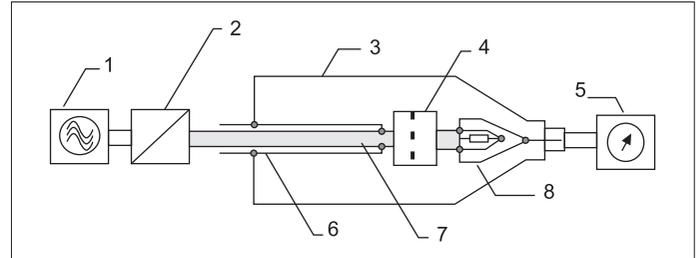


Рис. 5. Схема установки для испытания соединителей триаксиальным методом:
1 — генератор; 2 — аттенуатор; 3 — труба; 4 — исследуемый соединитель;
5 — измерительный приемник; 6 — удлиняющая трубка; 7 — соединительный кабель;
8 — переходное устройство с согласующим резистором

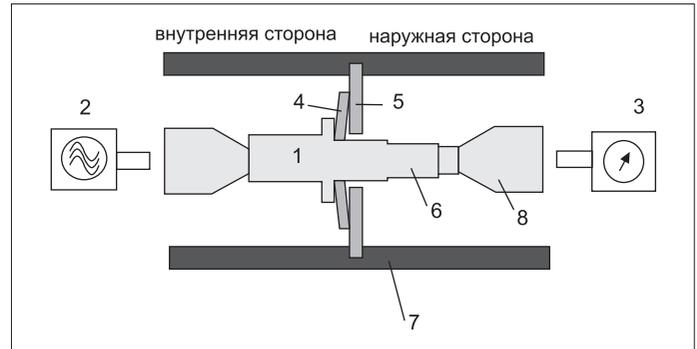


Рис. 6. Схема установки для испытания прокладок на ЭМС:
1 — соединитель; 2 — генератор; 3 — измерительный приемник;
4 — контактная пружина/прокладка; 5 — экранирующая перегородка;
6 — переходной адаптер; 7 — внешний проводник; 8 — внутренний проводник

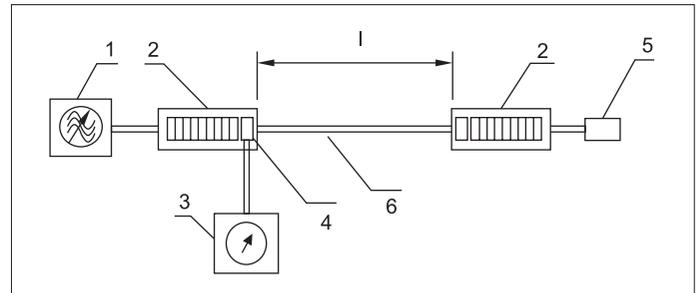


Рис. 7. Схема установки по методу поглощающих клещей:
1 — генератор; 2 — поглощающие клещи; 3 — измерительный приемник;
4 — датчик тока; 5 — согласованная нагрузка; 6 — испытываемый кабель

Еще одним методом измерения сопротивления связи является метод инжекционной линии (IEC 96-1 Amendment 2/1993.). Схема измерительной установки по этому методу показана на рис. 8. Сигнал с выхода синхрогенератора анализатора спектра подается на инжекционный провод, который крепится к испытываемому кабелю, дальний конец которого соединен с входом анализатора спектра, с помощью которого производится измерение проникающего сигнала.

$$Z_T = \frac{2}{l} \cdot \sqrt{Z_1 \cdot Z_2} \cdot 10^{\frac{A_T}{20}},$$

где: $A_T = U_2/U_1$; U_1 — напряжение сигнала, подаваемого в провод-инжектор; U_2 — напряжение, измеренное на выходе испытуемого кабеля. Верхний частотный предел, до которого может быть измерено сопротивление связи по этому методу, зависит от длины испытуемого отрезка образца кабеля и составляет до 3 ГГц.

Иногда из-за организационных сложностей согласования техзаданий на испытания оборудования на ЭМС или утверждения результатов испытаний оказывается проще проводить испытания кабельных жгутов непосредственно по методам, по которым испытывается аппаратура на ЭМС. При этом на одном конце кабеля включается имитатор сигнала бортовой аппаратуры, на выходе с помощью контроль-

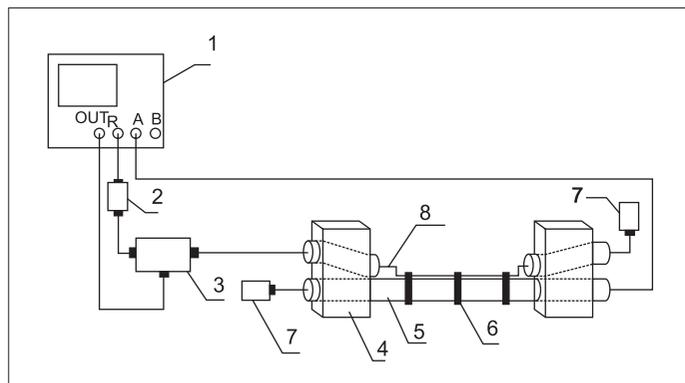


Рис. 8. Схема установки по методу инъекционной линии:
1 — анализатор цепей; 2 — аттенуатор 20 дБ; 3 — ответвитель; 4 — опорные панели;
5 — испытываемый кабель; 6 — липкая лента; 7 — согласованная нагрузка; 8 — инъекционная линия

но-проверочной аппаратуры контролируется наличие искажений за счет сигнала помехи, прошедшей через экран кабеля.

На рис. 9 показана осциллограмма сигнала помехи (импульсный затухающий синусоидальный сигнал) в последовательности импульсов цифрового кода. На рис. 10 представлена фотография части испытательной установки на воздействие затухающего синусоидального импульса. На экране осциллографа видно искажение сигнала из-за воздействия помехи.

Перечисленные методы могут быть использованы разработчиками или испытателями для оценки качества кабельных жгутов из состава БА.

Литература:

1. ОСТ 1 01205-2012 «Экранирование бортовой кабельной сети самолетов и вертолетов. Методы проведения испытаний с целью оценки эффективности экранирования».
2. ГОСТ Р 54429-2011 «Кабели связи симметричные для цифровых систем передачи. Общие технические условия».
3. ГОСТ Р 53880-2010 «Кабели коаксиальные для сетей кабельного телевидения. Общие технические условия».
4. Balunless measurement of coupling attenuation of screened balanced cables up to 2 GHz. Bernhard Mund, Christian Pfeiler, 64rd IWCS Conference, Atlanta, GA, USA, October 2015.

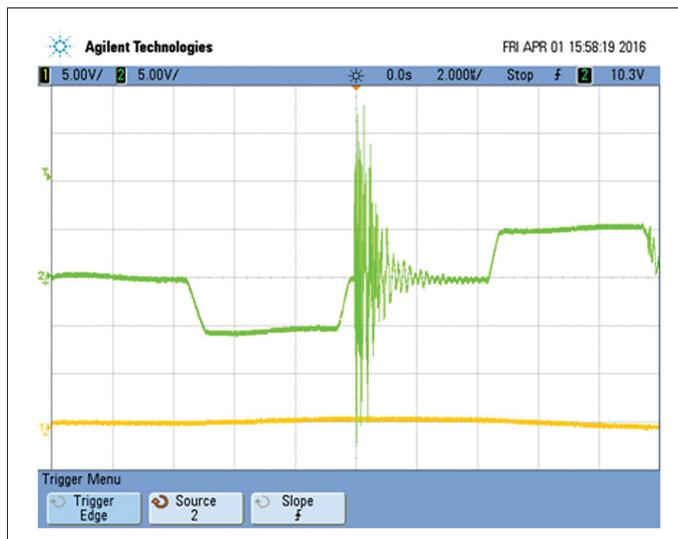


Рис. 9. Сигнал с затухающей синусоидальной импульсной помехой

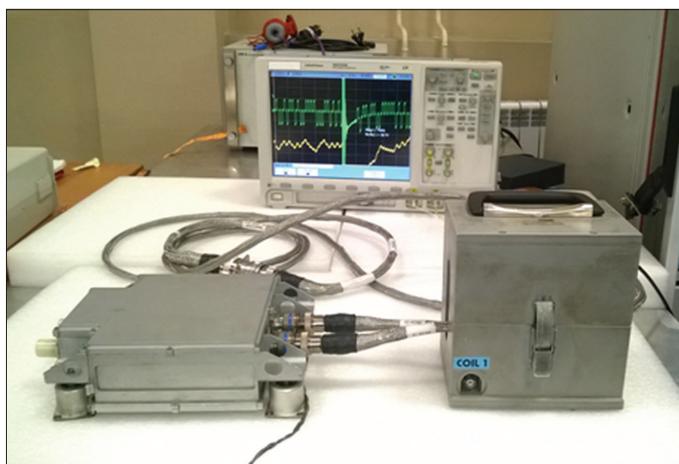


Рис. 10. Испытательная установка для исследования воздействия затухающей синусоидальной импульсной помехи

Статья опубликована в журнале «СВЧ» № 2'2017

Испытания на воздействие излучаемых электромагнитных помех



Электромагнитные поля являются источником электромагнитных помех, которые воздействуют на корпуса и линии связи и электропитания технических средств.

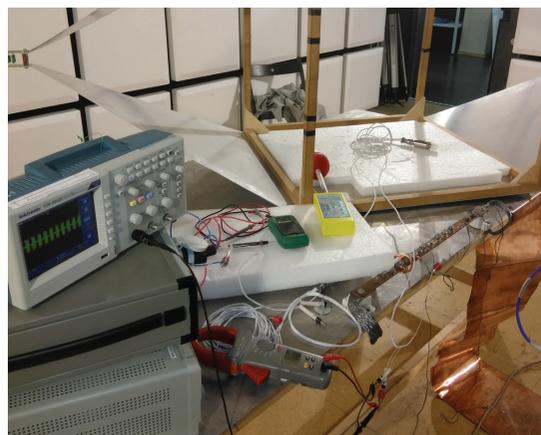
Источником электромагнитных полей являются как техногенные, так и природные факторы: излучение радиопередающих станций, радаров, промышленного оборудования электромагнитного фона Земли, галактические шумы и т. д.

При испытаниях на излучаемые электромагнитные помехи технические средства подвергаются воздействию электрическо-

го, магнитного или электромагнитного поля с уровнем, определенным в нормативных документах или техническом задании.

Испытательная лаборатория ЭМС АО «ТЕСПРИБОР» использует комплекс испытательного оборудования: генераторы, широкополосные усилители, набор антенн, беззховую экранированную камеру, ТЕМ-камеру, реверберационную камеру, другого оборудования, позволяющего проводить испытания на устойчивость к электромагнитным полям в диапазоне частот до 40 ГГц:

- ГОСТ РВ 6601-001-2008 (п. 5.5);
- КТ-160/14G (раздел 20.0);
- ГОСТ 30804.4.3.



Интеграция лаборатории ЭМС в систему распределенного проектирования прототипов изделий приборостроения

Владимир БЕЛОВ,
д. т. н.
Владимир ПЕТРОВ,
к. т. н.

В условиях современной конкурентной среды и необходимости вывода на рынок инновационных и технологичных продуктов ключевой компетенцией любого производственного предприятия становится умение быстро решать задачи по созданию качественного прототипа продукта для подтверждения его свойств и заявленных характеристик до запуска серийного выпуска. Для контроля выполнения требований по ЭМС в систему распределенного проектирования можно интегрировать автоматизированную систему сертификационных измерений и испытаний.

Одним из основных требований к свойствам, предъявляемых к продукту, содержащему помехообра-

зующие и/или помеховосприимчивые элементы, является выполнение регламентов по электромагнитной совместимости (ЭМС)

в соответствии с Техническим регламентом Таможенного союза (ТР ТС 020/2011) и другими действующими нормативными документами или стандартами. Для контроля выполнения данных требований на каждом этапе создания прототипа следует провести предварительные или диагностические испытания по ЭМС, сделав это на специализированных рабочих местах с помощью тестового и измерительного оборудования. На заключительной стадии изготовления прототипа необходимо осуществить сертификационное испытание в аккредитованной ЭМС-лаборатории с выдачей протокола по результатам процедуры и оформлением сертификата или декларации на подтверждение соответствия требованиям Технического регламента Таможенного союза и/или другим действующим нормативным документам и стандартам.

Таким образом, для развития подобной компетенции вместе с задачей создания и внедрения эффективной автоматизированной системы проектирования изделия или продукта возникает задача ее интеграции с автоматизированной системой сертификационных измерений и испытаний на соответствие требованиям по ЭМС.

Поставленная задача успешно решается в Центре проектирования инноваций АУ «Технопарк-Мордовия» (Саранск), где внедряется технология распределенного проектирования и создания прототипа по модели параллельного инжиниринга.

Согласно этой технологии сам прототип определен как наиболее простой вариант продукта, который содержит наиболее сложный элемент, а прототипирование рассматривается как быстрая «черновая» реализа-

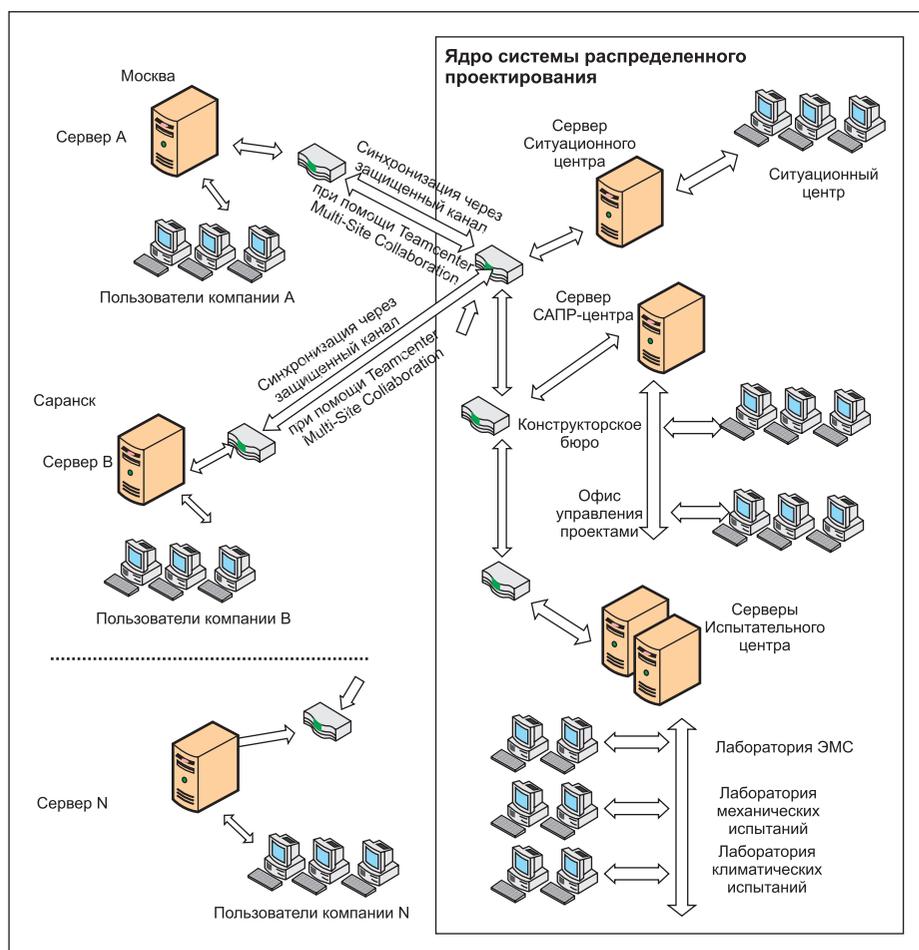


Рис. 1. Структура ЦПИ в аспекте информационных технологий

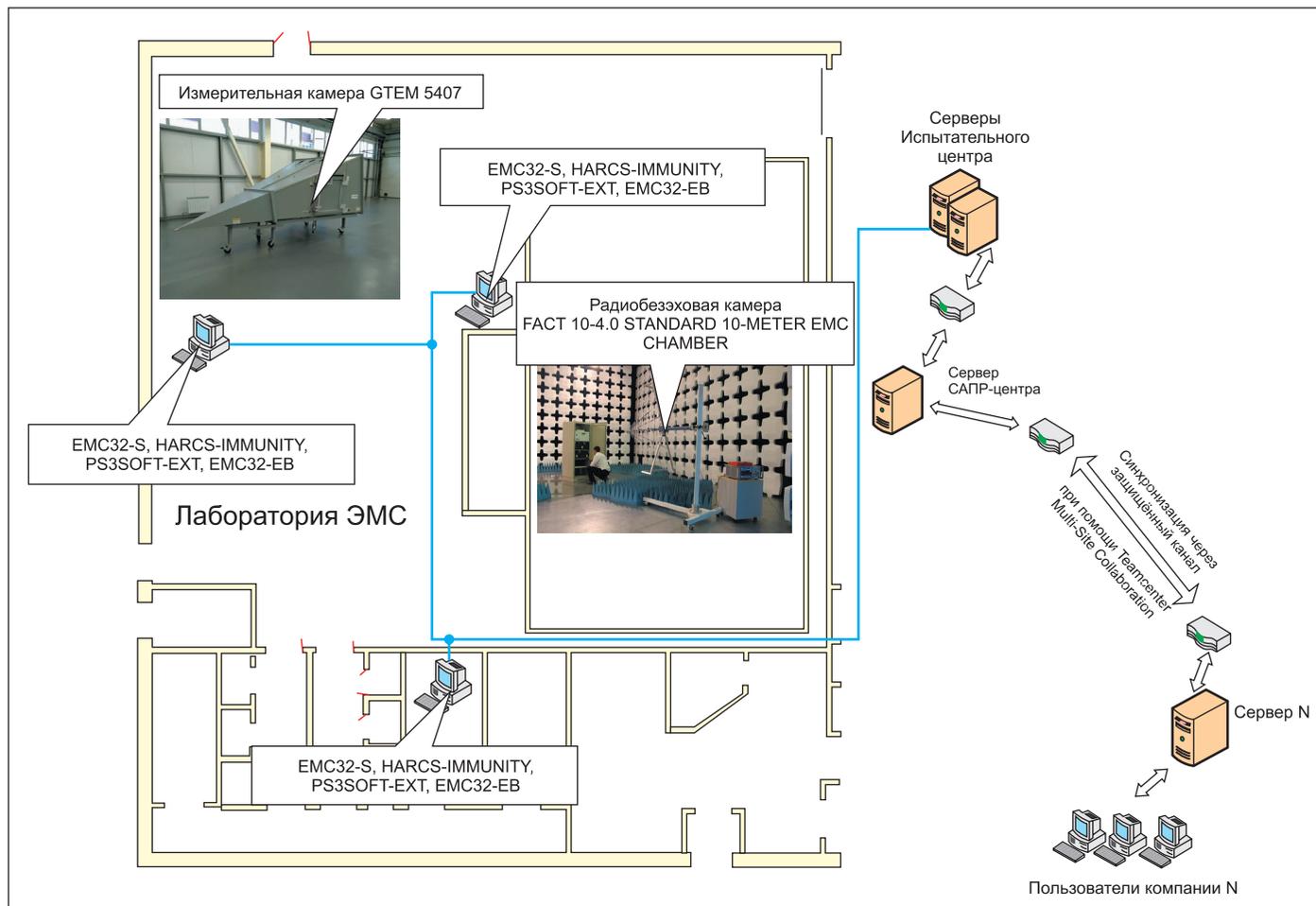


Рис. 2. Схема развертывания автоматизированной системы испытаний по ЭМС на плане помещений ЦПИ

ция базовой функциональности для анализа работы проектируемой системы в целом.

Очевидно, что чем быстрее будет создан прототип и подтверждено высокое качество его свойств и характеристик, тем более высокими окажутся конкурентные возможности серийного продукта. Поэтому модель параллельного инжиниринга, при которой одновременно ведут работу многопрофильные группы специалистов, успешно внедряется в практику проектирования инноваций передовых отечественных предприятий [1].

Модель реализации основана на методологии инновационного процесса пятого поколения по известной классификации Р. Росвелла [2]. Главная особенность методологии заключается в ее опоре на архитектуру и инфраструктуру интегрированных сетей и систем. На рис. 1 показана архитектура такой системы, реализуемой в ЦПИ «Технопарк-Мордовия».

В соответствии с рабочим проектом создания предприятия, ЦПИ с технологической точки зрения представляет собой ядро распределенной системы автоматизированного проектирования (САПР), содержащее средства автоматизации инженерии требований, инженерии системной архитектуры, инженерии испытаний.

В настоящее время в научно-технической литературе при представлении функциональности распределенных САПР в аспекте информационных технологий основное внимание уделяется инженериям требований и системной архитектуры [3]. Особенностью ядра распределенной САПР прототипов, реализуемого в ЦПИ, является включение в его состав автоматизированной системы испытаний, обеспечивающей инструментальную поддержку инженерии испытаний. Она имеет клиент-серверную архитектуру, работает в локальной вычислительной сети, сопрягается с другими информационными и служебными вычислительными сетями и по своему строению разделяется на две крупные части: серверный комплекс и автоматизированные рабочие места испытателей.

Серверный комплекс состоит из сервера баз данных, сервера защиты информации и сервера специальных вычислений.

Автоматизированные рабочие места испытателей служат для предоставления специалистам пользовательских интерфейсов работы с функциями системы, в том числе с общими сервисами, включающими визуализацию и документирование информации, пользование электронными справочниками, словарями и электронной базой норматив-

ной, рабочей и руководящей информации для испытаний. Развертывание автоматизированной системы испытаний по ЭМС внутри системы распределенного проектирования ЦПИ показано на рис. 2.

Подключение серверного комплекса испытательного центра к защищенным каналам передачи данных глобальной сети проектирования осуществляется через сервер САПР центра ЦПИ. Функционально это реализуется средствами PLM-системы Teamcenter фирмы Siemens. Архитектура системы построена по технологии «клиент-сервер» и включает расположенный на сервере САПР-центра Teamcenter Server, который предоставляет рабочим местам клиентов интерфейсы для работы с модулями системы (Teamcenter Client). Серверная испытательного центра, спроектированная как помещение специального назначения, оборудована двумя серверами HP ProLiant DL360 Gen9. Программное обеспечение серверов Teamcenter Server, Siemens NX license server, лаборатория ЭМС ЦПИ, оснащенная модульной системой сертификационных измерений и испытаний на соответствие требованиям по ЭМС (МССИИ ЭМС), радиобезэховой камерой FACT 10-4.0 Standard и измерительной камерой GTEM 5407, предназначена для прове-

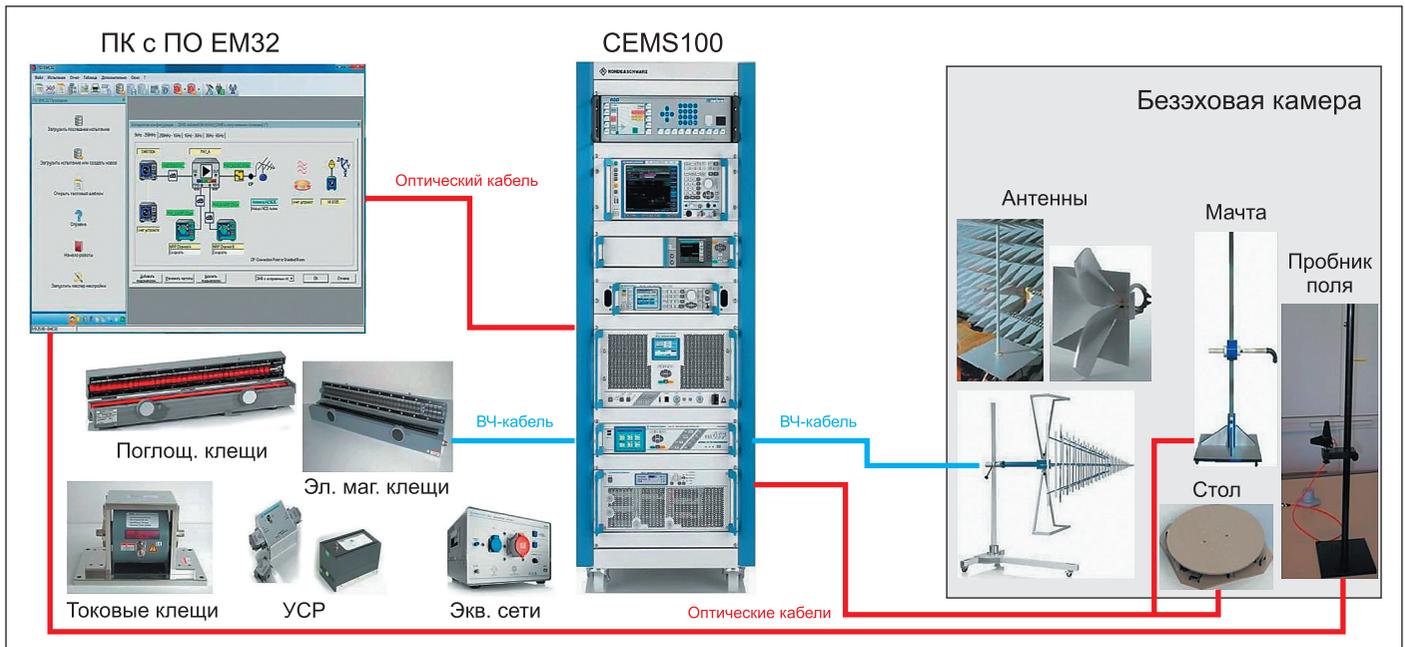


Рис. 3. Структурная схема модулей M1, M2, M17 МССИИ ЭМС

дения сертификационных (окончательных) измерений и испытаний с выдачей протокола по результатам работ. Испытания и измерения, проводимые МССИИ ЭМС в радиобезэховой камере и в измерительной камере GTEM 5407, полностью автоматизированы благодаря специализированному программному обеспечению (СПО). Автоматизация испытаний на устойчивость к радиочастотному электромагнитному полю по ГОСТ 30804.4.3-2013 (IEC 61000-4-3:2006), на устойчивость к кондуктивным помехам, наведенным радиочастотными электромагнитными полями, по ГОСТ Р 51317.4.6-99 (IEC 61000-4-6:1996), а также измерение помехоэмиссии по ГОСТ 30805.14.1-2013 (CISPR 14-1:2005), ГОСТ CISPR 15-2014, ГОСТ 30805.22-2013 (CISPR 22:2006) осуществляются с помощью СПО EMC32 модулями M1, M2, M17 МССИИ ЭМС соответственно. Все модули изготовлены компанией Rohde & Schwarz. Структурная схема модулей M1, M2 и M17 при работе в радиобезэховой камере под управлением СПО EMC 32 представлена на рис. 3.

СПО EMC 32 представляет собой программную платформу, которая помогает автоматизировать проведение измерений помехоэмиссии и испытаний на помехоустойчивость/помеховосприимчивость согласно

требованиям общепромышленных и военных стандартов. СПО EMC 32 предусматривает сбор, запись, анализ, хранение, мониторинг и отслеживание результатов испытаний и измерений в режиме реального времени, дистанционное управление измерительным и испытательным оборудованием модулей M1, M2 и M17 МССИИ ЭМС (система CEMS100). Модульность платформы позволяет расширять и гибко конфигурировать необходимый функционал для реализации конкретных задач.

Подъем антенной мачты и вращение поворотного стола радиобезэховой камеры FАCT 10-4.0 Standard при проведении измерений помехоэмиссии и испытаний на помехоустойчивость также осуществляются дистанционно с помощью СПО EMC 32 через управляющий ПЭВМ и контроллер управления антенной мачтой и поворотным столом EMCcenter, что обеспечивает полную автоматизацию измерений и испытаний.

Специализированное программное обеспечение EMC 32 лаборатории ЭМС относится к классу прикладных программ профессионального назначения.

В автоматизированной системе испытаний обмен выходными данными встроенных программ внутри локальной вычислительной сети НИЦ выполняется

посредством набора сетевых протоколов передачи данных TCP/IP. Текущая информация и сведения, полученные в результате проведения испытаний, передаются на серверы испытательного центра, где становятся доступны всем участникам распределенной системы.

Таким образом, модульная система сертификационных измерений и испытаний на соответствие требованиям по ЭМС полностью интегрируется в систему распределенного проектирования ЦПИ, что позволяет на этапе сертификационных испытаний прототипов проводить работы в дистанционно-управляемом автоматизированном режиме и обеспечивает высокую технологичность и компетентность ЦПИ АУ «Технопарк Мордовия» при разработке изделий приборостроения. ■

Литература

1. Зубарева И. Самолеты пошли на взлет. Новые разработки быстрее дойдут до авиастроителей // Российская Бизнес-газета. 2014. № 955.
2. Rothwell R. Towards the Fifth-generation Innovation Process//International Marketing Review. 1994. Vol. 11. Is. 1.
3. Хородов В.С., Игонин А.Г. Технологии распределенного проектирования // Вестник УлГТУ. 2014. № 1.

Статья опубликована в журнале «Компоненты и технологии» № 11'2017